

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ И ЛИТЕЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

**Материалы
IV Международной научно-практической конференции**

г. Чебоксары
18–20 декабря 2018 г.

Под редакцией доктора технических наук, профессора,
заслуженного деятеля науки и техники Российской Федерации
и заслуженного деятеля науки Чувашской Республики
И.Е. Илларионова

Чебоксары
2018

УДК 621+621.74
ББК 34.4+34.61
С 56

Современные технологии в машиностроении и литейном
С 56 производстве: материалы IV Междунар. науч.-практ. конф.
(Чебоксары, 18–20 декабря 2018 г.) / под ред. доктора технических
наук, проф. И.Е. Илларионова. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та,
2018. – 512 с.
ISBN 978-5-7677-2778-0

Сборник включает материалы IV Международной научно-практической
конференции «Современные технологии в машиностроении и литейном
производстве», состоявшейся 18–20 декабря 2018 г. в ФГБОУ ВО «Чувашский
государственный университет им. И.Н. Ульянова».

Для научных работников, преподавателей высших учебных заведений,
работников промышленных предприятий и научно-исследовательских
институтов, магистрантов, аспирантов и студентов машиностроительных и
металлургических факультетов высших учебных заведений России, стран
ближнего и дальнего зарубежья.

УДК 621+621.74
ББК 34.4+34.61

ISBN 978-5-7677-2778-0

© Издательство «Чувашского
государственного университета», 2018

СЕКЦИЯ
«ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО»

МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОМУ ФАКУЛЬТЕТУ 50 ЛЕТ

FACULTY OF ENGINEERING 50 YEARS

ГАРТФЕЛЬДЕР В.А.

(Чувашский госуниверситет им. И.Н. Ульянова)

GARTFELDER V.A.

(Chuvash State University named after I.N. Ulyanov)

Аннотация: Приведена историческая ретроспектива становления и развития машиностроительного факультета Чувашского госуниверситета имени И.Н. Ульянова, показаны основные достижения в различных областях жизни учебного заведения, научный потенциал и новые формы организации подготовки специалистов современного уровня.

Abstract: : *The historical retrospective of the formation and development of the machine-building faculty of the Chuvash State University named after I.N. Ulyanov, shows the main achievements in various areas of the life of the school, scientific potential and new forms of organization of training of modern specialists.*

Ключевые слова: *Университет, машиностроение, подготовка специалистов, студент, наука, образование, культура.*

Keywords: *University, engineering, training, student, science, education, culture.*

В 60-х годах прошлого века бурный рост промышленности Чувашии вывал острую нехватку квалифицированных инженеров машиностроительных специальностей. В сентябре 1968 г. при активной поддержке руководства республики на базе заочного общетехнического факультета университета был образован машиностроительный факультет ЧГУ им. И.Н. Ульянова.

Первым деканом факультета был назначен приехавший с Дальнего Востока опытный металлург-производственник и неутомимый организатор Н.Д. Козлов. Затем из г. Иванова приехал к.т.н., доцент М. Б. Гордон, усилиями которого была открыта выпускающая кафедра «Технология машиностроения». Первые студенты-заочники обучались по специальности 0501 «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты». Факультет в это время состоял из 4-х кафедр – «Технология машиностроения», «Технология металлов», «Сопротивление материалов» и «Начертательная геометрия и черчение». В 1972 г. был проведен первый прием студентов на очную форму обучения. С тех пор машиностроительный факультет подготовил и выпустил более 5500 инженеров-механиков.

В 1978 г. Козлова Н.Д. на посту декана МСФ сменил д.т.н., профессор Н.А. Чайников, проработавший в этой должности до 1981 г. Затем деканом стал к.т.н., доцент Н.Ф. Быков, находившийся в этой должности до 1983 года. С 1984 по 1987 г. деканом МСФ работал д.т.н., профессор И.Н. Романенко.

В 1987 году деканом факультета был назначен к.т.н., профессор Ю.П. Кузнецов, проработавший в этой должности до мая 2012 года. С 2012 г. по настоящее время факультетом руководит к.т.н., профессор В.А. Гартфельдер.

В настоящее время машиностроительный факультет обладает большим научно-педагогическим потенциалом и внушительной, насыщенной современным оборудованием материально-технической базой. Структура факультета представлена 4-мя кафедрами: «Технология машиностроения» (зав. кафедрой д.т.н., профессор Д.В. Лобанов), «Материаловедение и металлургические процессы» (зав. кафедрой д.т.н., профессор И.Е. Илларионов), «Прикладная механика и графика» (зав. кафедрой д.т.н., доцент С.А. Васильев) и «Колесные и гусеничные машины» (зав. кафедрой д.т.н., профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана Г.О. Котиев). Сегодня на факультете занятия ведут 10 профессоров, 9 доцентов, 10 старших преподавателей и 3 ассистента.

Подготовка бакалавров на машиностроительном факультете ведётся по направлениям: 15.03.01 «Машиностроение» с профилями «Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств» и «Машины и технологии литейного производства»; 15.03.02 «Технологические машины и оборудование»; 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств»; 23.03.02 «Наземные транспортно-технологические комплексы» и по направлению подготовки. Магистры готовятся по направлению 15.04.04 «Автоматизация технологических процессов и производств». К сожалению, завершено обучение бакалавров и магистров по направлению «Стандартизация и метрология».

Ведётся подготовка аспирантов по специальности «Литейное производство черных и цветных металлов», подана заявка на открытие аспирантуры по направлению подготовки «Машиностроение».

В настоящее время на факультете обучается 250 студентов на очном отделении, и более 300 студентов (включая Алатырский филиал) на заочном отделении. К сожалению, мы постоянно находимся в режиме сокращения. Так с 2011 по 2018 г. бюджетный приём сократился почти в 2,5 раза, а в следующем году вновь запланировано почти 30% сокращение.

Это противоречит ежегодно возрастающим потребностям экономики Чувашии, руководители промышленных предприятий которых ежегодно обращаются с просьбой о направлении к ним выпускников факультета – конструкторов и технологов по механообработке, литейщиков, метрологов, специалистов в области стандартизации, компьютерного проектирования и управления производственными процессами [1]. На нашем факультете доска объявлений буквально увешана предложениями от заводов и учреждений, спрос на выпускников факультета высокий, проблем с трудоустройством нет, отзывы о наших питомцах самые положительные.

В последние годы происходит достаточно весомое материальное обновление научно-исследовательской базы, закуплено современное научно-исследовательское оборудование. Ежегодно проводятся региональные и международные научно-практические конференции с выпуском сборника (РИНЦ), значительно выросло количество и значимость научных публикаций

(в т.ч. индексируемых в базах WOS и Scopus), объём привлеченных средств в 2017 г. вырос до 8,5 млн. руб.

Научный потенциал машиностроительного факультета состоит из 9-ти докторов наук и 9-ти кандидатов наук. Ученые и практики факультета пользуются заслуженным авторитетом у специалистов промышленных предприятий Чувашской Республики и за её пределами [2, 3]. Совместно с предприятиями-партнёрами создан целый комплекс научно-образовательных лабораторий: Центр «Гидравлика», «Центр молодежного инновационного творчества», «Инжиниринговый центр тракторного и сельхозмашиностроения», «Лаборатория перспективных методов сварки», «Отраслевая научно-исследовательская лаборатория композиционных материалов», «Лаборатория мехатроники», «Лаборатория 3D моделирования», «Лаборатория робототехники», учебные лаборатории литейных технологий, инструментов, станков, контрольно-измерительных средств и другие. На территории факультета размещен Центр прототипирования ЧР и ряд приборов и установок Центра коллективного пользования ЧР, проводятся олимпиады «Надежда машиностроения Чувашии», региональные «Робофест» и WorldSkills с участием студентов и школьников.

Общественная, спортивная и творческая жизнь факультета многогранна, кипит и бьёт ключом. Наши студенты и сотрудники традиционно сильно выступают в различных спортивных соревнованиях, конкурсах и выставках. На выступления команды машиностроительного факультета в рамках «Студенческой весны» приходит множество любителей театрального, танцевального и вокального искусства, юмора и костюмов, атмосферы творчества и фантазии. Это нынешние студенты и выпускники разных лет, молодые и убеленные сединами. Наша команда всегда оригинальна, узнаваема, горячо поддерживается зрителями и в 2018 году заняла 2-е место в университете. Ежегодно проводится спартакиада МСФ по 4 видам спорта (волейбол, футбол, настольный теннис и шахматы) с участием команд всех курсов и команды преподавателей и сотрудников. Многие студенты работают летом в строительных отрядах.

Своеобразной «визитной карточкой» машиностроительного факультета стало участие в «олимпиадном движении» и создание кружков для школьников. Сейчас на факультете работают 2 кружка робототехники для школьников, 2 кружка технического творчества для студентов (литейщиков и сварщиков) и секция «Механика машин» для подготовки олимпиадных команд. В рамках профориентационной работы мы принимаем много экскурсий школьников, студентов ССУЗов и даже детских садов. в 2017 г. у нас побывали более 250 школьников с 7 по 11 классы, с ними мы провели квесты и экскурсии по факультету. В ЦМИТе проводится подготовка команд школьников к соревнованиям системы JuniorSkills по направлению «Мобильная робототехника» [4].

Благодаря такой подготовке наши студенты участвуют в различных по сложности и статусу конференциях, олимпиадах показывают высокие результаты. Так, олимпийская команда по «Теории механизмов и машин» у же

22 года участвует в соревнованиях российского и международного уровня и часто является победителем или призёром. В 2011 г. команда стала победителями I-ой Международной олимпиады, в 2014 г. она участвовала в Международной олимпиаде в Шанхае (КНР), а в 2016 г. в такой же олимпиаде в Мадриде (Испания). Олимпийская команда по мобильной робототехнике постоянно участвует во Всероссийских соревнованиях в г. Иннополис (Республика Татарстан), 2016 г. участвовала во Всемирной олимпиаде по робототехнике в Нью-Дели (Индия) и заняла 6 место, уступив только командам Юго-Восточной Азии.

Факультет имеет договорные связи с большим количеством промышленных предприятий и учебных заведений в Чувашии и за её пределами. Среди промышленных предприятий это почти все предприятия и заводы машиностроительного и электротехнического кластеров. Студенты МСФ посещают эти предприятия с экскурсиями, проходя там практики, работают на инженерных должностях в режиме неполного рабочего дня. Выпускников МСФ охотно приглашают на работу в эти предприятия. Например, в ЗАО «Сеспель» инженерный корпус на 65-70 % состоит из выпускников факультета, а директор фирмы Бакшаев В.А. несколько лет являлся председателем ГАК. Совместно с ЗАО «Сеспель» на факультете создан центр «Сварка», на базе модернизированного станка спроектирована и изготовлена опытно-промышленная установка сварки трением с перемешиванием, специалисты ФЭЭ ЧГУ разработали к ней систему программного управления, ведутся научные и поисковые разработки. Этими разработками всерьез заинтересовалась Ассоциация Алюминия России. В 2017 и в 2018 году в Чувашии (в том числе на базе МСФ) была проведена Всероссийская конференция по этой тематике и создан Российский Центр компетенций в области переработки и применения алюминия. Факультет имеет тесные связи с предприятиями концерна «Тракторные заводы». Совместно с компанией «МИКОНТ» и фирмой «БОШ» был создан Центр «Гидравлика». Совместно с концерном, правительством Чувашии и «МГТУ им. Баумана» на машиностроительном факультете открыта базовая кафедра «Колёсные и гусеничные машины» и уже проведен первый набор студентов на заочное коммерческое обучение.

В ближайшие годы запланирован ряд новых задач, выполнение которых приведет к синергетическому эффекту, даст новый импульс к модернизации системы подготовки инженерных кадров, выведет факультет на траекторию современного (а ещё лучше - опережающего) развития.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гартфельдер В.А. Интеграция потенциалов промышленных предприятий и учреждений образования на примере машиностроительного факультета Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова. Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2011. № 1. С. 194-196.
2. Гартфельдер В.А., Секлетина Л.С. Интеграция региональных потенциалов для подготовки инженерных кадров. В сборнике Сетевое взаимодействие как эффективная технология

подготовки кадров: материалы Всероссийской (с международным участием) научно-методической конференции. Поволжский государственный технологический университет. 2015. С. 31-34.

3. Александров А.Ю., Гартфельдер В.А., Ковалев В.Г., Судленков А.А., Интегрированные структуры подготовки инженерно-технических кадров для инновационных секторов региональной экономики. Высшее образование в России. 2014. № 11. С. 81-90.

4. Полвека на ниве образования: К 50-летию ЧГУ имени И.Н. Ульянова. – Чебоксары: Чуваш. кн. изд-во, 2017.- 374 с.

АВТОР

Гартфельдер Виктор Адольфович – к.т.н., профессор, декан машиностроительного факультета ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова», г. Чебоксары, Россия.

AUTHOR

Victor Adolfovich Gartfelder - Ph.D., Professor, Dean of the Faculty of Mechanical Engineering, Chuvash State University named after Sh. I.N. Ulyanova ”, Cheboksary, Russia.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ МОДЕЛИ ПРЕСС-ФОРМЫ ДЛЯ ЛИТЬЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ ДЕТАЛЕЙ ИЗ АЛЮМИНИЯ

DESIGNING OF THE PRESS FORM MODEL FOR DIE-CASTING OF ALUMINUM PARTS

СЕМЕНОВА Ю.С., ИВАНКОВА Е.Е.
(НГТУ, Новосибирск, Россия)

SEMENOVA Y.S., IVANKOVA E.E.
(NSTU, Novosibirsk, Russia)

Аннотация. Рассмотрены примеры дефектов в отливках литья под давлением. Проведен анализ дефектов алюминиевой отливки «Крышка». Предложены пути их устранения, за счет усовершенствования конструкции пресс-формы. С помощью 3D моделирования показаны дополнительные элементы, позволяющие исключить брак.

Annotation. Examples of defects of die-casting are considered. The analysis of defects of aluminum casting "Lid" is carried out. The ways of their elimination are proposed due to the improvement of the design of the press form. The additional elements that allow us to eliminate defects are shown by the 3D modeling.

Ключевые слова: литье под давлением, пресс-форма, литье алюминия, дефекты литья, 3D моделирование.

Keywords: die-casting, press-form, aluminum casting, casting defects, 3D modeling.

При литье под давлением расплавленный металл заливается в камеру машины, соединенную литниковыми каналами с замкнутой полостью разъемной металлической формы. Под действием поршня металл перегоняют из камеры в полость формы, заполняя ее; он затвердевает и образует отливку. При раскрытии формы отливку удаляют. Литье под давлением обладает рядом преимуществ, по сравнению с более простыми методами литья. К плюсам литья под давлением можно отнести: толщину стенки отливки до 0,8 мм, минимизацию последующей механической обработки детали и высокое качество поверхности отливки[1].

Несмотря на все преимущества литья под давлением, оно не позволяет избежать дефектов при изготовлении отливок. Чаще всего брак связан с неправильно подобранными режимами заливки расплава в форму, а также с недоработками конструкции литейной пресс-формы. В некоторых случаях после того, как отливка извлечена из машины, она признается годной, так как нет видимых дефектов. Но после механической обработки вскрываются внутренние дефекты: раковины, поры. На рисунке 1 представлены примеры дефектов литья под

давлением: а) раковина - открытые или закрытые пустоты в теле отливки, б) газовая пористость - мелкие поры, образовавшиеся в отливке в результате выделения газов из металла при его затвердевании, в) «мороз» - узорчатая поверхность отливки, образовавшаяся при несоблюдении температурных режимов.

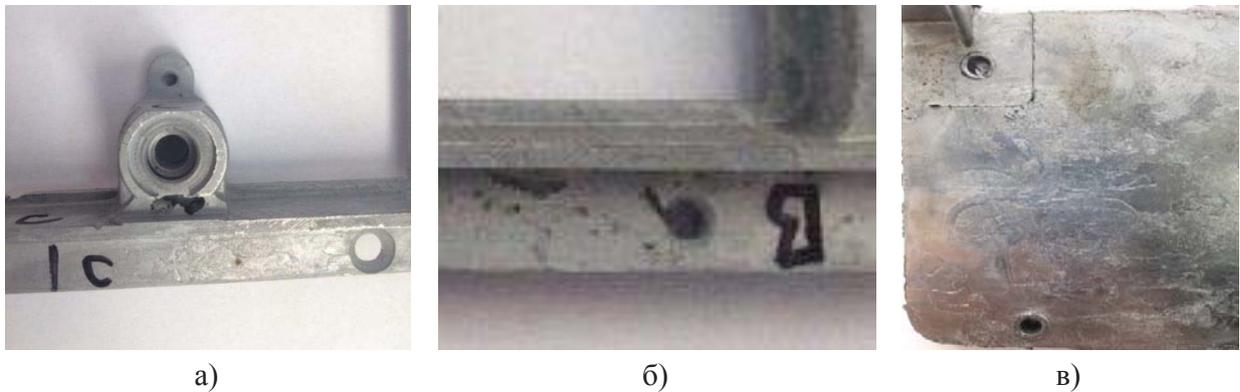


Рисунок 1. Дефекты литья под давлением
а – раковина; б – газовая пористость; в – «мороз»

В данной работе рассмотрено усовершенствование модели пресс-формы, предназначенной для литья детали «Крышка», представленной на рисунке 2. Материал - отливки сплав АЛ2 по ГОСТ 2685-75, габаритные размеры отливки 65x81x23,5. Отливка выполняется на машине литья под давлением 711А07.

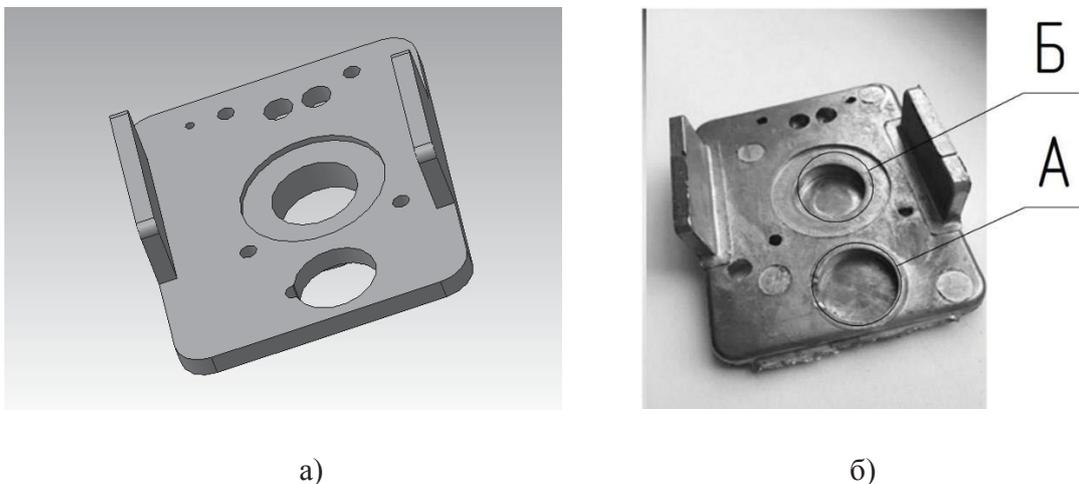


Рисунок 2. Отливка «Крышка» а) 3D модель; б) реальная отливка

Сравнивая 3D модель отливки и реальную отливку можно увидеть, что в оба отверстия залился лишний металл – облой. Для литья это характерно, так как между деталями формы есть небольшие зазоры, в которые проникает металл. В отверстии «А» облой составляет не более 0,03 - 0,05 мм, его можно легко удалить при последующей слесарной обработке. Это не является дефектом. Но в отверстии «Б» он намного толще, его толщина составляет до 0,5 мм, вследствие чего необходимо применять специальное оборудование для того чтобы сделать отверстие сквозным.

Кроме того, после фрезеровки окон в стенках отливки (рис 3) в 30% от партии вскрываются раковины, которые приходится заваривать.

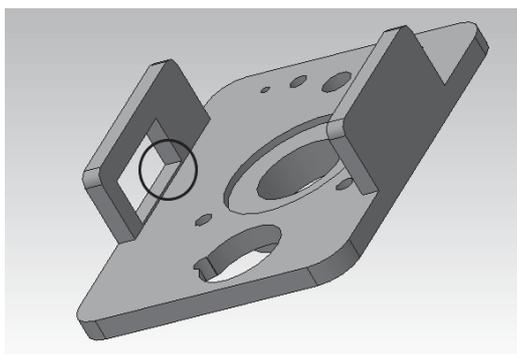


Рисунок 3. Область, скопления газовых раковин, вскрывающихся при механической обработке.

Данный дефект мог возникнуть из-за недостаточного выхода газов из полости формы при литье под давлением [2,3]. В связи с этим было принято решение ввести дополнительные воздухоотводы в матрице формы, которые облегчат выход газов из формы. На рисунке 4 представлена деталь «матрица подвижная», на рисунке 4а изображена модель исходной формы с 8 воздухоотводами, на рис 4бв модель добавили 2 дополнительных воздухоотвода. Глубина воздухоотводов составляет 0,08 мм. Такой глубины достаточно для полноценного выхода газов и не позволяет алюминию затекать в отверстия. Это позволяет в дальнейшем минимизировать брак в отливках.

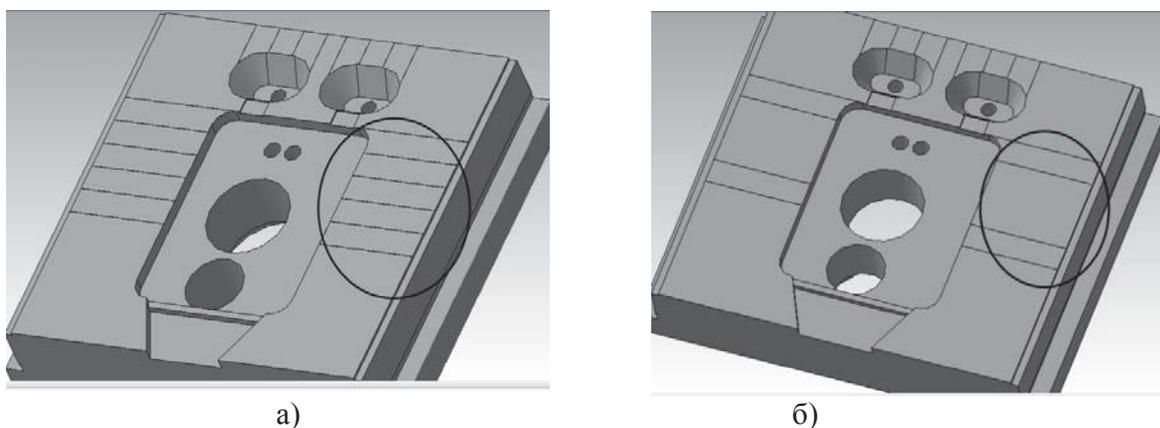


Рисунок 4. Деталь пресс-формы «Матрица подвижная»
с а) с 8-ю воздухоотводами и б) с дополнительными воздухоотводами.

Кроме того при проектировании новой формы следует учесть, что в пуансоне, предназначенном для формирования отверстия Б (рис. 2.б) необходимо компенсировать длину соответствующего элемента на 0,5 мм. Это позволит исключить скопление излишков металла в отверстии и устранить необходимость последующей операции по их удалению.

Следующим этапом работы планируется проведение моделирования процесса заливки металла во вновь спроектированную матрицу с целью получения сравнительных характеристик с исходным вариантом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белопухов А.К. Литье под давлением/ А.К. Белопухов, Л.И. Винберг, А.А. Дудин, М.Л. Заславский, П.П. Москвин// - Москва: государственное научно-техническое изд-во машиностроительной литературы,1962. –399с.
2. Анализ дефектов при изготовлении сложнопрофильных отливок/ Ю.С. Семенова, Е.Е. Иванкова// Наука. Технологии. Инновации //Сборник научных трудов в 10 ч. / под ред. асс. С.И. Василевской. – Новосибирск: Изд – во НГТУ, 2017. – Часть 3. С.309-311.
3. Анализ проблем внедрения технологии литья по газифицируемым моделям на предприятии ОАО «МАШЗАВОД ТРУД» / Ю. С. Семенова, А. М. Мартыненко // Ползуновский альманах. 2012. № 1. С. 162-164

АВТОРЫ

Иванкова Екатерина Евгеньевна, 630073, пр-т К.Маркса,20, Новосибирский государственный технический университет(НГТУ), магистрант, (383) 346-11-88 katya.ivankova.1995@mail.ru.

Семенова Юлия Станиславовна, 630073, пр-т К.Маркса, 20 Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), к.т.н., доцент, доцент кафедры технологии машиностроения, (383) 346-11-88, yu.semenova@corp.nstu.ru

AUTHORS

Ivankova Ekaterina Evgen'yevna, 630073, 20, Prospekt K. Marksa, Novosibirsk State Technical University, master student, NSTU,(383) 346-11-88 katya.ivankova.1995@mail.ru.

SemenovaYulia Stanislavovna, 630073, 20, Prospekt K. Marksa, Novosibirsk State Technical University, assistant professor, Mechanical engineering department, (383) 346-11-88, yu.semenova@corp.nstu.ru

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА АЛЮМИНИЕВЫХ ПРОТЕКТОРНЫХ СПЛАВОВ В ЛИТОМ И ТЕРМООБРАБОТАННОМ СОСТОЯНИЯХ

STRUCTURE AND PROPERTIES OF ALUMINIUM SACRIFICIAL ALLOYS IN CAST AND HEAT TREATED CONDITIONS

КЕЧИН В.А., КИРЕЕВ А.В.

*(Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых,
г. Владимир, Российская Федерация)*

KECHIN V.A., KIREEV A.V.

*(Vladimir State University named after A. G. and NG Stoletov,
Vladimir, Russian Federation)*

Аннотация. Показано влияние структуры на электрохимические свойства алюминиевых протекторных сплавов в литом и термообработанном состояниях. Установлена возможность стабилизации коэффициента полезного использования (КПИ) протекторов из алюминиевых сплавов в термообработанном состоянии.

Abstract. The effect of the structure on the electrochemical properties of aluminum sacrificial alloys in cast and heat-treated conditions is shown. The possibility of stabilizing the coefficient of useful use (KPI) of anode protectors made of aluminum alloys in the heat-treated state is established.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, структура, термообработка, электрохимические свойства.

Keywords: aluminum sacrificial alloys, structure, heat-treated, electrochemical properties.

Одной из основных причин возникновения электрохимической гетерогенности в системе металл – электролит, определяющей протекторные свойства сплавов, являются внутренние факторы, связанные с природой металла, его составом, структурой и др. В связи с этим, исходя из первоначального опыта производства и эксплуатации литых протекторов, основное внимание при разработке промышленной технологии их изготовления было направлено на обеспечение не только заданного химического состава сплава, но и химической и структурной однородности металла.

Любые отклонения технологических параметров в процессе плавки и литья, встречающиеся в различных сочетаниях в условиях производства, оказывают влияние как на изменение состава сплава, так и на степень развития химической и структурной однородности литых протекторов. Видимо, этим можно объяснить дестабилизацию и снижение электрохимических свойств

протекторов, встречающиеся на ранних стадиях применения протекторной защиты, а также противоречивые данные об эффективности работы отдельных протекторов из одной марки сплава и даже одной плавки [1, 2]. Другими словами, степень электрохимической гетерогенности протекторов, зависящая от химического состава и структуры литого металла, изменяется в процессе плавки и литья в результате первичных (изменение химического состава сплава) и вторичных (изменение технологических параметров при плавке и литье) металлургическо-литейных факторов.

В связи с тем, что химическая и структурная однородность литых протекторов служит одним из основных требований к протекторным материалам, любые термические воздействия на литые сплавы, устраняющие или понижающие эту неоднородность, представляют значительный интерес. Однако внимание к этому важному резерву повышения эффективности литых протекторных материалов крайне ограничено. Относительно алюминия в работе [2] показано влияние термообработки на анодное поведение алюминиевых протекторных сплавов. Причем приводятся данные о влиянии отжига на протекторные свойства прессованных прутков. Ниже представлены данные экспериментальных исследований по влиянию термической обработки на структуру и основные протекторные свойства сплава АП1 (табл.1).

Таблица 1 - Химический состав алюминиевых протекторных сплавов (ГОСТ 26251-84)

Марка сплава	Массовая доля основных компонентов, %			Массовая доля примесей, %		
	Алюминий	Цинк	Марганец	Железо	Медь	Кремний
АП1	остальное	4,0-6,0	0,02-0,5	≤ 0,10	≤ 0,01	≤ 0,10

Влияние термической обработки изучали на образцах диаметром 20 и длиной 100 мм. Образцы отливали в металлическую и шамотную формы, предварительно прогретые до 150°C. В каждом опыте отливали по 6 параллельных образцов. Термическую обработку образцов проводили в муфельной печи с автоматическим регулированием температуры. Алюминиевые образцы закладывали в кварцевый песок, прогретый с печью до заданной температуры выдержки. Методика металлографических и электрохимических испытаний образцов изложена в работах [2-3].

В неравновесных условиях кристаллизации алюминиево-цинковых сплавов возможно образование наряду с α -фазой и β -фазы. Литые сплавы с содержанием до 2 % Zn однофазны и имеют крупнозернистую структуру; при содержании 4-6 % Zn (сплав АП1) в структуре появляется в незначительном количестве вторая фаза. Установлено, что повышение содержания цинка в алюминии увеличивает степень гетерогенности литой структуры, вследствие чего коэффициент полезного использования (КПИ) снижается на 3-5 %. Применение отжига при изготовлении образцов горячим прессованием позволило несколько повысить КПИ сплава в сравнении с литыми образцами. Это объясняется тем, что отжиг полностью обеспечил однофазную структуру

сплава. Ниже представлены экспериментальные данные по влиянию различных режимов отжига (Т2) и закалки (Т4) (табл. 2) на структуру и протекторные свойства сплава АП1 (Al + 5.3% Zn).

Таблица 2 - Режимы термической обработки сплава АП1.

Вид термообработки	Температура нагрева, °С	Охлаждающая среда
Т2	80 ± 5	воздух
Т2	300 ± 5	воздух
Т4	450 ± 5	вода
Т4	560 ± 5	вода

Выдержка образцов при повышенной температуре в течение 1-8 ч. с последующим охлаждением на воздухе или в воде приводит к незначительному изменению характера микроструктуры (рис. 1). В отличие от образцов в литом состоянии, имеющих крупнозернистую гетерогенную структуру (по границам α -раствора располагается фаза $\alpha+\beta$), образцы в термообработанном состоянии имеют преимущественно гомогенную структуру. Причем, во всех случаях в зависимости от условий обработки образцов наследственный характер структуры сохраняется. При изменении в характере микроструктуры в результате термических воздействий на сплав АП1 значения КПИ возрастают на 8...10 % при меньшем разбросе в сравнении с литым состоянием (рис. 2). Стационарный потенциал и потенциал при поляризации сплавов в литом и термообработанном состоянии имел близкие значения ($-\varphi_C = 760 - 810$ мВ, $-\varphi_{II} = 690 - 720$ мВ).

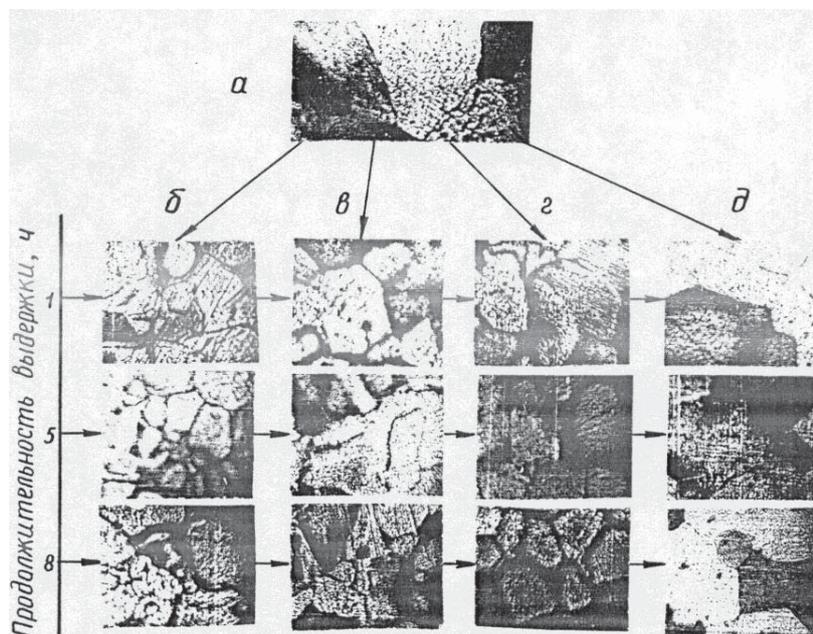


Рис. 1. Микроструктура сплава АП1 в зависимости от режима термической обработки ($\times 150$). Состояние сплава: литое (а); термообработанное выдержкой в течение 1-8 ч. при 80 (б) и 300°С (в) с охлаждением на воздухе; при 450 (г) и 560°С (д) с закалкой в воде

Термическая обработка сплава АП1 приводит только к стабилизации КПИ при практической неизменности потенциалов.

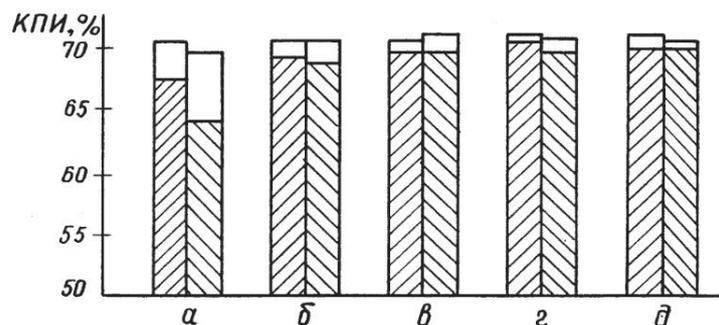


Рис. 2. Изменение КПИ сплава АП1 в морской воде в зависимости от режима термической обработки. Состояние сплава: литое в металлическую  и шамотную  формы (а); термообработанное выдержкой в течение 1-8 ч. при 80 (б) и 300 °С (в) с охлаждением на воздухе; при 450 (г) и 560 °С (д) с закалкой в воде

Стационарный потенциал и потенциал при поляризации термообработанных образцов практически остается на уровне значений, отвечающих литому состоянию сплавов. Целесообразность проведения термической обработки сплавов при изготовлении протекторов следует рассматривать с учетом полученных результатов, а также условий их эксплуатации.

ВЫВОД

Для устранения или понижения химической и структурной неоднородности литых протекторов выявлена принципиальная возможность применения различных режимов термической обработки. Установлено, что термическая обработка протекторных сплавов, существенно изменяя характер микроструктуры, способствует незначительному повышению и стабилизации КПИ сплавов при практической неизменности потенциалов. Малоразличимые значения КПИ при анодном растворении сплава АП1 с различной по характеру микроструктурой объясняются тем, что возможное повышение КПИ за счет образования однофазной гомогенной структуры подавляется резким ее огрублением.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кечин В.А., Люблинский Е.Я. Цинковые сплавы. – М.: Металлургия, 1986. – 246 с.
2. Кечин В.А. Теория и технология литых протекторных материалов. Монография. Владимир: Редакционно-издательский комплекс ВлГУ, 2004. – 184 с. – ISBN 5-89368-537-7.
3. Мальцев М.В. Металлография промышленных цветных металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1970. – 364 с.

АВТОРЫ

Кечин Владимир Андреевич, д.т.н. профессор, зав. кафедрой «Технологии функциональных и конструкционных материалов» ВлГУ; почтовый адрес: 600000, РФ, г. Владимир, ул. Горького, 87, ВлГУ, каф. ТФиКМ, тел.: (4922) 477582, e-mail: kechin@vlsu.ru
Киреев Андрей Викторович, инженер-исследователь каф. ТФиКМ ВлГУ; почтовый адрес: 600000, РФ, г. Владимир, ул. Горького, 87, ВлГУ, каф. ТФиКМ, тел.: (919) 0025527, e-mail: ariant-tp@mail.ru

AUTHORS

Kechin Vladimir Andreevich, doctor, professor, 600000, Russia, Vladimir, Gorkiy Str., 87, VISU, dep. TFiKM. тел.: (4922) 477582, e-mail: kechin@vlsu.ru
Kireev Andrei Viktorovich, research engineer, 600000, Russia, Vladimir, Gorkiy Str., 87, VISU, dep. TFiKM, e-mail: ariant-tp@mail.ru

**ОСОБЕННОСТИ КИНЕТИКИ ПРОЦЕССА ИНФИЛЬТРАЦИИ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА С
ВЫСОКОДИСПЕРСНОЙ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРОЙ**

**FEATURES OF KINETICS OF PROCESS OF INFILTRATION OF
COMPOSITE MATERIALS ON THE BASIS OF IRON WITH HIGH-DISPERSE
POROUS STRUCTURE**

ДОВЫДЕНКОВ В.А., КОБЫЛИНА Е.В.

*(ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет»,
г. Йошкар-Ола, Российская Федерация)*

DOVYDENKOV V.A., KOBYLINA E.V.

*(FGBOU VO "The Volga region state technological university", Yoshkar-Ola,
Russian Federation)*

Аннотация. Исследован и количественно определен тепловой эффект реакции при инфильтрации латунию порошковых материалов на основе железа, изготовленных путем формования и спекания композиций из порошков железа, его оксидов и термореактивного связующего на основе резольной смолы. Установлены возможности применения указанного эффекта при разработке составов и режимов обработки порошковых композиций в производственных условиях.

Annotation. The thermal effect of the reaction was investigated and quantified in the case of brass infiltration of iron-based powder materials made by molding and sintering compositions of iron powders, oxides thereof and a thermosetting resin based resole. The possibilities of applying this effect in the development of compositions and regimes for processing powder compositions in production conditions have been established.

Ключевые слова: Инфильтрация, гетерогенная структура, тепловой эффект реакции.

Keywords: Infiltration, heterogeneous structure, thermal reaction effect.

Изучались особенности инфильтрации материалов на основе железа с гетерогенной структурой, получаемых пресс-литьем композиций, состоящих из порошков железа, оксида железа и связующего, и их последующим восстановлением, спеканием и инфильтрацией. Установлено, что для таких материалов имеет место увеличение скорости проникновения инфильтрата в 2-2,5 раза по сравнению с материалами, полученными прессованием и спеканием порошков средней дисперсности с размерами частиц порядка 100 мкм. Показано, что увеличение скорости инфильтрации может быть обусловлено увеличением температуры инфильтрата за счет поверхностной энергии высокодисперсного железа, полученного при восстановлении оксида.

В работах [1-4] показано, что технология получения заготовок путем литьевого формования композиций из порошков железа, оксидов железа и полимерного связующего с последующим разложением связующего и инфильтрацией имеет ряд преимуществ, которые не могут быть реализованы с применением традиционных процессов. Одно из таких преимуществ - это возможность получения деталей сложной формы, недостижимой традиционными методами, с высоким уровнем механических свойств (до $\sigma_B = 700$ Мпа и $\delta = 10\%$). Особенностью данной технологии также является формирование высокодисперсной гетерогенной структуры материала до инфильтрации, что способствует ускорению процесса и снижению себестоимости готового изделия, отсутствуют разъедания поверхности изделий. Вместе с тем механизм повышения скорости инфильтрации до конца не ясен. В настоящей работе рассмотрены некоторые аспекты влияния дисперсности материала инфильтруемых заготовок на процесс инфильтрации. Заготовки для инфильтрации изготавливали по технологии, описанной в работе [5].

Для получения заготовок, состоящих из порошков металлов, их соединений и связующего особые требования предъявляются к реологическим свойствам данных композиций, особенно к показателям текучести. Основное требование - смесь должна иметь достаточно низкую вязкость, которая характеризует силы внутреннего трения и представляет собой меру способности связующего оказывать сопротивление его движению под действием внешних сил, что обеспечивает равномерное заполнение полости пресс-формы и исключает возникновение пустот [6-12].

Эксперименты по формованию заготовок, их термической обработке и инфильтрации проводились с применением исходных материалов, свойства которых приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Характеристики твердых компонентов

Вид материала	Марка	Плотность материала частиц, г/см ³	Гранулометрический состав, мкм	
Порошок железный	A100S	7,80	менее 50	36,25 %
			63-50	7,11 %
			80-63	15,13 %
			100-80	12,25 %
			125-100	15,96 %
			160-125	5,42 %
			250-160	7,61 %
Порошок железа (II, III) окись	Electr Oxide 20	5,35	средний размер частиц 5,25 мкм	

В качестве связующего использовалась фенолформальдегидная смола (ФФС) марки СФЖ-301.

Смола является одновременно источником углерода, получаемого в результате термодеструкции связующего, необходимого для процессов внутреннего восстановления оксидов.

Композиция смешивалась в смесителях с Z-образными лопастями, подвергалась валкованию, сушке и дроблению. Образцы изготавливались пресс-литьём на гидравлическом прессе и подвергались двухстадийной термической обработке для пиролиза смолы и восстановления оксида. Далее образцы подвергались инфильтрации латуной марки Л63 при температуре 950°C в проходной печи в среде эндогаза.

На рисунке 1 приведены фотографии микроструктуры образцов до и после инфильтрации.

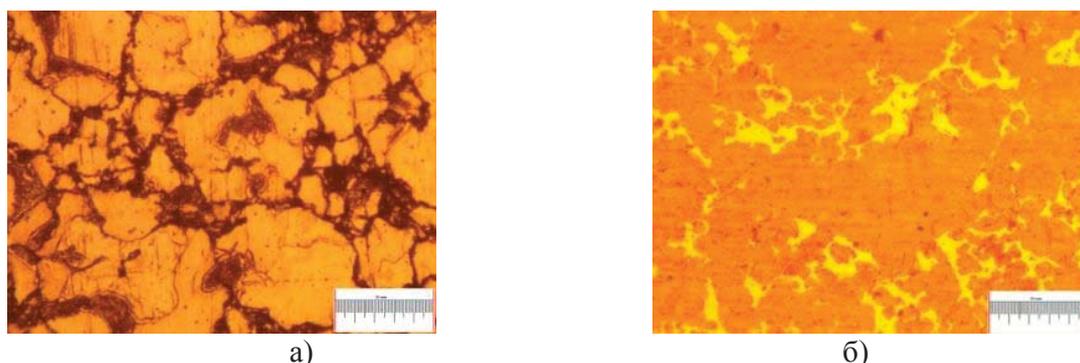


Рисунок 1 - Структуры образцов до (а) и после (б) инфильтрации x200

Структура заготовок (рисунок 1, а) состоит из зерен феррита размерами 30-150 мкм с небольшими включениями перлита (около 10%), вокруг которых распределены участки с мелкозернистой и высокопористой структурой, состоящие примерно на 80 % из феррита и на 20 % из перлита с размером зерен 1-8 мкм. Мелкозернистые участки феррито-перлитной структуры представляют собой восстановленное продуктами пиролиза фенолформальдегидной смолы железо. Размер пор этой фазы составляет от 0,2 до 3 мкм.

Микроструктура образцов после инфильтрации (рисунок 1, б) представляет собой крупные участки легированного и пересыщенного по границам феррита размером 30-150 мкм, пространство вокруг которых заполнено фазой на основе меди и участками легированного феррита размером 1-8 мкм (выделившееся из пересыщенного раствора железа).

Сравнительные эксперименты по инфильтрации образцов, полученных традиционными методами прессования-спекания из железного порошка АНС.100 и образцов из разработанного композиционного материала с добавления оксида железа показали, что присутствие в структуре сферических частиц железа и их агломератов присуще только материалам, которые содержат восстановленное железо.

Кинетику процесса инфильтрации обычно описывают уравнением Уошберна [13-14], которое справедливо для материалов, имеющих поры постоянного диаметра порядка 10 мкм и более. Согласно данному уравнению был проведен расчет зависимости глубины проникновения инфильтрата от времени выдержки для материалов аналогичных разработанному материалу с диаметром пор 0,2 мкм и для материалов, изготовленных по традиционным технологиям порошковой металлургии с диаметром пор 20 мкм (рисунок 2).

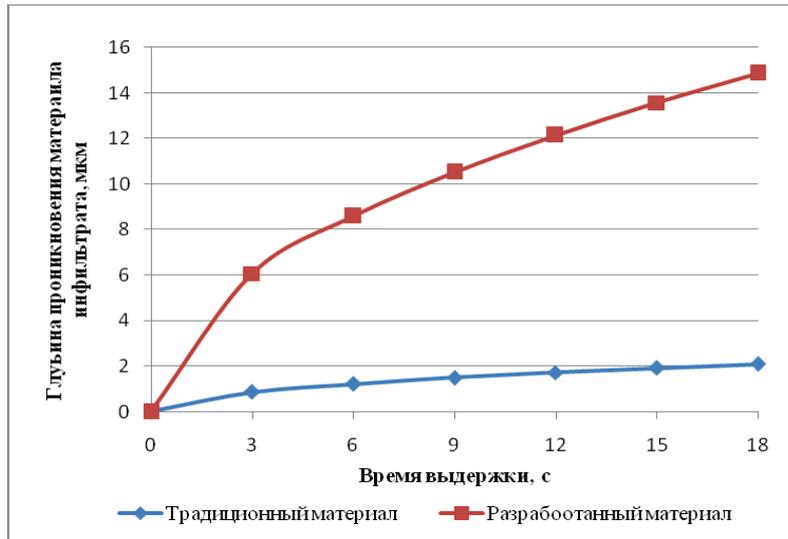


Рисунок 2 - Расчетные кривые глубины проникновения от времени выдержки для материалов с диаметром пор 0,2 мкм и 10 мкм

Из графиков следует, что скорость процесса инфильтрации разработанного композиционного материала выше, чем у традиционных материалов 2-2,5 раза.

В процессе инфильтрации на поверхности реагирующих компонентов происходит ряд химических реакций, приводящих к фазовому равновесию с новым энергетическим балансом:

$$E_1 + E_2 = E_3 + E_4 + E_T; \quad (1)$$

где E_1 – энергия поверхности высокодисперсного железа; E_2 – энергия поверхности железа средней дисперсности; E_3 – энергия межфазной границы «кристаллизованное железо – латунь»; E_4 – энергия межфазной границы «железо средней дисперсности - латунь»; E_T – тепловой эффект реакции, Дж.

Расчеты показали, что $E_1 \gg E_2 + E_3 + E_4$ и тепловой эффект реакции приблизительно равен E_1 . Далее можно рассчитать температурный эффект реакции, как величину:

$$\Delta T = \frac{E_1}{c}; \quad (2)$$

где c – теплоемкость латуни.

Во время инфильтрации и растворения высокодисперсного железа тепловая энергия равная E_1 нагревает высокодисперсное железо и латунь, в результате чего температура этих фаз повышается. Оценим величину повышения температуры. Согласно экспериментальных данных процесс растворения высокодисперсного железа протекает за несколько секунд. Можно предположить, что основная часть выделяющейся тепловой энергии будет расходоваться на повышение температуры сплава на основе латуни. Процессы, происходящие внутри реагирующих компонентов, и повышение температуры железа средней дисперсности за счет теплопередачи на данном этапе не учитываем. При инфильтрации выделяется энергия:

$$E_T = S \cdot E_1, \quad (3)$$

где S – площадь поверхности высокодисперсного железа, m^2 .

Очевидно, что количество тепловой энергии, выделяющейся при инфильтрации, будет пропорционально удельной поверхности восстановленного железа. Удельная поверхность зависит от размеров частиц восстановленного железа, чем меньше размеры, тем больше выделяется тепловой энергии. Как показано в работах Косторнова А.Г. [15] увеличение температуры может достичь температуры плавления твердой фазы. Выполненные нами расчетные оценки локального повышения температуры медной фазы показали, что повышение температуры может составлять $600\div 700^{\circ}\text{C}$ при размерах частиц восстановленного железа 10^{-3} мм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Довыденков, В. А. Эволюция структуры и механических свойств псевдосплава, полученного из композиций на основе порошков железа, его оксидов и связующего после инфильтрации / В. А. Довыденков, О.С. Зверева, Е.В. Соловьева, Р.С. Сальманов // Вестник Казанского технологического университета. - 2015. - №1. - С. 138-141. (0,25/0,15)
2. Довыденков В.А. Особенности инфильтрации латунию пористых заготовок на основе железа с гетерогенной полидисперсной структурой. / В.А. Довыденков, Е.В. Соловьева, Г.П. Фетисов // Технология металлов. - 2016. - №6. - С.9-15. (0,44/0,30)
3. Дьячкова Л.Н., Витязь П.А., Воронежская Л.Я. Псевдосплавы сталь-медный сплава антифрикционного назначения // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка. Материалы докладов 10-й международной науч.-техн. конф. Минск, 12-14 сентября 2012 г., Минск, 2012 – с.52-54.
4. Звонарев Е.В. Инфильтрованные материалы и их применение / Е.В. Звонарев, Л.Н. Дьячкова, В.М. Шенкина, Г.А. Миронович // Порошковая металлургия. Минск, 2004, № 27, с. 95-99.
5. Довыденков В.А., Зверева О.С. Технология изготовления деталей сложной формы путем формования и спекания композиций из порошков железа, его оксидов и связующего / В.А. Довыденков, О.С. Зверева // Порошковая металлургия, 2013, № 9/10 с. 137-143.
6. L.N. Dyachkova. Effect of Steel Skeleton composition on the triboengineering properties of steel copper pseudo alloys produced by infiltration / L.N. Dyachkova, L.F. Kerzentseva, P.A. Vityaz //Jornal of Friction and wear. 2010, Vol 31, №4, - p. 270-275.
7. Витязь П. А., Капцевич В. М., Шелег В.К. Пористые порошковые материалы и изделия из них. - Минск. Высшая школа, 1987.-164 с. Францевич И.Н., Бойко Е.Б. Порошковая металлургия, 1964, № 1, с. 44-45.
8. Теодорович О. Х., Францевич И. М. Порошковая металлургия, 1961, № 6, с. 35-43.
9. Суздальев Н.П. Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов. М.: КомКнига, 2006. - 592 с. (Синергетика: от прошлого к будущему).
10. Акименко В.Б., Буланов В.Я., Гуляев И.А., Залазинский Г.Г., Калашникова О.Ю., Щенникова Т.Л., Анциферов В.Н. Состав, структура и свойства железных и легированных порошков. – Екатеринбург: УИФ «Наука», 1996. – 351 с.
11. Дьячкова Л.Н., Воронежская Л.Я. Влияние методов получения композиционных инфильтрованных материалов на основе железа на их свойства // Порошковая металлургия (Минск). 1999. - №22. - С. 97-100.
12. Готтштайн Г. Физико-химические основы материаловедения / Г. Готтштайн пер. с англ. К.Н. Золотовой, Д.О. Чаркина, под ред. В.П. Зломакова. М: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009, 400 с.
13. Тучинский Л.И. Композиционные материалы, получаемые методом пропитки.– М.: Металлургия, 1986, 208 с.
14. Ювелирное и художественное литье по выплавляемым моделям сплавов меди/ Урвачев В.П., Кочетков В.В., Горина Н.Б. - Челябинск: Металлургия Челябинское отделение, 1991. -168 с.

15. Косторнов, А. Г. Материаловедение дисперсных и пористых металлов и сплавов: монография в 2 томах / А. Г. Косторнов. - Киев : Наукова думка, 2002 - 2003. - (Проект "Наукова книга"). - ISBN 966-00-0136-3. Т. 1. - 2002. - 569

АВТОРЫ

Довыденков В.А. – докт. техн. наук, профессор кафедры материаловедения и машиностроения ПГТУ, директор ООО «Наномет» (424008, г. Йошкар-Ола, ул. Панфилова, 41). Тел.: (8362) 41-42-99. E-mail: ya.dovydenkov@yandex.ru.

Кобылина Е.В. - доцент кафедры материаловедения и машиностроения ПГТУ, ведущий инженер ООО «Наномет». Тел.: (8362) 41-42-99. E-mail: 2804106@rambler.ru.

AUTHORS

Dovydenkov V. A. - Dr.Sci.Tech., professor, Department of Materials science and Engineering, Volga State University of Technology, director, LLK «Nanomet», (424008. Russia, Mari El Republic, Yoshkar-Ola, Panfilova st., 41) E-mail: ya.dovydenkov@yandex.ru.

Kobylyina E. V. - associate professor of materials science and mechanical engineering Volga State University of Technology, management engineer, LLK «Nanomet», (424008. Russia, Mari El Republic, Yoshkar-Ola, Panfilova st., 41) E-mail: 2804106@rambler.ru.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИСПЕРСНОГО УПРОЧНЕНИЯ И
ДЕФОРМАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ, ПРОЧНОСТНЫЕ
СВОЙСТВА И ХАРАКТЕР ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ
АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

**INVESTIGATION OF INFLUENCE OF DISPERSION HARDENING AND
TREATMENT BY SEVERE PLASTIC DEFORMATION ON STRUCTURE
AND STRENGTH PROPERTIES OF ALUMINUM ALLOYS**

**КОЗУЛИН А.А., ЖУКОВ И.А., ПРОМАХОВ В.В., ВОРОЖЦОВ А.Б.,
ХРУСТАЛЕВ А.П.**
(ТГУ, Томск, Россия)

**KOZULIN, A.A., ZHUKOV I.A., PROMAKHOV V.V., VOROZHTSOVA B.
KHRUSTALYOV A.P.**
(TSU, Tomsk, Russia)

Аннотация. Получен алюминиевый сплав АА6082 с дисперсным упрочнением частицами наноструктурного порошка Al_2O_3 в количестве 0.2 мас %. Введение порошковой легатуры в расплав проводили при одновременном ультразвуковом воздействии и механическом перемешивании. Заготовки из слитков исходного и дисперсноупрочненного сплавов подвергали многократному воздействию интенсивной пластической деформацией по схеме равноканального углового прессования при температуре 220 °С. После обработки ИПД структура сплавов претерпевает значительное измельчение. Присутствие наноразмерных частиц способствует формированию более равномерного распределения мелких зерен после обработки. Исследовали влияние комбинации дисперсного упрочнения и обработки ИПД на изменение механических свойств и характера пластического течения сплавов. Установлено значительное повышение значений микротвердости, предела текучести, временного сопротивления при одновременном увеличении удлинения до разрушения сплавов после обработки. Эффект увеличения механических свойств в дисперсно-упрочненном сплаве до и после обработки более выражен, чем у сплава без дисперсного упрочнения.

Abstract. Dispersion hardening AA6082 aluminum alloy with small additions of Al_2O_3 (0.2 wt%) nanoparticles was obtained. The introduction of a powder master alloy in a metallic melt was carried out with simultaneously mechanical mixing and ultrasonic exposure. The obtained prismatic billets from the ingots of a reference alloy and a dispersion strengthened alloy were subjected to severe plastic deformation by equal channel angular pressing at a temperature of 220 °C. After severe plastic deformation, an alloy structure was greatly refined. The presence of nanoparticles contributes to the formation of a more homogeneous and fine-grained

structure in the composite after plastic treatment as compared to the reference alloy. It was investigated the combined effect of dispersion hardening and severe plastic deformation on the change of mechanical properties and plastic flow behavior of alloys. The microhardness, yield strength, and ultimate tensile strength showed a sharp rise with a simultaneous increase in elongation before the fracture. Before and after the deformation treatment, the effect of increasing mechanical properties in the dispersion hardened alloy was more pronounced than in the reference alloy.

Ключевые слова: *алюминиевый сплав, прочность, пластичность*

Keywords: *aluminum alloy, strengthening, plastic deformation*

Введение

В настоящее время существует множество перспективных подходов для увеличения свойств конструкционных сплавов. Промышленное применение нашли легкие сплавы на основе алюминия и магния, упрочненные неметаллическими наночастицами, как материал для изготовления ответственных элементов конструкций в авиационной и аэрокосмической технике. Дальнейшее широкое применение эти композиты могут получить за высокие удельные показатели прочности, износостойкости, коррозионной стойкости и электропроводности. Известно, что использование тугоплавких наночастиц позволяет получать дисперсно-упрочненные алюминиевые и магниевые сплавы с гетерогенной структурой и высокими механическими характеристиками в широком диапазоне температур [1-3]. В частности, в работе [2] показано, что введение < 1 вес.% частиц наноразмерного оксида алюминия в расплав позволяет повысить прочность алюминиевых сплавов более чем на 50 % при сохранении исходной пластичности, а эффект упрочнения достигается следующими механизмами: частицы оксида алюминия являются эффективными центрами кристаллизации в расплаве обеспечивая, тем самым, мелкозернистую структуру слитка; дисперсное упрочнение слитка по механизму Орована [4,5]. Высокие показатели механических свойств достигаются за счет дислокационной природы упрочнения и определяются размером упрочняющих частиц, объемной концентрацией и равномерностью распределения в матрице [6]. Для равномерного распределения частиц в объеме сплава разрабатываются технологии плавки, заключающиеся в одновременном воздействии на расплав при вводе упрочняющих частиц дополнительных физических полей в виде ультразвуковой и вибрационной обработки, продолжающейся вплоть до полной кристаллизации расплава [1, 2, 6]. Режимы данных технологических процессов разрабатываются индивидуально исходя из специфики используемых сплавов.

Другим популярным методом изменения физико-механических и функциональных свойств легких сплавов без изменения химического состава является обработка интенсивной пластической деформацией (ИПД). Этот подход основан на управлении механизмами упрочнения за счет измельчения зерна до субмикронных размеров. Несмотря на растущее в последние годы применение различных методов ИПД к алюминиевым, магниевым, медным сплавам [7-10] до сих пор отсутствует полное понимание физической природы

механизмов повышения прочности таких материалов, что необходимо для дальнейшего улучшения их функциональных свойств. Актуальность экспериментальных исследований закономерностей деформации и предельных прочностных характеристик в различных условиях нагружения наноструктурных и ультрамелкозернистых сплавов, полученных методами ИПД, определяется дефицитом экспериментальных данных и отсутствием общей теории, описывающей связь структуры с механическими свойствами.

Целью данной работы являлось изучение влияния на свойства пластичности и прочности комбинации дисперсного упрочнения алюминиевого сплава АА6082 частицами наноразмерного порошка Al_2O_3 и последующей обработки методом ИПД.

Материал и методы исследований

Получение дисперсно-упрочненных заготовок для исследований, проводилось с использованием лабораторных плавок алюминиевого сплава АА 6082 (химический состав: Al – 0.9 масс. % Mg – 1 масс. % Si - прочее) с добавлением лигатур, содержащих наноразмерные керамические частицы Al_2O_3 , с одновременным ультразвуковым воздействием и механическим перемешиванием.

Алюминиевые лигатуры изготовлены методами смешения алюминиевого порошка (размер частиц < 5 мкм) с наноразмерным порошком Al_2O_3 (размер частиц < 100 nm) в количестве 5 % общей массы, и ударноволнового компактирования. Разливка подготовленного расплава с последующей кристаллизацией проводилась в цилиндрической стальной кокиль диаметром 25 мм и высотой 150 мм. Ультразвуковая обработка, введение лигатуры, механическое смешение и разливка в кокиль осуществлялись при температуре расплава 730 °С. Количество вводимых частиц Al_2O_3 составляло 0.2 мас. %.

Призматические заготовки (размеры 8x8x40 мм³) для обработки ИПД и последующего исследования были вырезаны из центральных частей цилиндрических отливок. Обработку ИПД по схеме равноканального (РКУП) призматических заготовок с целью измельчения внутренней зеренной структуры осуществляли по маршруту V_c , заключающемуся в повороте образца вокруг продольной оси на 90 градусов при повторном прессовании, при температуре 220 °С и скорости прессования 15 мм/мин с применением высокотемпературной смазки на основе дисульфида молибдена [11]. Предполагалось, что выбранная схема прессования является благоприятной для развития равномерной в объеме материала образца равноосной УМЗ структуры и, тем самым, обеспечения повышения и изотропии механических свойств [8,12]. При проведении обработки РКУП призматических заготовок из исследуемых материалов использовали универсальный сервогидравлический стенд INSTRONVHS 8801 с термокамерой и возможностью точной регулировки скорости прессования и нагружающего усилия до 50 кН.

Таким образом, для исследований были подготовлены четыре партии материала, отличающихся друг от друга наличием упрочняющих частиц и механической обработкой. Далее по тексту для удобства повествования будут упоминаться принятые сокращения, описанные в таблице 1. После получения

требуемого количества отливок и их обработки ИПД проводили комплекс исследований для определения физико-механических свойств материалов, который включал в себя: анализ микроструктуры и текстуры; измерение микротвердости; одноосное растяжение плоских образцов.

Таблица 1 - Принятые в статье сокращения исследуемых сплавов и их особенности

Названиесокоращения	Особенности сплава
A1	AA6082 исходный
A2	AA6082 + AA6082+0.2 wt. % Al ₂ O ₃
A3	AA6082 исходный после ИПД
A4	AA6082 + AA6082+0.2 wt. % Al ₂ O ₃ послеИПД

Исследования микроструктуры и текстуры материала до и после обработки проводили методами оптической микроскопии с использованием металлографического микроскопа Olympus GX-71 и анализа картин дифракции отраженных электронов (EBSD) с использованием растрового электронного микроскопа Tescan Vega II LMU.

Эксперименты по измерению микротвердости HV (по Виккерсу) проводили в соответствии со стандартом [13] на боковой поверхности призматических заготовок на разных участка вдоль оси прессования. Использовали автоматический микротвердомер HNV G21ST SHIMADZU. Индентирование выполняли с нагрузкой 50 г. и выдержкой 10 с. На каждом образце было выполнено больше 100 измерений.

Микрообразцы для растяжения в форме плоских двухсторонних лопаток с размером рабочей части 10 мм, толщиной 1 мм, шириной 3 мм и радиусом скругления 2.5 мм были вырезаны из отливок и призматических заготовок после обработки вдоль главной оси с использованием метода электроэрозионной резки. Эксперименты на одноосное растяжение проводились на универсальной электромеханической испытательной машине Instron 3369 при скорости деформации 0.001 1/с и температуре испытания 24 °С. Для каждой серии материалов испытывали по 5 образцов.

Результаты и обсуждения

Микроструктурные исследования показали, что алюминиевый сплав в состоянии поставки A1 демонстрирует распределение зерен по размерам в широком диапазоне от 23 до 350 мкм, при среднем размере зерна 97 мкм. У отливок с добавлением частиц A2 распределение размеров зерен находится в диапазоне от 17 до 380 мкм, при среднем размере зерна 79 мкм. В обоих случаях форма зерен близка к равноосной. Очевидно, что ультразвуковая обработка приводит к уменьшению пористости и средних размеров зерен исследуемого литого сплава и композита на его основе до 100 мкм, что значительно меньше размеров зерен, обычно наблюдаемых в литых алюминиевых сплавах. Введение наноразмерных керамических частиц в расплав способствовало появлению дополнительного эффекта уменьшения

средних размеров зерен в А2, так как известно, что тугоплавкие частицы являются центрами зародышеобразования, которые приводят к измельчению конечной структуры слитка.

После обработки РКУП четырьмя проходами А3 и А4 отмечено резкое измельчение структуры и изменение формы зерен. Размеры зерен для А3 после обработки находятся в диапазоне от 2.5 до 47 мкм, при средней величине 8 мкм, а для А4 находятся в от 1.9 до 30 мкм, при средней величине равной 3.17 мкм. Форма зерен и внутренняя текстура имеют ярко выраженную направленность под углом к оси прессования, в направлении сдвига, реализованного при пересечении каналов. Присутствуют большие вытянутые зерна не подвергшиеся рекристаллизации. Структура сплава А4 более равномерная, чем у А2.

Измерения микротвердости исследуемых материалов показали, что значение величины НVобразца А1 составило 560 МПа, после введения упрочняющих частиц у А2 она выросла до 590 МПа. Образец сплава А3 имеет микротвердость 660 МПа, а у сплава А4 она поднялась до 720 МПа. Увеличение микротвердости во всех случаях может быть связано только с изменением зеренной структуры и увеличением плотности дефектов в структуре, вызванной интенсивной пластической деформацией [14]. Прямое влияние на микротвердость частиц, присутствующих в сплаве, незначительно в силу их малой концентрации.

О влиянии дисперсного упрочнения и обработки интенсивной пластической деформацией на прочностные свойства и характер пластического течения алюминиевого сплава 6082 можно судить по результатам, полученным из одноосного растяжения. Результаты обработки экспериментальных диаграмм приведены в таблице 2, где $\sigma_{0.2}$, σ_b , - условный предел текучести и временное сопротивление, ϵ_p , ϵ_{max} – равномерное и максимальное удлинение, соответственно, h_c - способность к деформационному упрочнению:

$$h_c = \left(\frac{\sigma_{UTS}}{\sigma_{YS}} \right) - 1.$$

Таблица 2 – Результаты экспериментов по одноосному растяжению

Образцы	$\sigma_{0.2}$ МПа	σ_b , МПа	ϵ_p	ϵ_{max}	h_c
А1	96	167	0.056	0.062	0.73
А2	103	184	0.112	0.123	0.79
А3	155	204	0.08	0.195	0.32
А4	182	212	0.076	0.194	0.16

Образцы исследуемых материалов А1 и А2 демонстрируют кривые растяжения, характерные для алюминиевых сплавов с выраженным начальным деформационным упрочнением и преобладанием доли равномерного удлинения в общей деформации. Присутствие упрочняющих частиц в сплаве привело к небольшим изменениям механических характеристик сплава и значительному увеличению степени максимального удлинения. Увеличение максимальной степени деформации, выраженное в двукратном увеличении равномерного удлинения с 0.056 до 0.112 можно объяснить действием упрочняющих частиц, которые на стадии деформационного упрочнения препятствуют движению

дислокаций и увеличивают сопротивляемость сплава и время прохождения процесса деформации. Образец сплава А2 имеет большую способность к деформационному упрочнению по сравнению с исходным сплавом.

Сопоставляя данные микроструктурного анализа, деформационных кривых и данных таблицы отмечено, что механическое измельчение зерна при реализации ИПД в заготовках А3, А4 ведет к значительному увеличению характеристик прочности и пластичности, но уменьшению способности к упрочнению, что характеризуется меньшим углом наклона кривых к оси деформации в области равномерного удлинения. Наблюдается, что обработка РКУП сплава А4 приводит к значительному уменьшению равномерного удлинения образцов от 0.112 до 0.076 и доли его вклада в общую деформацию. Это означает, что пластическая неустойчивость начинается раньше в образцах с наночастицами, обработанных РКУП, и рост шейки происходит на предварительных стадиях растягивающей деформации.

Ранее начало роста шейки в образцах А4, подвергнутых РКУП связано с уменьшением скорости деформационного упрочнения (низкое значение степени n в соотношении Холломоны $\sigma = K \left(\frac{d\varepsilon}{dt} \right)^m \varepsilon^n$ [15]). Одной из причин незначительного деформационного упрочнения может быть то, что средняя длина свободной дислокации при соответствующем уровне напряжений сравнима с размерами структурных составляющих. При этом возникновения спутывания дислокаций, вызывающих деформационное упрочнение, вряд ли произойдет при этом состоянии размера зерна. Большой вклад в механизм деформации вносит зарнограничное проскальзывание чем дислокационный механизм.

После РКУП доля неравномерного удлинения на всей стадии пластического течения значительно возрастает от 0.096 до 0.590 для А3 и от 0.089 до 0.608 для А4. Это означает, что для образцов, обработанных ИПД большая часть растягивающих деформаций происходит в состоянии пластической неустойчивости, и они имеют больший показатель скоростной чувствительности (SRS) (высокие значения m в соотношении Холломоны), что препятствует быстрому росту трещины и приводит к относительно более длительному режиму неравномерного удлинения.

ВЫВОДЫ

Установлено, что введение наночастиц Al_2O_3 в алюминиевый сплав АА6082 в сочетании с одновременным ультразвуковым воздействием на расплав и механическим перемешиванием способствует механизму упрочнения за счет образования внутренней структуры с меньшим размером зерна во всем объеме слитка. Уменьшение среднего размера зерна и присутствие упрочняющих частиц в исследуемом сплаве ведут к изменению его физико-механических свойств. Незначительно повышается НВ (с 560 до 590 МПа), увеличиваются значения $\sigma_{0.2}$ (с 96 до 103 МПа), σ_b (с 167 до 183 МПа) и предельной степени деформации (с 0.062 до 0.123) для А1 и А2, соответственно.

Присутствие наночастиц в сплаве способствует формированию однородной мелкозернистой структуры при обработке ИПД по схеме многопроходного РКУП.

Механическое измельчение структуры сопровождается большим увеличением значений прочностных свойств и изменению свойств пластичности при одноосном растяжении по сравнению со сплавом без частиц. Наряду с уменьшением способности к деформационному упрочнению увеличивается сопротивление быстрому росту трещины, выраженное в увеличении доли неравномерной пластической деформации. То есть большая часть деформирования проходит в условиях пластической неустойчивости из-за чего изменяется характер разрушения. Полученные результаты указывают на то, что РКУП одинаково увеличивает SRS у А3 и А4 и уменьшает способность к деформационному упрочнению. Однако показатели предела текучести и временного сопротивления у А4 (182 и 212 МПа) выше, чем у А3 (155 и 204 МПа).

ЛИТЕРАТУРА

1. Murthy N. V., Prasad Reddy A., Selvaraj N., Rao C. S. P. Dispersion of Alumina Nano Particles in Al 2219 alloy by Ultrasonic Assisted Stir Casting Technique// *Materials Today: Proceedings*. 2017. Pp. 10113–10117.
2. Vorozhtsov S.A., Eskin D.G., Tamayo J., Vorozhtsov A.B., Promakhov V.V., Averin A.A., Khrustalyov A.P. The Application of External Fields to the Manufacturing of Novel Dense Composite Master Alloys and Aluminum-Based Nanocomposites // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2015. V. 46. No. 7. Pp. 2870–2875.
3. Riehemann W., Trojanová Z., Mielczarek A. Fatigue in magnesium alloy AZ91- γ Alumina fiber composite studied by internal friction measurements // *Procedia Engineering*. 2010. V. 2. No. 1. Pp. 2151–2160.
4. Vorozhtsov S.A., Zhukov I.A., Promakhov V.V., Naydenkin E.V., Khrustalyov A.P., Vorozhtsov A.B. The Influence of ScF₃ Nanoparticles on the Physical and Mechanical Properties of New Metal Matrix Composites Based on A356 Aluminum Alloy // *JOM*. 2016. No. 12. Pp. 3101–3106.
5. Zhang Z., Chen D.L., Consideration of Orowan strengthening effect in particulate-reinforced metal matrix nanocomposites: A model for predicting their yield strength // *Scripta Materialia*. 2006. 54. Pp. 1321–1326.
6. Katsarou L., Mounib M., Lefebvre W., Vorozhtsov S., Pavese M., Badini C., Molina-Aldareguia J.M., Jimenez C.C., Pérez Prado M.T., Dieringa H. Microstructure, mechanical properties and creep of magnesium alloy Elektron21 reinforced with AlN nanoparticles by ultrasound-assisted stirring // *Materials Science & Engineering A*. 2016. V. 659. Pp. 84–92.
7. Мавлютов А.М., Касаткин И.А., Мурашкин М.Ю., Валиев Р.З., Орлова Т.С. Влияние микроструктуры на физико-механические свойства алюминиевого сплава системы Al-Mg-Si, наноструктурированного интенсивной пластической деформацией // *Физика твердого тела*. 2015. Том 57. Вып. 10. С. 1998–2004.
8. Valiev, R.Z., Langdon, T.G., Principles of equal channel angular pressing as a processing tool for grain refinement // *Progress in Materials Science*. 2006. Vol. 51. No. 7. pp. 881–981.
9. Маркушев М.В. К вопросу об эффективности некоторых методов интенсивной пластической деформации, предназначенных для получения объемных наноструктурных материалов // *Письма о материалах*. 2011. т.1. №1. С. 36–42.
10. Красновейкин В.А., Москвичев Е.Н., Скрипняк В.А., Бородулин Д.А. Влияние двух схем реализации интенсивной пластической деформации на физико-механические свойства алюминиевых сплавов // В сборнике: Третий междисциплинарный молодежный научный форум с международным участием "Новые материалы" Сборник материалов. 2017. С. 695–697.
11. Kozulyn, A.A., Skripnyak, V.A., Krasnoveikin, V.A., Skripnyak, V.V., and Karavatskii, A.K., An investigation of physico-mechanical properties of ultrafine-grained magnesium alloys subjected to severe plastic deformation // *Russian Physics Journal*. 2015. T. 57. No. 9. Pp. 1261–1267.

12. Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства. - Академкнига, Москва. 2007. 397 с.
13. ASTM E8M:2008. Standard test method for tension testing of metallic materials.
14. Man-ping L., Shao-chun S., Roven H.J., Ying-da Y., Zhen Z., Murashkin M., Valiev R.Z. Deformation defects and electron irradiation effect in nanostructured AlMg alloy processed by severe plastic deformation // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2012. 22. 18101816.
15. Gupta A.K., Maddukuri T.S., Singh S.K. Constrained groove pressing for sheet metal processing // Progress in Materials Science. 2016. 84. Pp. 403–462.

АВТОРЫ

Козулин Александр Анатольевич, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, Томский государственный университет, доцент, 8 (3822)529-845, kozulyn@ftf.tsu.ru.

Жуков Илья Александрович, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, Томский государственный университет, старший научный сотрудник, 8 (3822)529-621, gofra930@mail.com.

Прوماхов Владимир Васильевич, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, Томский государственный университет, старший научный сотрудник, 8 (3822) 529-621, vvpromakhov@mail.ru.

Ворожцов Александр Борисович, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, Томский государственный университет, профессор, 8 (3822) 529-621, abv@mail.tomsknet.ru.

Хрусталеv Антон Павлович, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, Томский государственный университет, аспирант, 8 (3822) 529-621, tofik0014@mail.ru.

THE AUTHORS

Kozulin Alexander Anatolyevich, 634050, Tomsk, Lenin Ave., 36, Tomsk State University, Associate Professor, 8 (3822) 529-845, kozulyn@ftf.tsu.ru.

Zhukov Ilya Alexandrovich, 634050, Tomsk, Lenin Ave., 36, Tomsk State University, Senior Researcher, 8 (3822) 529-621, gofra930@mail.com.

Promohov Vladimir V. Promakhov, 634050, Tomsk, Lenin Ave., 36, Tomsk State University, Senior Researcher, 8 (3822) 529-621, vvpromakhov@mail.ru.

Vorozhtsov Alexander Borisovich, 634050, Tomsk, Lenin Ave., 36, Tomsk State University, Professor, 8 (3822) 529-621, abv@mail.tomsknet.ru.

Khrustalev Anton Pavlovich, 634050, Tomsk, Lenin Ave., 36, Tomsk State University, graduate student, 8 (3822) 529-621, tofik0014@mail.ru.

**ВЛИЯНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТОКОВ РАСПЛАВА В
КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ ПРИ ПОЛУНЕПРЕРЫВНОМ ЛИТЬЕ НА
ОБРАЗОВАНИЕ ДЕФЕКТА «ВЕЕРНАЯ СТРУКТУРА»**

**INFLUENCE OF THE DISTRIBUTION OF MELT FLOWS IN A
CRYSTALLIZER IN SEMI-CONTINUOUS CASTING ON THE
FORMATION OF A DIFFERENT FEATHERY GRAIN**

**КОСТИН И.В., ЛАЩУХИН Н.Е., ФРОЛОВ В.Ф., ИЛЬИН А.А.,
НЕКРАСОВ Д.А.**

(ООО «РУСАЛИТЦ», Россия, Красноярск)

**KOSTIN I.V., LASCHCHUKHIN N.E., FROLOV V.F., ILIN A.A.,
NEKRASOV D.A.**

(LLCRUSALETС, Russia, Krasnoyarsk)

Аннотация. Установлено влияние распределения потоков на образование «веерной структуры» при производстве плоских слитков, предложены варианты устранения дефекта.

Abstract. The influence of the distribution of flows on the formation of a feathery grain in the production of flat ingots has been established, and variants for eliminating the defect have been proposed.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, веерная структура, затвердевание, модифицирование, моделирование затвердевания расплава, моделирование гидродинамических потоков расплава.

Keywords: aluminum alloys, feathery grain, solidification, modification, modeling of melt solidification, modeling of melt hydrodynamic flows.

Непрерывно возрастающие требования потребителей к качеству алюминиевых сплавов, подталкивают к совершенствованию существующих и разработке новых технологий производства алюминиевых слитков, производимых способом полунепрерывного литья.

Технический алюминий, а также сплавы на его основе, получают все более широкое распространение и применение во всех сферах общества от товаров народного потребления до ответственных деталей авиа- и космической отрасли. Принимая во внимание тот факт, что растущий коэффициент потребления цветных металлов в мире, который отображает техническое и экономическое развитие[1], можно с уверенностью заявить, что в дальнейшем прогнозируется экспоненциальный рост потребления алюминиевых сплавов на десятки лет вперед.

Для того, чтобы удовлетворить мировые потребности в сплавах алюминия, быть конкурентоспособным, поддерживать стабильность производства и

прибыли необходимо добиваться высокого качества выпускаемой продукции и отсутствия брака, на устранение которого затрачиваются дополнительные средства, уменьшая общую экономическую эффективность производства.

Широкое распространение из существующих традиционных групп алюминиевых сплавов, таких как 1XXX, 2XXX, 3XXX и т.д. получили сплавы первой серии. Сплавы данной серии чаще всего используют для производства фольги, самая тонкая фольга ($4,5 \div 5$ мкм) используется в электротехнической промышленности для производства конденсаторов. Плоский алюминиевый прокат толщиной свыше 0,15 мм – это ленты, листы и плиты.

В настоящее время полуфабрикаты из данных сплавов изготавливаются методом полунепрерывного литья крупнотоннажных плоских слитков массой до 20 т и выше, которые в дальнейшем идут на переработку и получение изделий.

Основными дефектами данной серии при их производстве являются: «firtree», веерная структура и плавающие кристаллы.

Одним из наиболее часто встречающихся дефектов при литье плоских слитков 1XXX серии является, рассматриваемый в данной работе дефект, а именно «веерная структура» (двойниковые кристаллы) или feathery grains [1,2].

Веерная структура – это разновидность столбчатой кристаллизации (пористая, лучевая, узорчатая), состоит из больших колоний двойниковых кристаллов [2]. Наличие таких колоний, с индивидуальной ориентацией, приводит к анизотропии свойств в объёме слитка. В таких условиях возникает высокая вероятность дефектов при прокате, вследствие снижения пластических характеристик металла [3]. Специфический рисунок, проявляющийся в пределах веерной структуры, также приводит к неоднородности внешнего вида листового металла при анодировании [3,4]. В процессе производства фольги данный дефект приводит к образованию грубой матовой поверхности и чрезмерно большого числа точечных дефектов. Возможно проявление рисунка веерной структуры в производстве баночной тары, что сказывается на качестве нанесения краски на поверхность тары. В типографии проявление рисунка веерных кристаллов оказывает влияние на качество печати [4,6].

При полунепрерывном способе литья для получения слитков, причинами образования веерных структур может быть: недостаточное количество центров кристаллизации [6]; высокая скорость охлаждения, порядка 100°C в секунду [6,7], при которой существует резкий фронт кристаллизации, способствующий формированию мелких интерметаллических структур; влияние элементов Ti, Cr, Zr, Mg, Cu, Zn и Si, при наличии которых увеличивается формирование веерных структур [8]. Причиной образования дефекта может служить нарушение системы охлаждения, вследствие, неравномерности подачи воды и высокая температура расплава в начале литья.

Рост веерных структур может быть остановлен путем значительного уменьшения размеров зёрен, то есть модифицированием, или интенсивным перемешиванием расплава в лунке с помощью МГД кристаллизаторов, однако

образование зародышей веерных структур может быть предотвращено только путем снижения интенсивности вторичного охлаждения [12,13].

Комплекс корректирующих мер по устранению данного дефекта сводится к следующим пунктам:

- Понижение температуры расплава будет способствовать уменьшению размеров зерен, однако, есть риск возникновения плавающих кристаллов и полос на продуктах с уровнем качества, требуемым для анодирования;

- Использование эффективных модификаторов литой структуры, таких как Al-Ti-B;

- Увеличение скорости литья для подавления роста веерных структур, однако такой путь, зачастую, приводит растрескиванию слитков и увеличению размеров интерметаллических соединений;

- Перемешивание расплава и изменение градиента температур вблизи фронта кристаллизации. Максимальная согласованность в образовании «корочки» слитка с избеганием повторного нагревания кристаллизующегося расплава

- Соблюдение технологической температуры расплава во время производства;

- Равномерность охлаждающей воды на поверхности слитка;

- Равномерное распределение расплава в кристаллизаторе, и перемешивание его потоками, выходящими из отверстий распределителей расплава [14,15,16].

Одним из основных инструментов при производстве плоских слитков является литейная оснастка – кристаллизатор (рисунок 1). Кристаллизатор (формообразователь) – это основной элемент оснастки, обеспечивающий форму и размер слитков. Наружная и внутренняя (рабочая) поверхность кристаллизатора не должны иметь рисок, заусенцев, вмятин.



Рисунок 1 – Кристаллизатор скольжения

В литейной практике для создания направления потоков расплава по сечению кристаллизатора, а также выравниванию градиента температуры применяются – распределители расплава или Combobag. Они представляют собой термоформованные «коробки» с отверстиями, расположенными в тех местах, где необходимо истечение расплава (рисунок 2).

В рамках данной работы было изучено влияние распределения расплава по сечению кристаллизатора, в зависимости от конфигурации Combobag на возможность образования дефекта «веерной структуры» при прочих равных условиях.

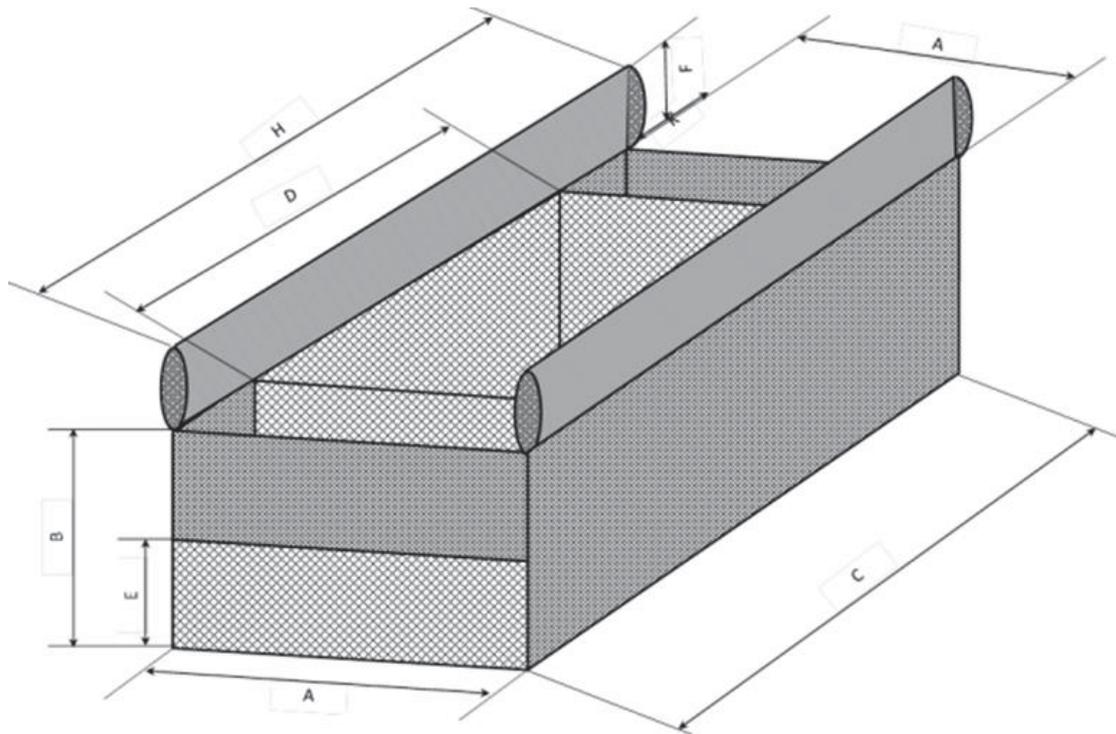


Рисунок 2 – Распределительная коробка Combobag

Первым этапом было принято решение выполнить моделирование распределения потоков расплава, через распределительную коробку Combobag для выявления критичных мест наиболее благоприятных для возникновения дефекта. Для проведения математического моделирования использовался программный комплекс ANSYS Fluent. Для расчета движения потоков металла в лунке, следовательно, и ее геометрической формы в модели была создана распределительная коробка с пропускающими расплав элементами в виде сетки. На рисунке схематично представлена распределительная коробка.

Для расчета модели использовался алюминиевый сплав 1XXX серии. Расчетная температура ликвидуса для данного сплава составила 657°C , температура солидуса 642°C . Для верификации данных в лаборатории дополнительно методом дифференциально сканирующей колориметрии были найдены величины ликвидуса, солидуса и интервала кристаллизации для данного сплава. По найденным значениям была проведена корректировка модели.

Для нескольких вариантов различных типов Combobag были рассчитаны условия протекания процесса литья, а также направления движения потоков расплава.

Характерные картины распределения потоков расплава представлены на рисунке 3. Также результаты компьютерного моделирования были верифицированы на практике. Картина проявления дефекта в виде «вверной структуры» представлена ниже.

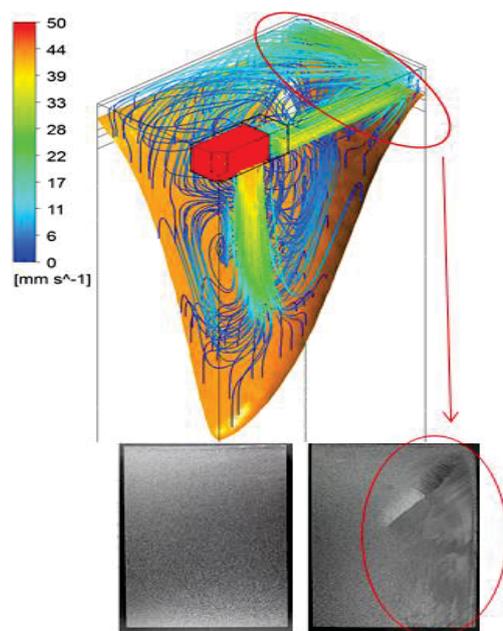


Рисунок 3 – Зависимость макроструктуры слитка от движения потоков расплава

Для сопоставимости результатов компьютерного моделирования и получаемой структуры плоских слитков в промышленных условиях были отобраны темплеты и сделан макроанализ для выявления наличия дефекта «веерной структуры». На рисунке 4 представлен процесс опытного литья слитков.



Рисунок 4 – Литейный стол с кристаллизаторами в момент литья

Как видно из рисунка 3 существует зависимость в распределении гидротоков расплава по сечению литейной лунки и возникновению дефекта в зонах с интенсивным движением расплава. Возможно это связано с обеднением кристаллизующейся фазы модифицирующими компонентами, что плодотворно влияет на распространение дефекта. Поэтому при литье низколегированных сплавов необходимо применять усиленное модифицирование.

ВЫВОДЫ

В результате исследования влияния распределения потоков расплава при полунепрерывном литье плоских слитков на возможность образования дефекта «веерной структуры» можно сделать вывод о том, что:

1. Конфигурация и размер Combobag играют важную роль в распределении расплава по сечению кристаллизатора и может служить дополнительным фактором в образовании дефекта «веерной структуры».

2. Установлена зависимость в распределении гидродинамических потоков расплава по сечению литейной лунки и возникновению дефекта в зонах с интенсивным движением расплава, что связано с обеднением кристаллизующейся фазы модифицирующими компонентами. Одним из решений данной проблемы является применение эффективного модифицирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. L. Backerud, H. Boettcher, J. Courtenay, R. Vainik / Opticast-A method for optimized grain refinement // *Light Metals*, 2004, p. 833-835
2. M. Butu, C.D. Urban, C. Stanica, M. Cuhutencu / Assessment of Al-Ti-B and Al-Ti-C grain refiners performance using the Alcoa test // *U.P.B. Scientific Bulletin, Series B*, Vol. 69, 2007, 63-75.
3. В.Ф. Фролов, В.Б. Деев, С.В. Беляев, И.В. Костин [и др.] / О модифицировании слитков из Al-сплавов серии 1XXX // *Металлургия машиностроения*. - 2016. - № 4. - С. 35-37.
4. L. Backerud, R. Vainik / Method for optimized aluminum grain refinement // *Light Metals*, 2001, p. 951 - 954.
5. R. Vainik, J. Courtenay, B. Saglam / Optimisation of grain refinement // *Light Metals*, 2013, Edit-ed by: Barry Sadler, p. 1001-1007
6. S. Henry, P. Jarry, and M. Rappaz / *Metall. Mater. Trans. A*, 1998, vol. 29A, pp. 2807–17.
7. Pettersen, T. Phase Transformation for Primary Particles in the Surface Region of an AA1200 Alloy / T. Pettersen // *Materials Science Forum*. – 2007. – Vols. 539–543. – P. 311–316.
8. Влияние технологических факторов на образование дефектов структуры крупнотоннажных слитках из алюминиевых сплавов серии 1XXX / В. Ф. Фролов, С. В. Беляев, И. Ю. Губанов [и др.] // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. – 2016. № 2. – С. 24-28.
9. Grandfield, John. *Direct-chill casting of light alloys: science and technology* / John F. Grandfield, Dmitry G. Eskin, Ian F. Bainbridge. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2013. – 412 p.
10. Модифицирование, гомогенизация, интенсификация теплопереноса какосновные рычаги управления свойствами литого полуфабриката / А. А. Гущинский, Е. А. Павлов, Э. В. Мальцев [и др.] // *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии*. 2015. Т. 8. № 4. С. 531–539.
11. Eskin, Dmitry G. *Advances in Metallic Alloys. Physical Metallurgy of Direct Chill Casting of Aluminum Alloys* / A series edited by J. N. Fridlyander and D. G. Eskin. CRC Press is an imprint of the Taylor & Francis Group, an inform business, 2008. – 324 p.
12. Granger, P. A. *Microstructure control in ingots of aluminum alloys with an emphasis on grain refinement* / P. A. Granger // *Essential Readings in Light Metals. Volume 3. Cast Shop for Aluminum Production*. 2013. p. 354–365.
13. Chen, X. -G. *Growth mechanisms of intermetallic phases in DC cast AA1XXX alloys* / X. -G. Chen // *Essential Readings in Light Metals. Volume 3. Cast Shop for Aluminum Production*. 2013. P. 460–465.
14. Pettersen, T. *Phase Transformation for Primary Particles in the Surface Regions of an AA1200 Alloy* / T. Pettersen // *Materials Science Forum*. – 2007. – Vols. 539–543. – P. 311–316.
15. Beresina, A. L. *Microstructure Formation in Binary Al-TM Alloys under Nonequilibrium Solidification* / A. L. Beresina, E. A. Segida, G. V. Kurdyumov // *Institute for Metal Physics. – Journal of Physics: Conference Series* 144. – 2009. – P. 320–332.
16. Eskin, Dmitry G. *Advances in Metallic Alloys. Ultrasonic Treatment of Light Alloy Melts* / A series edited by J. N. Fridlyander and D. G. Eskin. – CRC Press is an imprint of the Taylor & Francis Group, an inform business, 2015. – 326 p.

АВТОРЫ

Костин Игорь Владимирович - ООО «РУСАЛИТЦ», Россия, Красноярск
Лашухин Никита Евгеньевич - ООО «РУСАЛИТЦ», Россия, Красноярск
Фролов Виктор Федерович - ООО «РУСАЛИТЦ», Россия, Красноярск
Ильин Алексей Александрович - ООО «РУСАЛИТЦ», Россия, Красноярск
Некрасов Дмитрий Александрович - ООО «РУСАЛИТЦ», Россия, Красноярск

THE AUTHORS

Kostin Igor Vladimirovich - RUSALITZ LLC, Russia, Krasnoyarsk
Lashchukhin Nikita Evgenyevich - RUSALITZ LLC, Krasnoyarsk, Russia
Frolov Victor Federovich - RUSALITZ LLC, Russia, Krasnoyarsk
Ilyin Alexey Aleksandrovich - RUSALITZ LLC, Russia, Krasnoyarsk
Nekrasov Dmitry Aleksandrovich - RUSALITZ LLC, Russia, Krasnoyarsk

**ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СМАЧИВАНИЯ
КВАРЦЕВЫХ ПЕСКОВ СВЯЗУЮЩИМИ**

**THERMODYNAMIC PARAMETERS OF QUARTZ SANDS WETTING
WITH BINDING MATERIALS**

СМОЛКО В.А., АНТОШКИНА Е.Г.
(ФГАОУ ВО "ЮУрГУ (НИУ)", Челябинск, Россия)

SMOLKO V.A., ANTOSHKINA E.G.
(FSAEINE "SUSU (NRU), Chelyabinsk, Russia)

Аннотация. Приведены расчеты термодинамических параметров смачивания связующими дисперсных систем. Термодинамические параметры смачивания могут использоваться для оценки влияния различных химических соединений на физико-химические свойства смесей.

Annotation. The articles describes calculations of the thermodynamic parameters of disperse systems wetting with binding materials. Thermodynamic wetting parameters can be used to evaluate the effect of various chemical compounds on the physico-chemical properties of mixtures.

Ключевые слова: смачивание, кварцевые пески, связующее.

Keywords: wetting, quartz sands, binding materials.

При приготовлении формовочной смеси и последующем формообразовании на формирование поверхности контакта между частицами твердого наполнителя и жидким связующим оказывают явления, связанные с процессами смачивания и реологии [1, 2]. При молекулярном контакте твердых тел с жидкостями происходит смачивание и растекание жидкостей по поверхности, обусловленное самопроизвольным уменьшением энергии системы.

Способность жидкости к смачиванию определяется значением краевого угла смачивания, образующегося между жидкой фазой и твердым телом. Краевой угол смачивания капли жидкости на твердой подложке определяется законом Юнга:

$$\cos\theta = \frac{\sigma_{ТГ} - \sigma_{ТЖ}}{\sigma_{ЖГ}}, \quad (1)$$

где θ – краевой угол смачивания, σ – удельные свободные межфазовые энергии на соответствующих границах сред.

Чем меньше угол θ и соответственно больше $\cos\theta$, тем лучше смачивание. При $\theta < 90^\circ$, поверхность считается хорошо смачиваемой данной жидкостью, если $\theta > 90^\circ$, то по отношению к данной жидкости поверхность смачивается плохо.

Процессы смачивания должны определяться с учетом физических параметров контактирующих фаз, прежде всего поверхностных энергий. С этих позиций, используя экспериментально найденные величины краевого угла смачивания, поверхностного натяжения, можно рассчитать энергию смачивания $W_э = \sigma \cdot \cos\theta$, работу растекания $W_p = -\sigma \cdot (1 - \cos\theta)$, работу адгезии $W_a = \sigma \cdot (1 + \cos\theta)$ и работу когезии $W_k = 2\sigma$, которые дают возможность получить более полную количественную оценку термодинамических параметров процесса формирования адгезионных контактов в синтетических смесях.

В работе исследовались следующие связующие: жидкое стекло ($\rho = 1,4 \text{ г/см}^3$, $\rho = 1,46 \text{ г/см}^3$), жидкий лигносульфонат технический (ТУ 13-0281036-029-94), фенолформальдегидная смола марки СФ-3042.

Определение краевых углов смачивания осуществлялось методом лежащей капли, а поверхностного натяжения – методом максимального давления пузырьков [3].

Результаты определения поверхностного натяжения связующих, краевых углов смачивания и расчеты значений термодинамических величин смачивания зерен кварцевого песка приведены в табл. 1.

Таблица 1

Термодинамические параметры смачивания кварца связующими

№	Связующее	Поверхностное натяжение $\sigma \cdot 10^3$, Н/м ²	Краевой угол смачивания θ , град.	$\cos\theta$	Энергия смачивания $W_э$, мДж/м ²	Работа растекания W_p , мДж/м ²	Работа адгезии W_a , мДж/м ²	Работа когезии W_k , мДж/м ²
1	Жидкое стекло $\rho = 1,4 \text{ г/см}^3$ М = 2,2 М = 2,6 М = 3,0	70,85	34,63	0,822	58,238	-12,611	129,088	141,7
		73,68	38,79	0,779	56,733	-16,283	131,076	147,36
		75,64	40,68	0,758	57,335	-18,304	132,975	151,28
	$\rho = 1,46 \text{ г/см}^3$ М = 2,2 М = 2,6 М = 3,0	70,92	38,87	0,778	55,175	-15,744	126,095	141,84
		74,91	43,91	0,720	53,935	-20,974	128,845	149,82
		76,88	45,01	0,706	54,277	-22,602	131,157	153,76
2	ЛСТ	42,31	51,36	0,624	26,401	-15,908	68,711	84,62
3	СФ-3042, $\rho = 1,2 \text{ г/см}^3$	57,37	43,60	0,724	41,543	-15,862	98,67	114,74

Анализ экспериментальных данных показывает, что по сравнению с фенолформальдегидной смолой (СФ-3042), а также лигносульфонатом (ЛСТ) жидкое стекло имеет наибольшее поверхностное натяжение, величина которого зависит от его модуля и плотности раствора. Наибольшая величина краевого угла смачивания отмечается у лигносульфоната (ЛСТ). Энергия смачивания у жидкого стекла больше по сравнению с ЛСТ в 2 – 2,2 раза и 1,3 – 1,4 раза по отношению к

фенолформальдегидной смоле. Примерно во столько же раз работа адгезии больше для жидкого стекла по сравнению с остальными связующими. Из значений энергии смачивания следует, что жидкое стекло, в независимости от плотности и модуля, обладает более высокой смачивающей способностью по отношению к кварцу, чем фенолформальдегидная смола и лигносульфонат.

В синтетических формовочных смесях зерно кварцевого песка или другого наполнителя имеют развитую криволинейную поверхность, поэтому это следует учитывать при рассмотрении вопросов определения величин краевых углов смачивания.

Рассмотрим гетерогенную систему, состоящую из газовой фазы 1, связующего 2, находящегося на криволинейной поверхности твердого наполнителя 3.

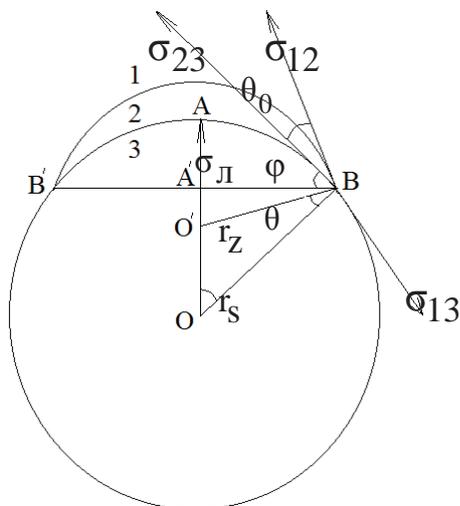


Рис. 1. Схема смачивания связующим криволинейной поверхности твердого наполнителя формовочных смесей

В результате рассмотрения сил на границе раздела фаз (рис. 1), изменение энергии Гиббса при равновесии данной гетерогенной системы определяется соотношением [4]:

$$\Delta G_T^0 = \left(\frac{1}{3} \right) \{ 2\pi r_Z^2 [1 - \cos(\theta + \varphi)] \sigma_{12} + 2\pi r_S^2 \cdot (1 - \cos\varphi) (\sigma_{23} - \sigma_{13}) \}. \quad (2)$$

Первый член в фигурных скобках уравнения (1), характеризует работу образования поверхности раздела газ-связующее, второй – работу образования поверхности соприкосновения связующего и твердого наполнителя. На единицу длины линии трехфазного контакта со стороны поверхностей раздела фаз действуют силы, связанные с поверхностными натяжениями σ_{12} , σ_{13} , σ_{23} . Кроме того, возникает сила, обусловленная линейным натяжением по периметру капли связующего, направленная вдоль радиуса кривизны линии трехфазного контакта, величину которой необходимо учитывать при рассмотрении вопроса формирования прочности синтетических смесей. Для σ_L

при условии $\frac{a_0}{r} \ll 1$, было получено уравнение [5]:

$$\sigma_{\text{л}} = -\sigma'_{12} \cdot a_0 \cdot \sin\theta \cdot f(\theta) \quad (3)$$

где $f(\theta) = [3 - \operatorname{tg}\frac{\theta}{4}]/2$; σ'_{12} – поверхностное натяжение в сферической области капли связующего для случая, когда кривизной ее можно пренебречь, штрих означает принадлежность к плоской границе раздела, a_0 – межатомное расстояние твердой фазы, θ – краевой угол смачивания. Существование функциональной связи между $\sigma_{\text{л}}$ и углом θ можно объяснить тем, что энергия атома на трехфазной линии контакта зависит от локального окружения, т.е. от геометрического расположения и количества его ближайших соседей, которые зависят от краевого угла θ .

Рассмотрим условия квазиравновесного состояния сил вдоль касательной в точке В (рис. 1) к поверхности твердой фазы. Для капель связующего больших радиусов имеем уравнение [6]:

$$\sigma'_{12} \cdot \cos\theta_0 + \sigma'_{23} = \sigma'_{13}. \quad (4)$$

С учетом линейного натяжения условие квазиравновесия имеет вид [6]:

$$\sigma_{12} \cdot \cos\theta_0 + \sigma_{23} + \sigma_{\text{л}} \cdot \cos\varphi = \sigma_{13} \quad (5)$$

Учитывая функциональную связь между углами θ и φ из треугольника ОО'В можно найти связь $\cos\varphi$ с r_z , r_s и углом θ :

$$\cos\theta = 1/\sqrt{A^2}, \quad (6)$$

где $A = \frac{r_z}{r_s} \cdot \sin\theta / (1 - \frac{r_z}{r_s} \cos\theta)$. Тогда из условия равновесия сил (5) с учетом (3) и (4) в линейном приближении относительно малого параметра $\frac{a_0}{r} \ll 1$ для величины краевого угла получаем следующее выражение:

$$\cos\theta = \cos\theta_0 + \frac{a_0}{r_z} (\cos\theta + f(\theta)) - \frac{a_0}{rs} \cos\theta (1 + f(\theta_0)). \quad (7)$$

Отсюда видно, что степень влияния сил линейного натяжения на краевой угол определяется отношением межатомного расстояния к радиусам кривизны связующего и твердой фазы. При больших радиусах кривизны частицы и линии трехфазного контакта (r), т.е. при $\frac{r_s}{r_z}$ и $\frac{\sigma_{\text{л}}}{\sigma_{12}} \rightarrow 0$ отношение (1) примет вид, аналогичный случаю рассмотрения системы при плоской твердой фазе [3]:

$$\Delta G_T^0 = \left(\frac{2\pi r_s}{3} \right) (1 - \cos\varphi - 0,5 \sin^2\theta \cdot \cos\theta) \sigma_{12}. \quad (8)$$

Результаты определения поверхностного натяжения связующих, краевых углов смачивания и расчеты значений термодинамических величин смачивания зерен кварцевого песка с учетом кривизны поверхности приведены в табл. 2.

Термодинамические параметры смачивания кварца с учетом кривизны поверхности

№	Связующее	Поверхностное натяжение $\sigma \cdot 10^3$, Н/м ²	Краевой угол смачивания θ , град.	$\cos\theta$	Энергия смачивания W_σ , мДж/м ²	Работа растекания W_p , мДж/м ²	Работа адгезии W_a , мДж/м ²	Работа когезии W_k , мДж/м ²
1	ЛСТ	42,31	84,32	0,098	4,146	-38,16	46,45	84,62
2	СФ-3042, $\rho = 1,2$ г/см ³	57,37	82,41	0,131	7,51	-49,85	64,88	114,74

Результаты расчетов термодинамических параметров смачивания различными связующими криволинейной поверхности в сравнении с плоской показали [7], что они изменяются значительно. Так энергия смачивания W_σ связующими уменьшается в 2 – 4 раза, а работа растекания W_p уменьшается в 3 – 5 раз. Угол θ (угол смачивания криволинейной поверхности) увеличивается в 1,5 – 2,4 раза в сравнении со значениями θ при смачивании плоской поверхности, что приводит к снижению работы адгезии W_a на 32 – 35%.

Такие изменения термодинамических параметров смачивания дисперсных систем, какими являются синтетические смеси, указывают на то, что процесс формирования адгезионных контактов между частицами твердого наполнителя и связующим – это сложный физико-химический процесс, требующий дальнейшего рассмотрения и уточнения как с теоретической, так и практической сторон. Экспериментальные данные термодинамических параметров смачивания необходимо использовать как сравнительные для оценки влияния различных химических соединений (наполнителей, связующих, ПАВ) на процессы формирования адгезионных контактов, а, следовательно, и на физико-химические свойства смесей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Савинов, А.С. Исследование деформационной способности песчано-глинистых смесей / А.В. Савинов, А.С. Тубольцева, Е.В. Сеницкий // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2011. – №1. – С. 29-32
2. Илларионов, И.Е. Формовочные материалы и смеси. Часть 1 / И.Е. Илларионов, Ю.П. Васин. – Чебоксары: ЧГУ им. И.Н. Ульянова. – 1992. – 223 с.
3. Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии. – М.: Химия, 1982. – 400 с.
4. Дерягин, Б.В. Поверхностные силы /Б.В. Дерягин, Н.В. Чураев, В.М. Муллер. – М.: Наука, 1987. – 399 с.
5. Новоселов А.Р., Щербаков Л.М. Размерная зависимость краевого угла микрокапли на плоской подложке // Адгезия расплавов и пайка материалов. – Киев: Наукова думка, 1989. – С. 6 – 8
6. Басин В.Е. Адгезионная прочность. – М.: Химия, 1984. – 204 с.
7. Иткис З.Я., Смолко В.А., Сивко В.И. Вопросы смачивания наполнителей формовочных смесей связующими материалами. – Челябинск, 1991. - С. 63-65
8. Сумм, Б.Д. Физико-химические основы смачивания и растекания / Б.Д. Сумм, Ю.В. Горюнов. – М.: Химия, 1976. – 232 с.

9. Зимон, А.Д. Адгезия жидкости и смачивание / А.Д. Зимон. – М.: Химия, 1974. – 416 с.
10. Зимон, А.Д. Адгезия пленок и покрытий / А.Д. Зимон. – М.: Химия, 1977. – 352 с.
11. Зимон, А.Д. Адгезия пыли и порошков / А.Д. Зимон. – М.: Химия, 1976. – 432 с.
12. Адам, Н.К. Физика и химия поверхностей / Н.К. Адам. – М–Л.: Гостехиздат, 1947. – 552 с.
13. E.G. Shafrin, W.A. Zisman, Contact angle, wettability and adhesion, in: Advances in Chemistry Series, vol. 43, 1964, pp. 145-157.
14. R. Williams, J. Colloid Interface Sci. 79 (1981) pp. 287-288.
15. R.E. Johnson, R.H. Dettre, Contact angle, wettability and adhesion, in: Advances in Chemistry Series, vol. 43, 1964, pp. 112-135.

АВТОРЫ

СМОЛКО В.А. - ФГАОУ ВО "ЮУрГУ (НИУ)", Челябинск, Россия

АНТОШКИНА Е.Г. - ФГАОУ ВО "ЮУрГУ (НИУ)", Челябинск, Россия

THE AUTHORS

SMOLKO V.A. - FSAEI of HE "SUSU (NRU)", Chelyabinsk, Russia

ANTOSHKINA E.G. - FSAEI of HE "SUSU (NRU)", Chelyabinsk, Russia

СИНТЕЗ ОЛОВЯННЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ХУДОЖЕСТВЕННОГО ЛИТЬЯ

SYNTHESIS OF TIN ALLOYS FOR ARTISTIC CASTING

ШАРШИН В.Н., СУХОРУКОВА Е.В., СУХОРУКОВ Д.В., КЕЧИН В.А.

(ВлГУ, г. Владимир, Россия)

SHARSHIN V.N., SUKHORUKOVA E.V., SUKHORUKOV D.V.

(VSU, Vladimir, Russia)

***Аннотация.** В работе представлены результаты исследований по разработке группы оловянных сплавов системы Sn – Sb – Cu - In для художественного литья с оптимальным комплексом технологических, прочностных, экологических и эстетических свойств.*

***Annotation.** The results of the development of a group of tin alloys of the Sn - Sb - Cu - In system with an optimal set of technological, strength, environmental and aesthetic properties are produced in the article.*

***Ключевые слова:** оловянные сплавы, легирующие элементы, технологические, прочностные, экологические и эстетические свойства.*

***Key words:** tin alloys, alloying elements, technological, strength, environmental and aesthetic properties.*

Оловянные сплавы для художественного литья ранее специально не изучались. Значительно более известны промышленные антифрикционные оловянные сплавы для производства подшипников скольжения, а также оловянные сплавы – безсвинцовые припой.

Сплавы для художественного литья на основе олова обладают рядом преимуществ: не вызывают аллергических реакций, пластичные, обладают белым зеркальным блеском, на поверхность изделий из олова легко ложится позолота и серебрение. В жидком состоянии они не поглощают газов, поэтому отливки из этих сплавов как правило бывают свободны от газовых раковин и пористости, за исключением случаев захвата воздуха или влаги при заливке формы. Оловянные сплавы имеют малую объемную усадку при кристаллизации.

Из литейных наиболее известен сплав белого цвета под названием «британский металл», вошедший во всеобщее употребление с 1850 года в Англии для производства посуды: ложек, чайников, сахарниц, молочников, а также подсвечников, состава: 85-93% олова, до 10 % сурьмы, дополнительно содержащий небольшие количества меди, цинка, а иногда и мышьяка [1].

Поскольку этот сплав изначально применялся для изготовления посуды, в Европе и России он стал известен под названием «посудное олово», по-

другому – «пьютер» («pewter»). В 19 в. применялся для промышленного производства легких и твердых заменителей серебра при изготовлении чайных и кофейных сервизов.

Этот сплав приобрёл настолько широкую популярность, что скоро пьютером стали называть все оловянные сплавы, предназначенные для художественного литья.

Из истории художественного оловянного литья, кроме «британского металла», известны и другие составы пьютерных сплавов:

- «немецкое олово» (5%Sb, 1%Cu, 94%Sn), также применялся для производства посуды;

- «английское олово» (80%Sn, 20%Pb) - было мягким и тяжелым, из него изготавливали литые и кованные кувшины и блюда;

В настоящее время пьютером называют сплавы олова с другими металлами: медью, сурьмой, висмутом или свинцом, предназначенные для изготовления художественных изделий, например:

- сплав, состоящий из 97-98% олова и 2-3% свинца, причём, содержание свинца может изменяться от 2 до 50% [1];

- сплав для изготовления художественных изделий (90-95%Sn, 2-8%Sb, 2-8%Cu) [2].

В олово часто добавляли и сейчас добавляют свинец. Свинец вводят в различные оловянные сплавы, как художественные, так и антифрикционные, и припои для повышения литейных свойств, снижения температуры плавления и частичного упрочнения твёрдого раствора, а также удешевления [3].

Свинец существенно упрочняет твёрдый раствор, но снижает блеск, способствует быстрому потускнению (окислению) и является экологически вредной примесью в пьютерных сплавах. Сплавы, содержащие свинец, вообще не могут быть использованы для изготовления художественных изделий, непосредственно контактирующих с телом человека, поскольку способны вызвать нежелательные аллергические реакции.

Основными недостатками пьютерных сплавов являются низкие прочность и твёрдость, а также недостаточная коррозионная стойкость. Из-за склонности к деформации и разрушению, литые изделия из пьютерных сплавов легко гнутся, царапаются и ломаются, и потому применяются, главным образом, для ограниченного круга отливок художественного назначения: преимущественно посуды в виде разнообразных с тонким рисунком рюмок, бокалов, кувшинов и т.п.; мелкого кабинетного литья сложной конфигурации с выраженной рельефной поверхностью; бижутерии, а также для декоративного украшения изделий из других материалов: металлов и неметаллов.

Указанные выше обстоятельства существенно снижают эксплуатационные (потребительские) свойства сплавов и, в основном, препятствует развитию технологии производства не только художественных, но и технических изделий из оловянных сплавов и их широкому распространению.

Кроме того, оловянные сплавы могут быть подвержены «оловянной чуме». При охлаждении до температур значительно ниже комнатных, изделия, сделанные из олова и некоторых его сплавов, покрываются специфическими

«язвами», которые, разрастаясь, постепенно приводят к превращению изделий в порошок. Это реакция аллотропного превращения β -олова в α -олово. При охлаждении ниже $+13,2^{\circ}\text{C}$ устойчивое при нормальных условиях β -олово (белое олово) с тетрагональной кристаллической решёткой [6] превращается в α -олово (серое олово) с кубической решёткой типа алмаза. Причём, соприкосновение серого олова и белого приводит к «заражению» последнего, то есть к ускорению фазового перехода по сравнению со спонтанным процессом из-за появления зародышей новой кристаллической фазы. Совокупность этих явлений, с учётом тех последствий, к которым они приводили, назвали «оловянной чумой». История знает много случаев проявления «оловянной чумы». Например, в запасниках петербургского музея Александра Суворова однажды превратились в труху десятки фигурок из оловянных сплавов – в подвале, где они хранились, лопнули зимой батареи отопления.

В настоящее время «оловянная чума» - уже только грозное событие прошлого. Давно найдены элементы-стабилизаторы структуры олова и его сплавов. Тем не менее, в отсутствие этих элементов, возможность возникновения реакции аллотропного превращения существует всегда.

Главной задачей настоящей работы является разработка научных основ синтеза экологически чистых, стабильных в естественных условиях земного климата оловянных сплавов с повышенными художественными, эстетическими и литейными свойствами, а также стойкостью к окислению.

Целью исследований является повышение функциональных, технологических и эстетических свойств оловянных сплавов путем ввода специальных легирующих добавок.

На основе анализа номенклатуры и области применения художественных отливок, способов литья были разработаны следующие требования к составам сплавов:

1. Сплавы должны обладать технологическими свойствами, позволяющими получать качественные отливки без дефектов с минимальными трудозатратами: максимальной жидкотекучестью и формозаполняемостью; минимальной линейной усадкой; низкой температурой плавления.

2. Сплавы должны иметь стабильную при нормальных земных условиях структуру, а также достаточно высокие эксплуатационные характеристики, обусловленные, главным образом, прочностными свойствами, обеспечивающими длительный срок службы изделий.

3. Сплавы в отливках не должны давать «зернистости», а также усадочной и газовой пористости, т.е. иметь минимальную объёмную усадку и минимальную растворимость газов.

4. Сплавы должны обладать художественной или эстетической привлекательностью в течение всего срока службы изделия, и, в связи с этим, должны обладать: высокой коррозионной стойкостью, плотной фактурой; «благородным» блеском.

5. Сплавы должны отвечать требованиям экологичности при изготовлении и эксплуатации отливок: не наносить вред здоровью человека и окружающей среде, в частности, не содержать вредных для здоровья примесей.

Анализ известных патентных и литературных данных, опубликованных в открытой печати, позволил выявить следующие химические элементы, используемые в настоящее время в качестве легирующих добавок для изготовления изделий технического и художественного назначения по группам сплавов:

- для художественных отливок: сурьма, медь, свинец;
- для подшипников скольжения: сурьма, медь, алюминий, цинк, никель, хром, кремний, кадмий, карбид кремния, марганец, свинец, мышьяк;
- для припоев: сурьма, медь, цинк, алюминий, серебро, кадмий, свинец, железо, никель, марганец, кремний, индий, галлий, титан.

Каждая группа сплавов обладает определенным набором свойств и характеристик в зависимости от технологии производства и условий эксплуатации изделий.

Выбор оптимального комплекса легирующих элементов для изготовления художественных оловянных сплавов проводили в соответствии с известными работами и методическими рекомендациями по созданию новых литейных сплавов, разработанными в разное время акад. А.А.Бочваром [5], д.т.н., проф. Б.Б.Гуляевым [6], д.т.н., проф. В.М.Воздвиженским [7], д.т.н., проф. В.А.Кечиным [8] и др. на основании анализа следующих критериев:

- критерия растворимости (α);
- критерия распределения (ω);
- влияния элементов на переход β -Sn в α -Sn;
- влияния на температуру плавления сплава;
- влияние на литейные свойства;
- влияние на механические, технологические, эстетические, эксплуатационные свойства сплава;
- влияние на здоровье человека.

Первоначально, к числу возможных легирующих олово элементов, в соответствии с [6], были отнесены те элементы, которые отвечают условиям $\alpha > 0,5$; $\omega > 0,05$. К ним относятся 12 элементов: Al, Si, Cu, Zn, Ga, Cd, In, Sb, Tl, Pb, Bi, Mg. Олово не образует непрерывных твердых растворов ни с одним элементом. Растворимость более 10 % (ат.) имеют только два элемента Sb (10,3) и Bi (13,1 %). Растворимость более 1 % имеют 7 элементов (Al, Si, Ga, In, Hg, Tl, Pb).

Из этой группы элементов исключили драгоценные и дорогостоящие металлы, а также Al, Mn, Mg, Zn, Si и Ge как способствующие превращению β -Sn в α -Sn. Между тем, ослабляют и делают невозможным указанное превращение Bi, Pb, Sb, Cd, Cu, а также, In.

Свинец исключили как экологически вредный металл. Кроме того, исключили элементы, не оказывающие существенного влияния на свойства оловянных сплавов.

В результате проведенного анализа было установлено - наиболее полно указанным выше критериям отвечают следующие элементы: сурьма, висмут, индий, медь.

Все названные элементы не оказывают вреда здоровью человека, вероятность их поступления в организм при использовании изделий из сплавов с этими элементами даже в качестве посуды крайне незначительна.

Данные металлы обладают критерием растворимости $\alpha > 0,5\%$; критерием распределения $\omega > 0,05\%$; повышают твердость и прочность олова, а также жидкотекучесть, износостойкость, коррозионную стойкость.

Они не только не способствуют превращению β -Sn в α -Sn, а предотвращают его.

Таким образом, указанные металлы могут быть использованы в качестве легирующих элементов при производстве оловянных сплавов для художественного литья.

Известно, что проблема «оловянной чумы» была ранее подробно изучена британской гильдией пьютерщиков. Было установлено положительное влияние комплекса легирующих элементов сурьмы с медью, стабилизирующее структуру и существенно снижающего температуру начала аллотропного превращения ниже реальных для бытовых условий значений. В результате этих исследований появился базовый сплав системы Sn-Sb-Cu, который затем получил название «британский металл».

Анализ комплексного влияния меди и сурьмы на свойства оловянных сплавов показал: медь и сурьма стабилизируют структуру олова и его сплавов. Кроме того, медь и сурьма образуют интерметаллидные соединения с оловом. Медь образует частицы Cu_3Sn или Cu_6Sn_5 , а сурьма - частицы SnSb.

Эти интерметаллидные частицы сами по себе намного прочнее матрицы олова и, кроме того, эффективно блокируют распространение усталостной трещины. Причём, образование мультиинтерметаллидных частиц способствует более тонкому измельчению зернистой структуры твёрдого раствора. Частицы твёрдых интерметаллидных соединений в пластичной матрице олова продлевают усталостную долговечность сплавов. Образование указанных соединений существенно повышает прочность и твёрдость оловянных сплавов.

Важно отметить, сплавы олова с сурьмой имеют один существенный недостаток: они склонны к седиментации (ликвации по удельному весу) при затвердевании. Кристаллы соединения сурьмы с оловом имеют меньший удельный вес, чем основная масса сплава, и стремятся всплыть наверх. Одной из причин введения меди в такие сплавы, согласно [9] является как раз намерение предотвратить такую ликвацию. Частицы интерметаллидов Cu_6Sn_5 не только способствуют дополнительному упрочнению оловянных сплавов, они образуют сплошной скелет – сетку в затвердевающем сплаве, препятствующую седиментации более лёгких частиц SnSb и расслоению сплава в отливке. Кристаллы SnSb нарастают на ветвях скелета, как на ветвях дерева и не всплывают.

Между тем, кристаллы Cu_3Sn служат центрами кристаллизации для выделяющихся вторичных кубических кристаллов SnSb, вследствие чего кристаллизация последних происходит более равномерно и размеры их более мелкие [9]. Наличие этих кристаллов также повышает общую твердость сплава.

Известно, что благоприятное влияние меди сказывается при содержании её от 2 до 10%; при большем содержании меди сплав делается слишком хрупким

вследствие большого скопления крупных и хрупких кристаллов Cu_3Sn , которые сами начинают ликвидировать [10]. Кроме того, повышенное содержание меди влечет за собой необходимость применения более высоких температур заливки.

Указанные выше обстоятельства, вероятно, послужили основанием к тому, что в практике художественного литья со средних веков и до наших дней наибольшее применение получили именно сплавы на основе системы олово - сурьма – медь. В сплавах этой системы основные легирующие элементы – сурьма и медь удачно дополняют друг друга. Таким образом, базовый комплекс элементов, составляющий основу оловянных сплавов для художественного литья можно считать установленным.

В настоящее время в литературе имеются противоречивые данные относительно структуры оловянистых сплавов данной системы. В принципе, они могут состоять из следующих фаз: α -твёрдый раствор сурьмы и меди в олове; β - фаза (кубические кристаллы SnSb); η - фаза (соединение Cu_6Sn_5); ϵ - фаза (соединение Cu_3Sn); γ - фаза (соединение $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$), а также фаза Cu_2Sb .

Согласно [10, 11], высокооловянистый баббит Б83 (82...84% Sn, 5...6% Cu и 11...12% Sb) - близкий аналог «британского металла» - состоит из трёх фаз: α , β и η или α , β и ϵ .

Кроме того, в работе [11] показано, что основа сплава - α -фаза представляет собой твёрдый раствор сурьмы в олове, матрица сплава баббита Б83 - это твёрдый раствор сурьмы и меди в олове с субмикроструктурным размером зёрен 0,5...1 мкм, фаза в виде игл - соединение Cu_6Sn_5 , а малодисперсная фаза SnSb имеет кристаллическую решётку, отличную от кубической (гексагональная JCPDS (33 – 118) или ромбоэдрическая).

Таким образом, оловянистые сплавы системы Sn-Sb-Cu, близкие по содержанию компонентов к баббиту Б83, состоят из α , β и η (ϵ) фаз. Мягкая основа микроструктуры этих сплавов представляет собой твёрдый раствор на базе олова. На фоне основной пластичной массы (твёрдого раствора сурьмы и меди в олове) расположены кристаллы интерметаллидного соединения SnSb и игольчатые кристаллы Cu_6Sn_5 (Cu_3Sn). Твёрдыми частицами являются кубические включения SnSb и игольчатые кристаллы включений Cu_3Sn .

В группу «избранных» легирующих элементов, кроме сурьмы и меди, были отобраны индий и висмут.

В настоящей работе представлены результаты исследований содержания индия на свойства оловянных сплавов для художественного литья по причине его существенного влияния на прочностные свойства, коррозионную стойкость, цвет и, главное, на способность придавать зеркальный блеск и внешнее «благородство» оловянным сплавам.

Анализ патентных и литературных данных показал [12]: добавка индия к оловянным подшипниковым сплавам повышает их прочность, твёрдость, увеличивает коррозионную стойкость. Имеются указания также о целесообразности применения индия в сплавах в качестве защитного антикоррозионного покрытия металлов. Присутствие индия улучшает смачиваемость оловянных сплавов при нанесении покрытий, например, золочении или серебрении. Индий входит в кристаллическую решетку матрицы олова в

качестве атомов раствора замещения, способствует упрочнению твердого раствора и повышению способности к предотвращению усталостного излома.

Известно, что добавки индия линейно увеличивают прочность оловянных сплавов вплоть до концентраций 8 - 12%.

Что касается содержания компонентов в сплаве.

Анализ известных составов оловянных сплавов для художественного литья системы Sn – Sb – Cu показал: среднее содержание сурьмы в этих сплавах составляет 5 — 10%, меди — 1 — 8%.

Из анализа патентной информации, касающейся производства оловянных подшипниковых сплавов установлено: оптимальное содержание сурьмы в оловянных (безсвинцовых) сплавах, обеспечивающее максимальные значения технологических свойств сплавов, составляет 6 – 12%, при содержании меди 5— 6%.

Относительно оловянных сплавов с индием.

Авторам не известны составы оловянных сплавов для художественного литья, легированных индием. Согласно имеющимся данным, содержание индия в подшипниковых сплавах может составлять 0,03 — 0,5%, в припоях — от 0,025 — до 12%.

Исследования указанной системы сплавов на предмет определения оптимального диапазона концентрации компонентов, проведенные в лаборатории Владимирского государственного университета показали, что оптимальным комплексом технологических, прочностных, экологических и эстетических свойств обладают оловянные сплавы для художественного литья с содержанием сурьмы от 4 до 10%, меди от 0,5 — 4%, индия от 0,5 — до 9,0% [13].

В частности, установлено, что присадки сурьмы менее 4% не приводят к существенному упрочнению оловянных сплавов, а увеличение концентрации сурьмы более 10% не целесообразно, поскольку способствуют значительному повышению температуры плавления сплавов и усложнению технологического процесса производства отливок.

Присадка меди менее 0,5% не способна существенным образом повлиять не на прочность оловянных сплавов, не на седиментационную устойчивость частиц SnSb, а увеличение концентрации меди более 4% не целесообразно, поскольку не способствует эффективному повышению свойств сплавов, а вместе с сурьмой приводит к значительному увеличению их температур плавления.

Ввод присадки индия менее 0,5% не даёт значимого эффекта, а увеличение концентрации индия в сплаве более 9,0 % не экономично и не целесообразно, поскольку, с одной стороны, значительно удорожает сплав, а, с другой, - не способствует желаемому увеличению прочности раствора и расходуется на образование избыточной γ -фазы.

Выборочные исследования прочностных свойств сплавов системы Sn–Sb–Cu–In в указанном диапазоне концентраций компонентов путём измерения прочности на изгиб показали: ввод присадки индия в количестве от 5% до 9% способствует повышению прочности оловянного сплава Sn – 10%Sb – 2%Cu, близкого по химическому составу с «британским металлом», с 200МПа до 290МПа и 320МПа соответственно, т.е. на 20 -37%.

Присадки индия повышают твёрдость оловянных сплавов. Однако, влияние индия на твёрдость указанного сплава неоднозначно. Ввод присадки индия в количестве 5% способствует повышению твёрдости сплава со 155НВ до 185НВ, т.е. на 16%. Дальнейшее увеличение концентрации индия до 9% не способствует существенному повышению твёрдости сплава, а наоборот, некоторому снижению - до 170НВ.

В результате проведённых исследований авторами была подана заявка и получен патент на оловянный сплав для художественного литья [23], который наряду с оловом, сурьмой и медью дополнительно содержит индий при следующем соотношении компонентов: олово 95,0 — 77,0%, сурьма 4 – 10%, медь 0,5 – 4%, индий 0,5 – 9,0%.

Таким образом, разработаны научные основы и методика синтеза экологически чистых, стабильных в естественных условиях земного климата оловянных сплавов с повышенными художественными, эстетическими и литейными свойствами, а также стойкостью к окислению.

Предложен состав нового оловянного сплава системы олово-сурьма-медь с индием, обладающий, высокими литейными свойствами и, при внешнем «благородстве», с устойчивым к окислению зеркальным блеском, повышенной прочностью и твёрдостью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н.И. Бех. Технология художественного литья / Бех Н.И., М.А. Иоффе, О.Н. Магницкий, Санкт-Петербург, издательство Политехнического университета, 2006.
2. Н.И. Бех. Изготовления художественных отливок / В.А. Васильев, Н.И. Бех, Э.Ч. Гини М.: Интермет Инжиниринг, 2001.
3. Деев В.Б., Рахуба Е.М., Сметанюк С.В., Пономарёва К.В., Приходько О.Г. Использование сплавов на основе олова для изготовления художественного литья. //В сборнике «Современные технологии в машиностроении и литейном производстве». Материалы III междунар. науч.-практ. конф. Чебоксары; Чуваш. гос. ун-т, 2017. с.28-32.
4. Дергачёва Н. П. Олово//Химическая энциклопедия: в 5 т/ Кнунянц И. Л. (гл. ред.).—М.: Большая Российская энциклопедия, 1992.— Т. 3: Мед—Пол.— 639с.—48000 экз.—ISBN 5-85270-039-8.
5. Бочвар А.А. Металловедение [Текст] / А.А.Бочвар. - М.: Металлургиздат, 1956. - 495 с.
6. Гуляев Б.Б. Синтез сплавов. - М.: Металлургия, 1984.- 160 с.
7. Воздвиженский В.М. Литейные сплавы и технология их плавки в машиностроении: Учеб. пособие для машиностроительных вузов [Текст] / В.М. Воздвиженский, В.А. Грачёв, В.В. Спасский. - М.: Машиностроение, 1984. – 432 с.
8. Кечин В.А. Теория и технология литых протекторных материалов: монография [Текст] / В.А. Кечин. - Владимир: Владимирский государственный университет (ВлГУ), 2004. — 180 с.
9. Захаров А.М. Промышленные сплавы цветных металлов. Фазовый состав и структурные составляющие. 1980.
10. Гущенко А.Н. Закономерности формирования структуры и свойств оловянных баббитов в зависимости от способов литья. Дисс. к.т.н.,Екатеринбург, 2006.
11. Барыкин Н.П., Садыков Ф.А., Даниленко В.Н., Асланян И.Р. К вопросу о структуре баббита Б83 // Металловедение. 2001. №8. С. 24 — 27.
12. Свойства элементов: Справ. изд./Под ред. Дрица М.Е. - М.: Металлургия, 1985. - 672 с.
13. Сухорукова Е.В., Шаршин В.Н., Середа Е.В. Исследование и разработка новых составов оловянных сплавов художественного назначения//В сборнике «Литые материалы и ресурсосберегающие технологии. Материалы науч.-техн.конф., посвящ. 50-летию каф.

«Литейные процессы и конструкционные материалы». 9 — 12 дек. 2013 г. - Изд-во ВлГУ, 2014. с.143-146.

14. Оловянный сплав для художественного литья: патент № 2538065. Российская Федерация: МПК С22С 13/00 / Шаршин В.Н., Сухорукова Е.В., Середа Е.В., Сухоруков Д.В., Кечин В.А., заявитель и патентообладатель ООО «КЛИО», опубл. 10.01.2015 г.

АВТОРЫ

Шаршин В.Н. - ВлГУ, 600000, г. Владимир, ул. Горького,87, Россия, +7 (4922) 479821, lpikm@vlsu.ru

Сухорукова Е.В. - ВлГУ, 600000, г. Владимир, ул. Горького,87, Россия, +7 (4922) 479821, lpikm@vlsu.ru

Сухоруков Д.В. - ВлГУ, 600000, г. Владимир, ул. Горького,87, Россия, +7 (4922) 479821, lpikm@vlsu.ru

Кечин В.А. - ВлГУ, 600000, г. Владимир, ул. Горького,87, Россия, +7 (4922) 479821, lpikm@vlsu.ru

THE AUTHORS

Sharshin V.N. VSU, 600000, Vladimir, Gorkova str. 87, Russia+7 (4922) 479821, lpikm@vlsu.ru

Sukhorukova E.V. VSU, 600000, Vladimir, Gorkova str. 87, Russia+7 (4922) 479821, lpikm@vlsu.ru

Sukhorukov D.V. VSU, 600000, Vladimir, Gorkova str. 87, Russia+7 (4922) 479821, lpikm@vlsu.ru

Kechin V.A. VSU, 600000, Vladimir, Gorkova str. 87, Russia+7 (4922) 479821, lpikm@vlsu.ru

**ЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ
МОДИФИЦИРОВАННОЙ СТРУКТУРЫ В ЛИТЕЙНЫХ
АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ**

**EFFECTIVE TECHNOLOGIES OF OBTAINING MODIFIED STRUCTURE
IN CAST ALUMINUM ALLOYS**

**ДЕЕВ В.Б.¹, ПРУСОВ Е.С.², СМЕТАНЮК С.В.¹, ПРИХОДЬКО О.Г.³,
ПОНОМАРЕВА К.В.³, СОКОРЕВ А.А.¹**

¹(Национальный исследовательский технологический университет
«МИСиС», г. Москва, Россия)

²(Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых,
г. Владимир, Российская Федерация)

³(Сибирский государственный индустриальный университет
г. Новокузнецк, Россия)

**DEEV V.B.¹, PRUSOV E.S.², SMETANYUK S.V.¹, PRIKHODKO O.G.³,
PONOMAREVA K.V.³, SOKOREV A.A.¹**

¹(NUST "MISiS", Moscow, Russia)

²(Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russia)

³(Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia)

Аннотация. Проведен краткий анализ существующих в настоящее время основных эффективных модификаторов структуры литейных алюминиевых сплавов.

Abstract. In the article were analyzed the existing at present the main effective modifiers of the structure of cast aluminum alloys.

Ключевые слова: модифицирование, структура, алюминиевые сплавы, технология обработки расплава

Keywords: modification, structure, aluminum alloys, melt processing technology

При литье металлов и сплавов в основном применяют модифицирование добавкой элементов-модификаторов, которое является универсальным, относительно дешевым, технологически гибким и высокоэффективным методом управления структурой кристаллизующегося сплава [1]. Модифицирование является важнейшей технологической операцией в процессе приготовления алюминиевых сплавов и проводится в целях улучшения структуры, получения сплавов с необходимыми эксплуатационными свойствами, что достигается измельчением структурных составляющих литого сплава, α -твердого раствора, первичных кристаллов кремния и эвтектики.

Измельчение структурных составляющих литого сплава может быть достигнуто двумя основными путями: 1) регулированием процесса образования

в расплаве зародышей новой фазы; 2) воздействием на кинетические параметры процесса роста кристаллов новой фазы.

Согласно предложенной П.А. Ребиндером [2] классификации модификаторов, вводимых в расплав, все многообразие модифицирующих добавок сведено к двум основным группам. К первой группе, или к модификаторам первого рода, относят такие вещества, которые в расплаве образуют высокодисперсную коллоидную взвесь. Отдельные частицы этой взвеси являются зародышами, вокруг которых образуются и растут кристаллы. Для металлических расплавов такими модификаторами могут быть тугоплавкие металлы или их соединения, а также интерметаллиды, частицы которых могут находиться во взвешенном состоянии в предкристаллизационный период. Ко второй группе, или модификаторам второго рода, относятся элементы или их соединения, которые могут адсорбироваться на гранях зарождающихся кристаллов и тормозить их рост. Адсорбция не происходит на всех гранях равномерно, вследствие этого задерживаются в развитии отдельные грани кристалла, что приводит к изменению его формы. Кроме того, замедление скорости роста кристаллов сопровождается увеличением числа центров кристаллизации и повышением дисперсности структуры.

К группе поверхностно-активных примесей, измельчающих эвтектику в алюминиевых сплавах, в частности – силуминах, относится натрий. Модифицирующее действие натрия на алюминий-кремниевые сплавы объясняют с позиций теории переохлаждения и адсорбционно-коллоидной теории [3]. При этом в работе [3] указывается, что эвтектика модифицированного натрия (в количестве 0,05 %) сплава состоит из отдельных зерен – сферолитов, а «ведущей кристаллизацией фазой» является кремний. При введении в расплав большого (0,08...0,1 %) количества натрия ведущая роль принадлежит алюминию, а сферолиты представляют собой дендриты алюминия, захватившие в процессе роста кристаллы кремния. Однако, как отмечают авторы работы [4], размер эвтектических зерен увеличивается практически пропорционально содержанию натрия. Для нейтрализации такого вредного влияния натрия и кальция предлагается [4] вводить сурьму, висмут, фосфор или элементы, стимулирующие процесс зарождения и рост дендритов твердого раствора, например, титан и бор. Взаимодействие натрия с фосфором исследовали в работе [5], при этом было выявлено, что соединения натрия с фосфором препятствуют эпитаксиальному нарастанию кремния, что приводит к возникновению модифицированной структуры.

Сначала для модифицирования силуминов применяли фтористый натрий, металлический натрий или его соединения, дающие надежный эффект измельчения эвтектического кремния в этих сплавах, о чем свидетельствуют исследования Г.В. Строганова с сотр., М.В. Мальцева, Л.Ф. Мондольфо [5 – 7], но из-за неравномерного распределения натрия в расплаве эти способы не нашли широкого применения.

Модифицирование солями позволяет получать более чистые сплавы, чем модифицирование натрием. В литейных цехах машиностроительных предприятий широко используется универсальный флюс: (30 % NaF + 50 %

NaCl + 10 % KCl + 10 % Na₃AlF₆) либо флюс (40–60 % NaF + 25–45 % NaCl + 15 % Na₃AlF₆), который обеспечивает одновременное рафинирование и модифицирование расплава, а также двойной модификатор (67 % NaF + 33 % NaCl) и легкоплавкий тройной модификатор (25 % NaF + 62,5 % NaCl + 12,5 % KCl) [5, 6]. Модифицирование силуминов заключается в том, что небольшие добавки натрия к сплаву вызывают сильное измельчение зерна. Натрий располагается на поверхности кластеров, служащих при определенных условиях центрами кристаллизации, и препятствует присоединению атомов к ним из разупорядоченной зоны. Происходящая в этом процессе сфероидизация кристаллов вызывает повышение механических свойств сплавов, в то время как в немодифицированных силуминах кристаллы выделяются в форме грубых игл или пластин, что вызывает снижение пластических свойств сплавов.

Однако при модифицировании силуминов натрием и его солями существует опасность получения не полностью модифицированной или перемодифицированной структуры, возможны снижение жидкотекучести расплава, повышенная склонность к газопоглощению. Но основным недостатком является ограниченное время выдержки расплава после ввода модификатора (обычно до 30 мин). Это связано с испарением и окислением легкоплавкого натрия и особенно неблагоприятно для серийного и массового производства литья из раздаточных печей, в которых обработанный натрийсодержащими флюсами расплав обеспечивает полностью модифицированную структуру лишь в начальный период разливки.

В настоящее время вместо натрия и его соединений широко применяют другие модификаторы алюминиевых сплавов, такие как бериллий, сурьма, барий, стронций и др. Существует достаточно много научных публикаций, посвященных особенностям модифицирования алюминиевых сплавов различными добавками и их влиянием на литейные, механические и служебные свойства [8 – 10].

На сегодняшний день модифицирование добавками имеет ряд недостатков, основными из которых являются отсутствие универсальности модификаторов, их экологическая небезопасность и относительно малое время действия. Нельзя не учитывать и факт изменения химического состава сплава после модифицирования, что в дальнейшем накладывает ряд ограничений по использованию данного сплава в последующих переплавах и создает необходимость проведения рафинирующих операций, которые требуют дополнительных затрат времени и денежных средств.

Выбор качества и количества модифицирующих добавок исследователи, как правило, осуществляют эмпирически, часто эти процессы не дифференцируются [11]. При использовании повышенного количества низкосортных материалов в шихте следует отметить, что в основном работы по модифицированию алюминиевых сплавов из вторичного сырья повторяют подобные работы, выполненные для сплавов из чушковых материалов.

Таким образом, согласно вышесказанному, имеются все возможности для проведения эффективного модифицирования алюминиевых сплавов с целью повышения механических и технологических свойств литых деталей.

Следует отметить, что в последнее время исследователи все большее внимание уделяют способам получения модифицированной структуры алюминиевых сплавов без введения специальных модифицирующих добавок [12 – 15]. Для этого используют различные внешние физические воздействия на расплавы при плавке и кристаллизации. К таким способам можно отнести тепловые воздействия (ТВО, ТСО, ВТОР и др. разновидности); а также различные виды электромагнитных воздействий [16 – 22]. В отличие от применения элементов-модификаторов, физические (внешние) воздействия на расплавы при плавке и кристаллизации позволяют получить модифицирующий эффект в сплавах с измельчением структуры и повышением механических свойств, без изменения химического состава [23 – 30]. В этой связи перспективы дальнейшего развития технологий модифицирования металлических расплавов во многом будут обусловлены созданием новых высокоэффективных методов

ЛИТЕРАТУРА

1. Давыдов С.В. Рынок модификаторов – хаос или развитие? / С.В. Давыдов, А.Г. Панов, А.Э. Корниенко // *Металлургия машиностроения*. 2006. № 3. С. 8-9.
2. Гуляев Б.Б. Теория литейных процессов / Б.Б. Гуляев. – Л.: Машиностроение, 1976. – 216 с.
3. Альтман М.Б. Плавка и литье легких сплавов / М.Б. Альтман, А.А. Лебедев, И.В. Чухров. – М.: *Металлургия*, 1969. – 680 с.
4. Влияние примесей на формирование сферолитов в алюминиевых литейных сплавах / А.В. Курдюмов, С.В. Инкин, В.Д. Белов и др. // *Интенсификация литейных процессов и улучшение качества литых заготовок в производстве экономичных профилей из цветных металлов и сплавов: Труды института «Гидроцветметобработка»*. – М.: *Металлургия*, 1986. С. 36.
5. Строганов Г.Б. Сплавы алюминия с кремнием / Г.Б. Строганов, В.А. Ротенберг, Г.Б. Гершман. – М.: *Металлургия*, 1977. – 272 с.
6. Мальцев М.В. Модифицирование структуры металлов и сплавов / М.В. Мальцев. – М.: *Металлургия*, 1964. – 214 с.
7. Мондольфо Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов / Л.Ф. Мондольфо. – М.: *Металлургия*, 1979. – 640 с.
8. Вахобов А.В. Стронций – эффективный модификатор силуминов / А.В. Вахобов, И.Н. Ганиев // *Литейное производство*. 2000. № 5. С. 28, 29.
9. Барий – новый модификатор силуминов / Т.Б. Каргаполова, Х.А. Махмадуллоев, И.Н. Ганиев, М.М. Хаклодов // *Литейное производство*. 2001. № 10. С. 9-10.
10. Белов В.Д. Плавка и литье заэвтектических силуминов / В.Д. Белов. – М.: МИСиС, 2003. – 85 с.
11. Ершов Г.С. Высокопрочные алюминиевые сплавы на основе вторичного сырья / Г.С. Ершов, Ю.Б. Бычков. – М.: *Металлургия*, 1979. – 192 с.
12. Деев В.Б. Влияние электромагнитных воздействий на свойства литейных алюминиевых сплавов / В.Б. Деев // *Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии*. 2011. №2. С. 117–122.
13. Деев В.Б. Развитие научных основ тепловых и электромагнитных воздействий на расплавы и разработка ресурсосберегающих технологий получения высококачественных отливок из алюминиевых сплавов. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольск-на-Амуре государственный технический университет, 2012. 35 с.

14. Деев В.Б. Влияние электрического тока на кристаллизацию алюминиевых сплавов, содержащих железо / В.Б. Деев, И.Ф. Селянин, Н.В. Башмакова и др. // *Литейщик России*. 2007. № 8. С. 12–15.
15. Селянин И.Ф. Рафинирование расплавов при использовании низкосортной шихты / И.Ф. Селянин, В.Б. Деев, А.П. Войтков, Н.В. Башмакова // *Литейщик России*. 2006. № 2. С. 18–20.
16. Деев В.Б. Влияние температурной обработки расплава и электрического тока на свойства алюминиевых сплавов / В.Б. Деев, И.Ф. Селянин, О.И. Нохрина, Н.В. Башмакова // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2008. № 4. С. 50–53.
17. Деев В.Б. Влияние различных тепловых и электромагнитных воздействий на процесс кристаллизации металлических расплавов / В.Б. Деев, Э.Х. Ри, Е.С. Прусов, О.Г. Приходько, К.В. Пономарева, А.И. Куценко // *Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии*. 2017. №39. С. 54-58.
18. Влияние температуры перегрева на распределение компонентов в структуре силумина / Э.Х. Ри, Хосен Ри, С.Н. Химухин, М.Е. Калугин // *Металлургия машиностроения*. 2010. № 5. С. 43–45.
19. Peng J., Jinyang Z., Haoran G., Zhongxi Y., Xinying T., Degang Z., Yan W., Min Z., Ningqiang S. Effect of melt superheating treatment on solidification structures of Al75Bi9Sn16 immiscible alloy // *Journal of Molecular Liquids*. 2017. Vol. 232. P. 457-461.
20. Deev V.B., Selyanin I.F., Ponomareva K.V., Yudin A.S., Tsetsorina S.A. Fast cooling of aluminum alloys in casting with a gasifying core // *Steel in translation*. 2014. T. 44. № 4. P. 253, 254.
21. Y. Zhang, D. Rabiger, B. Willers, S. Eckert. The effect of pulsed electrical currents on the formation of macrosegregation in solidifying Al-Si hypoeutectic phases // *International Journal of Cast Metals Research*. 2017. Vol. 30. P. 13-19.
22. Zhang, Y., Cheng, X., Zhong, H., (...), Song, C., Zhai, Q. Comparative study on the grain refinement of Al-Si alloy solidified under the impact of pulsed electric current and travelling magnetic field // *Metals*. 2016, 6, 170.
23. Bustos O., Ordoñez S., Colás R. Rheological and Microstructural Study of A356 Alloy Solidified under Magnetic Stirring // *International Journal of Metalcasting*. 2013. Vol. 7, Iss. 1, P. 29-37.
24. Deev V.B., Prusov E.S., Kutsenko A.I. Theoretical and Experimental Evaluation of the Effectiveness of Aluminum Melt Treatment by Physical Methods // *Metallurgia Italiana*. 2018. N. 2. P. 16–24.
25. W. Ma, G. Lv, Y. Zhang, Y. Lei, X. Yang. An efficient method to separate silicon from high-silicon aluminum alloy melts by electromagnetic directional solidification // *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 185. P. 389-398.
26. Nikitin K.V., Nikitin V.I., Timoshkin I.Yu., Glushchenkov V.A., Chernikov D.G. Melt treatment by pulsed magnetic fields aimed at controlling the structure and properties of industrial silumins // *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2016. 57 (3). pp. 202–210.
27. Ivanov Y.F., Alsaraeva K.V., Gromov V.E., Popova N.A., Konovalov S.V. Fatigue life of silumin treated with a high-intensity pulsed electron beam // *J. Surf. Invest. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2015. Vol. 9. Iss. 5. P. 1056–1059.
28. Ivanov Y.F., Alsaraeva K.V., Gromov V.E., Konovalov S.V., Semina O.A. Evolution of Al-19,4Si alloy surface structure after electron beam treatment and high cycle fatigue // *Mater. Sci. Technol. (UK)*. 2015. Vol. 31. Iss. 13a. P. 1523–1529.
29. Тимченко С.Л. Влияние электрического тока на кристаллизацию алюминиевого сплава / С.Л. Тимченко, Н.А. Задорожный // *Литейное производство*. 2005. № 9. С. 12-13.
30. Заббаров Р. Структурные изменения и свойства алюминиевых сплавов, обработанных магнитным полем / Р. Заббаров, А.М. Бибииков, В.М. Живодёров // *Металлургия машиностроения*. 2009. № 6. С. 25–27.

АВТОРЫ

Деев В.Б. – д.т.н., профессор кафедры «Литейные технологии и художественная обработка материалов» НИТУ «МИСиС».

Прусов Е.С. – к.т.н., доцент кафедры «Технологии функциональных и конструкционных материалов» ВлГУ, г. Владимир, Россия.

Сметанюк С.В. – ведущий инженер ЦИПТ НИТУ «МИСиС», г. Москва, Россия.

Приходько О.Г. – к.т.н., доцент кафедры менеджмента качества Сибирского государственного индустриального университета, г. Новокузнецк, Россия.

Пономарева К.В. – к.т.н., доцент кафедры менеджмента качества Сибирского государственного индустриального университета, г. Новокузнецк, Россия.

Сокорев А.А. – к.т.н., ассистент кафедры «Литейные технологии и художественная обработка материалов» НИТУ «МИСиС», г. Москва, Россия.

AUTHORS

Deev V.B. – Dr. Sci. Tech., Professor of the Department "Foundry technologies and art processing of materials" NUST "MISiS", Moscow, Russia.

Prusov E.S. – PhD, Assoc. Professor of the Department of Functional and Constructional Materials Technology, Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russia.

Smetanyuk S.V. – Leading Engineer of the NUST "MISiS", Moscow, Russia.

Ponomareva K.V. – PhD., Associate Professor of the Department of Quality Management, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.

Prikhodko O.G. – PhD., Associate Professor of the Department of Quality Management, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.

Sokorev A.A. – PhD., assistant of the Department "Foundry technologies and art processing of materials" NUST "MISiS", Moscow, Russia.

**ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ РАСПЛАВА НА
КРИСТАЛЛИЗАЦИЮ ЛИТЕЙНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ
СПЛАВОВ И КОМПОЗИТОВ**

**INFLUENCE OF MELT PROCESSING TECHNOLOGY FOR
CRYSTALIZATION OF FOUNDRY ALUMINUM
ALLOYS AND COMPOSITES**

**ДЕЕВ В.Б.¹, РИ Э.Х.², ПРУСОВ Е.С.³, СМЕТАНИЮК С.В.¹,
КУЦЕНКО А.И.⁴, РАХУБА Е.М.¹**

¹(Национальный исследовательский технологический университет
«МИСиС», г. Москва, Россия)

²(Тихоокеанский государственный университет г. Хабаровск, Россия)

³(Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых,
г. Владимир, Российская Федерация)

⁴(Сибирский государственный индустриальный университет
г. Новокузнецк, Россия)

**DEEV V.B.¹, RI E.H.², PRUSOV E.S.³, SMETANYUK S.V.¹,
KUTSENKO A.I.⁴, RAKHUBA E.M.¹**

¹(NUST "MISiS", Moscow, Russia)

²(Pacific State University, Khabarovsk, Russia)

³(Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russia)

⁴(Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia)

Аннотация. Проведен расчет параметров кристаллизации литейных алюминиевых сплавов, обработанных тепловыми и электромагнитными воздействиями. Показаны перспективы применения разработанной методики для прогнозирования параметров кристаллизации литых металломатричных композитов.

Abstract. The calculation of the crystallization parameters of cast aluminum alloys treated with thermal and electromagnetic effects was made. The prospects of applying the developed methodology for predicting the crystallization parameters of cast metal matrix composites are shown.

Ключевые слова: кристаллизация, структура, алюминиевые сплавы, математическая модель

Keywords: crystallization, structure, aluminum alloys, mathematical model

Процесс кристаллизации литейных сплавов в значительной степени определяет качество получаемых из них отливок. Вычисление некоторых кристаллизационных параметров позволит судить об эффективности применяемых технологий получения сплавов, а также оптимизировать

процессы обработки расплавов в процессе плавки и литья для повышения технологических и эксплуатационных свойств изделий.

В работе [1] была предложена математическая модель для расчета критического радиуса зародыша кристаллизации (r_k) и определения количества (n_0) данных зародышей в единице объема расплава.

Согласно модели, r_k и n_0 можно определить следующим образом:

$$r_K = \frac{3J \cdot \frac{\Delta W}{e} \cdot T_0}{\rho \cdot L} \left(\frac{\Delta T}{\Delta \tau} \right)^{-1}, \quad (1); \quad n_0 = \frac{N}{V_0} = \frac{3c \cdot \Delta T_{\text{пер}}}{4\pi \cdot L} \cdot \frac{1}{r_K^3}, \quad (2)$$

где J – импульс тока, который возникает при кристаллизации за счет перехода электронов с уровня ионизации свободного атома разупорядоченной зоны на уровень Ферми зародыша (кластера); ρ – плотность; L – удельная теплота кристаллизации расплава; $\frac{\Delta W}{e}$ – скачок потенциала на границе кластера с разупорядоченной зоной; T_0 – равновесная температура кристаллизации; $\Delta \tau$ – интервал времени зародышеобразования; $\frac{\Delta T}{\Delta \tau}$ – скорость охлаждения расплава в период зарождения кристаллов; N – общее количество зародышей; V_0 – объем расплава; c – теплоемкость; $\Delta T_{\text{пер}}$ – переохлаждение при фазовом переходе.

В дальнейшем по предлагаемой модели было разработано программное приложение [2]. Справочные данные по теплофизическим свойствам, необходимым для расчетов, заложены в базу данных программы. При расчете параметров кристаллизации учитывались экспериментальные значения переохлаждения расплава и интервала времени зародышеобразования, выявленные по кривым охлаждения.

В последнее время все большее внимание уделяется способам получения модифицированной структуры алюминиевых сплавов без введения специальных модифицирующих добавок [3-6]. Для этого используют различные внешние физические воздействия на расплавы при плавке и кристаллизации [7-10]. К таким способам относятся тепловые воздействия (температурно-временная обработка, температурно-скоростная обработка, высокотемпературная обработка расплава и др. разновидности); а также различные виды электромагнитных воздействий [11-21]. В отличие от применения элементов-модификаторов, физические (внешние) воздействия на расплавы при плавке и кристаллизации позволяют получить модифицирующий эффект в сплавах с измельчением структуры и повышением механических свойств, без изменения химического состава.

В работе [22] был проведен расчет r_k и n_0 для сплавов АК7ч, АК5М2, АМ5 (ГОСТ 1583-93). Результаты показали существенное влияние на процесс кристаллизации таких способов физических воздействий, как термовременная обработка (ТВО) и магнитное поле.

Большой интерес представляет изучение параметров r_k и n_0 в зависимости от качества применяемой шихты и различных способов физических воздействий на расплавы.

На рисунках 1, 2 представлены результаты расчетов с помощью программного приложения [2] для сплавов АК7ч, АК5М2, АМ5, полученных из различной шихты (образцы для исследования представляли из себя залитые в песчано-глинистые формы цилиндры длиной 300 мм и диам. 26 мм).

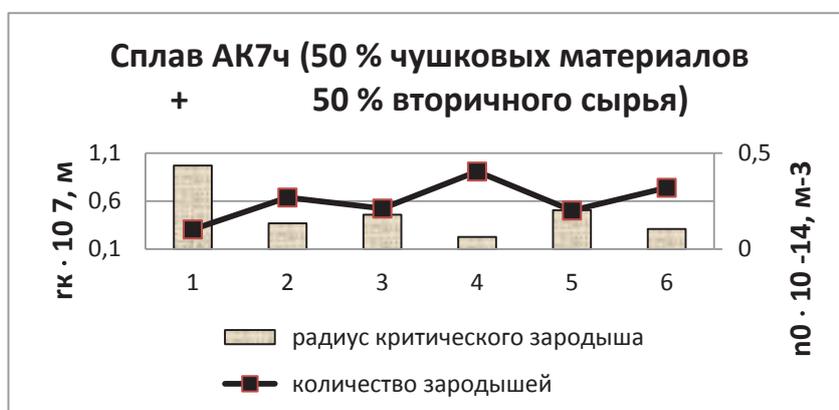
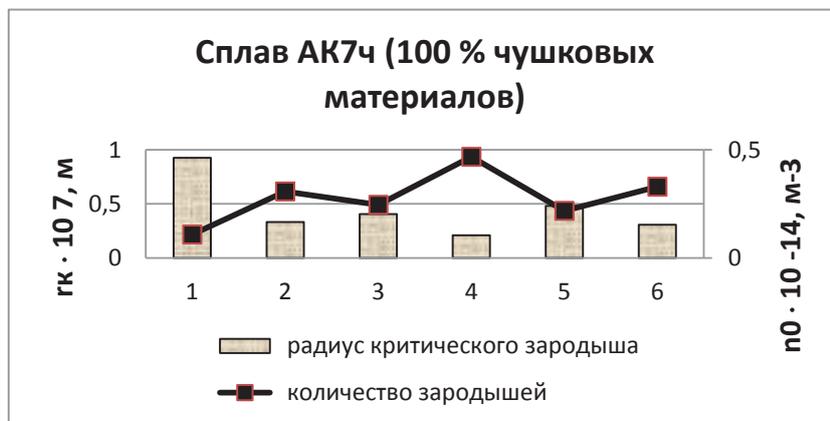


Рисунок 1 – Результаты расчета параметров кристаллизации сплава АК7ч в зависимости от состава шихты и вариантов обработки расплава:
 1 – исходный (без обработки); 2 – ТВО; 3 – магнитное поле; 4 – ТВО и магнитное поле; 5 – электрический ток; 6 – ТВО и электрический ток

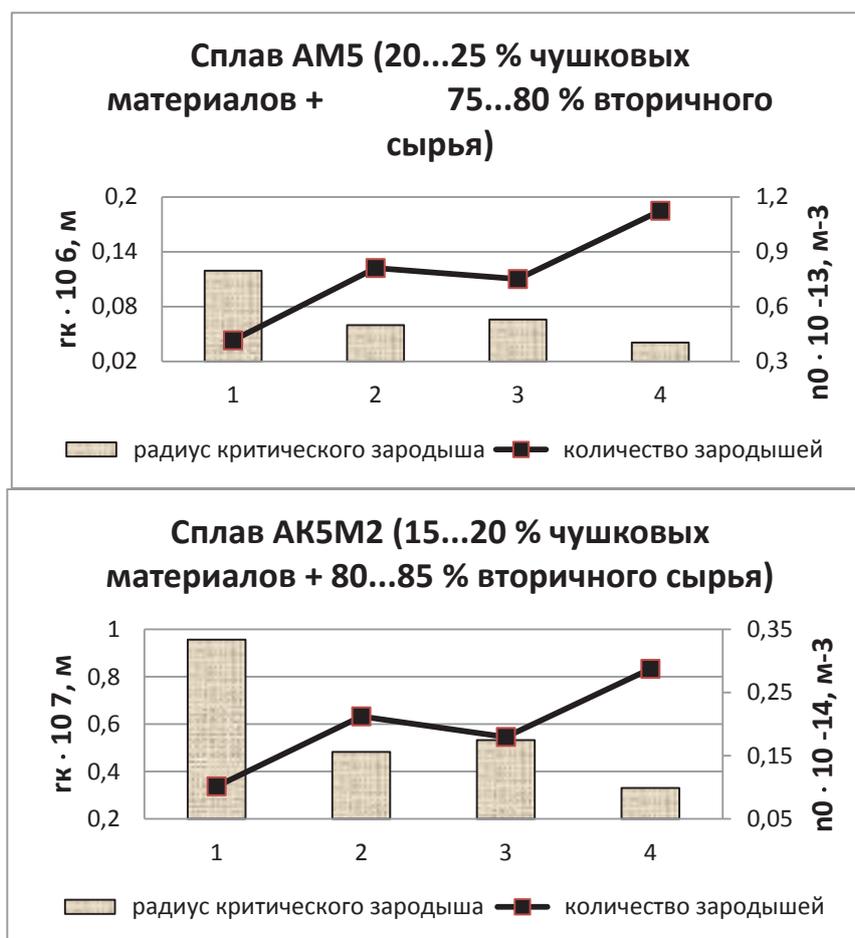


Рисунок 2 – Результаты расчета параметров кристаллизации сплавов AM5 и АК5М2 в зависимости от вариантов обработки расплава:
 1 – исходный (без обработки); 2 – ТВО; 3 – магнитное поле; 4 – ТВО и магнитное поле

В качестве физических воздействий применяли термовременную обработку (сплав АК7ч: $T = 970...1000 \text{ }^\circ\text{C}$, $\tau = 7...10$ мин – для 100 % чушковых материалов в шихте; $T = 1000...1030 \text{ }^\circ\text{C}$, $\tau = 10...12$ мин – для 50...100 % вторичного сырья в шихте; сплав АК5М2: $T = 970...990 \text{ }^\circ\text{C}$, $\tau = 8...10$ мин; сплав AM5: $T = 950...970 \text{ }^\circ\text{C}$, $\tau = 7...10$ мин), магнитное поле при заливке (с градиентом 0,886 Тл/м) согласно методике [23], электрический ток при кристаллизации ($j = 1,6 \cdot 10^5 \text{ А/м}^2$) [24], а также их комплексное воздействие.

Результаты экспериментальных данных (ТА, ДТА) и расчетов (рисунки 1, 2) показали, что обработка расплавов физическими воздействиями (особенно в комплексе) приводит к увеличению интервала времени зародышеобразования, уменьшению r_k и увеличению n_0 . В результате в сплавах формируется мелкозернистая структура, что было подтверждено металлографическими исследованиями. Необходимо обратить внимание, что физические воздействия оказали более сильный модифицирующий эффект на сплавы из шихты с повышенным содержанием вторичного сырья.

Предлагаемая методика расчета основных параметров кристаллизации расплавов может быть успешно применима в производственных условиях при оценке эффективности технологий получения отливок с требуемым уровнем свойств.

Перспективным направлением развития изложенных подходов к прогнозированию параметров кристаллизации может являться их адаптация к литым металломатричным композитам [25-27]. В частности, модифицирующая обработка композиционных сплавов на основе цветных металлов, армированных эндогенными фазами (TiB_2 , TiC , Al_3Ti , Mg_2Si и др.), целесообразна не только с позиций улучшения микро- и макроструктуры матрицы, но и в аспекте управления морфологическими характеристиками формирующихся армирующих частиц. С учетом значительного потенциала использования физических методов обработки расплавов для модифицирования композитов, разработка надежных расчетных моделей оценки эффективности такой обработки позволит выбирать наиболее рациональные технологические режимы получения композиционных сплавов с заданными свойствами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Деев В.Б. Прогнозирование процесса кристаллизации металлических расплавов для повышения качества литья / Деев В.Б., Селянин И.Ф., Цецорина С.А., Дмитриевская О.Е. // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии. 2010. №25. С. 33–37.
2. Свидетельство РФ о государственной регистрации программ для ЭВМ №2009613765. Расчет параметров кристаллизации расплава после обработки внешними воздействиями / В.Б. Деев, С.А. Цецорина, И.Ф. Селянин // Заявка №2009612649. Приоритет 14 июля 2009 г.
3. Деев В.Б. Влияние электромагнитных воздействий на свойства литейных алюминиевых сплавов / В.Б. Деев // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии. 2011. №27. С. 117–122.
4. Деев В.Б. Развитие научных основ тепловых и электромагнитных воздействий на расплавы и разработка ресурсосберегающих технологий получения высококачественных отливок из алюминиевых сплавов. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольск-на-Амуре государственный технический университет, 2012. 35 с.
5. Деев В.Б. Влияние электрического тока на кристаллизацию алюминиевых сплавов, содержащих железо / В.Б. Деев, И.Ф. Селянин, Н.В. Башмакова и др. // Литейщик России. 2007. № 8. С. 12–15.
6. Селянин И.Ф. Рафинирование расплавов при использовании низкосортной шихты / И.Ф. Селянин, В.Б. Деев, А.П. Войтков, Н.В. Башмакова // Литейщик России. 2006. № 2. С. 18–20.
7. Деев В.Б. Влияние температурной обработки расплава и электрического тока на свойства алюминиевых сплавов / В.Б. Деев, И.Ф. Селянин, О.И. Нохрина, Н.В. Башмакова // Заготовительные производства в машиностроении. 2008. № 4. С. 50–53.
8. Peng J., Jinyang Z., Naoran G., Zhongxi Y., Xinying T., Degang Z., Yan W., Min Z., Ningqiang S. Effect of melt superheating treatment on solidification structures of Al75Bi9Sn16 immiscible alloy // Journal of Molecular Liquids. 2017. Vol. 232. P. 457-461.
9. Li Q.L., Xia T.D., Lan Y.F., Li P.F. Effects of melt superheat treatment on microstructure and wear behaviours of hypereutectic Al-20Si alloy // Materials Science and Technology. 2014. 30 (7), P. 835-841.
10. Yang W., Yang X., Ji S. Melt superheating on the microstructure and mechanical properties of diecast Al-Mg-Si-Mn alloy // Metals and Materials International. 2015, Vol. 21, Iss. 2, pp 382–390.
11. Деев В.Б. Влияние различных тепловых и электромагнитных воздействий на процесс кристаллизации металлических расплавов / В.Б. Деев, Э.Х. Ри, Е.С. Прусов, О.Г. Приходько,

- К.В. Пономарева, А.И. Куценко // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии. 2017. №39. С. 54-58.
12. Ivanov Y.F., Alsaraeva K.V., Gromov V.E., Popova N.A., Konovalov S.V. Fatigue life of silumin treated with a high-intensity pulsed electron beam // *J. Surf. Invest. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2015. Vol. 9. Iss. 5. P. 1056–1059.
 13. Ivanov Y.F., Alsaraeva K.V., Gromov V.E., Konovalov S.V., Semina O.A. Evolution of Al-19,4Si alloy surface structure after electron beam treatment and high cycle fatigue // *Mater. Sci. Technol. (UK)*. 2015. Vol. 31. Iss. 13a. P. 1523–1529.
 14. Y. Zhang, D. Rabiger, B. Willers, S. Eckert. The effect of pulsed electrical currents on the formation of macrosegregation in solidifying Al-Si hypoeutectic phases // *International Journal of Cast Metals Research*. 2017. Vol. 30. P. 13-19.
 15. Zhang, Y., Cheng, X., Zhong, H., (...), Song, C., Zhai, Q. Comparative study on the grain refinement of Al-Si alloy solidified under the impact of pulsed electric current and travelling magnetic field // *Metals*. 2016, 6, 170.
 16. Bustos O., Ordoñez S., Colás R. Rheological and Microstructural Study of A356 Alloy Solidified under Magnetic Stirring // *International Journal of Metalcasting*. 2013. Vol. 7, Iss. 1, P. 29-37.
 17. Wang X., Luo X., Cong F., Cui J. Research progress of microstructure control for aluminium solidification process // *Chinese Science Bulletin*. 2013. Vol. 58, Iss. 4–5, P. 468–473.
 18. Ma W., Lv G., Zhang Y., Lei Y., Yang X. An efficient method to separate silicon from high-silicon aluminum alloy melts by electromagnetic directional solidification // *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 185, P. 389-398.
 19. Nikitin K.V., Nikitin V.I., Timoshkin I.Yu., Glushchenkov V.A., Chernikov D.G. Melt treatment by pulsed magnetic fields aimed at controlling the structure and properties of industrial silumins // *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2016. 57 (3). pp. 202–210.
 20. Rabiger D., Zhang Y., Galindo V., Franke S., Willers B., Eckert S. The relevance of melt convection to grain refinement in Al-Si alloys solidified under the impact of electric currents // *Acta Materialia*. 2014. Vol. 79. P. 327-338.
 21. Proadhan A. Semi-Solid Processing by Electric Current During Sand Casting of Aluminium Alloys // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 115 (2016) 012005.
 22. Деев В.Б. Математическое моделирование процесса кристаллизации металлических расплавов после обработки внешними воздействиями / В.Б. Деев, И.Ф. Селянин, С.П. Мочалов и др. // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2009. № 10. С. 3–5.
 23. Цецорина С.А. Исследование влияния магнитного поля на свойства литейных алюминиевых сплавов и разработка ресурсосберегающей технологии их получения. Автор-т дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. – Новокузнецк: СибГИУ, 2008. 19 с.
 24. Башмакова Н.В. Исследование влияния электрического тока на свойства алюминиевых сплавов с повышенным содержанием железа. Автор-т дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. – Новокузнецк: СибГИУ, 2007. 18 с.
 25. Панфилов А.В., Прусов Е.С. О получении и свойствах комплексно-армированных композиционных материалов с алюминиевой матрицей // *Литейное производство*. 2008. № 8. С. 1-9.
 26. Prusov E.S., Panfilov A.A. Properties of cast aluminum-based composite alloys reinforced by endogenous and exogenous phases // *Russian metallurgy (Metally)*. 2011. Т. 2011. № 7. С. 670-674.
 27. Прусов Е.С., Панфилов А.А., Кечин В.А. Роль порошковых прекурсоров при получении композиционных сплавов жидкофазными методами // *Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2016. № 2. С. 47-58.

АВТОРЫ

Деев В.Б. – д.т.н., профессор кафедры «Литейные технологии и художественная обработка материалов» НИТУ «МИСиС», г. Москва, Россия.

Ри Э.Х. – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Литейное производство и технологии металлов» Тихоокеанского государственного университета, г. Хабаровск, Россия.

Прусов Е.С. – к.т.н., доцент кафедры «Технологии функциональных и конструкционных материалов» ВлГУ, г. Владимир, Россия.

Сметанюк С.В. – ведущий инженер ЦИПТ НИТУ «МИСиС», г. Москва, Россия.

Куценко А.И. – к.т.н., доцент, начальник Управления научных исследований Сибирского государственного индустриального университета, г. Новокузнецк, Россия.

Рахуба Е.М. – ассистент кафедры «Литейные технологии и художественная обработка материалов» НИТУ «МИСиС», г. Москва, Россия.

AUTHORS

Deev V.B. – Dr. Sci. Tech., Professor of the Department "Foundry Technologies and Art Processing of Materials" NUST "MISiS", Moscow, Russia.

Ri E.H. – Dr. Sci. Tech., Professor, Head of the Department of Foundry Engineering and Metal Technologies, Pacific National University, Khabarovsk, Russia.

Prusov E.S. – PhD, Assoc. Professor of the Department of Functional and Constructional Materials Technology, Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russia.

Smetanyuk S.V. – Leading Engineer of the NUST "MISiS", Moscow, Russia.

Kutsenko A.I. – PhD., Associate Professor, Head of the Department of Scientific Research, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.

Rakhuba E.M. – Assistant of the Department "Foundry Technologies and Art Processing of Materials" NUST "MISiS", Moscow, Russia.

**ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ ЛИТЫХ ЗАГОТОВОК
ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ СЦЕПЛЕНИЯ НОВОГО ТИПА**

**APPLICATION OF HIGH-QUALITY LITHIUM CASINGS FOR CLUTCHES
OF NEW TYPE**

БАТЫШЕВ К.А. (МГТУ им. Н.Э. Баумана)
ГЕОРГИЕВСКИЙ М.Г. (НПО Гидравлика)
СЕМЕНОВ К.Г. (МГТУ им. Н.Э. Баумана)
ЗЕРКАЛОВ Г. Л. (Стэнфордский университет, США)
BATYSHEV K.A. (MSTU. Bauman)

BATYSHEV K.A. (MSTU. Bauman)
GEORGIEVSKY M.G. (NPO Hydraulics)
SEMENOV K.G. (MSTU. Bauman)
ZERKALOV G.L. (Stanford University, USA)

***Аннотация.** Использование в производстве заготовок полученных с высокими механическими свойствами позволяет создавать новые типы сцепления лишенной недостатков традиционных трансмиссий.*

***Abstract.** The use of blanks obtained with high mechanical properties in production allows creating new types of adhesion free from the drawbacks of traditional transmissions.*

***Ключевые слова:** отливки, литье с кристаллизацией под давлением, гидрообъемное сцепление, двигатели внутреннего сгорания, плотность, термообработка, алюминиевые сплавы, вискомуфты, надежность.*

***Key words:** castings, molding with crystallization under pressure, hydrostatic coupling, internal combustion engines, density, heat treatment, aluminum alloys, viscous coupling, reliability.*

Выбор материалов для деталей насосов и гидравлического сцепления, а также обеспечение их работоспособности в несмазывающей среде является одной из главных задач при создании агрегатов [4]. Особые требования предъявляются к секционному торцевому уплотнению, контактирующему с торцами венцов пар шестерен. Одним из вариантов применяемых материалов является медистый силумин с добавками свинца, разработанный специалистами МГОУ - МГТУ им. Н.Э. Баумана и ОАО "Гидромаш", а наиболее приемлемым способом изготовления заготовок для деталей торцевого уплотнения (втулок и компенсаторов) с заданными антифрикционными свойствами – технологический процесс литья с кристаллизацией под давлением [1].

На рис. 1 приведены зависимости механических свойств (a_B , 8, $HВ$) и среднего коэффициента трения $f_{ср}$ медистого силумина АК7М6 от количества

добавок свинца в расплаве [5]. Отливки изготовляли способом литья с кристаллизацией под давлением 160 и 240 МПа. Видно, что с увеличением количества добавки свинца в расплаве прочностные характеристики сплава в отливках незначительно снижаются, пластические – повышаются, а коэффициент трения остается практически постоянны [7].. Однако вводить добавку свинца в количестве свыше 4 % в сплав АК7М6 нежелательно, так как повышается склонность последнего к обратной ликвации, в результате чего усвоение свинца резко снижается [6]. Например, при добавке свинца в расплав в количестве 4 % его усвоение составляет около 45 %, а при добавке 10 % — 22,5 %.

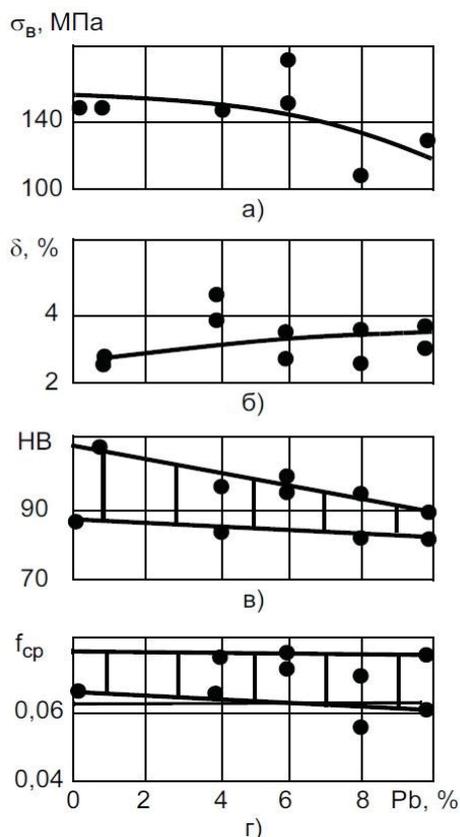


Рис. 1. Зависимость механических свойств отливок (а–в) и среднего коэффициента трения (г) от количества добавки свинца в сплав АК7М6

На сегодняшний день совершенствование сцеплений проводится путём совершенствования конструкции, добавления новых дисков, разработки более стойких к истиранию антифрикционных композитных материалов, более тщательным поддержанием температурных условий эксплуатации и гидрофицированием [2].

НПО Гидравлика совместно с Elumee Technology занимаются разработкой новых конструкций узлов силовых трансмиссий машин различного назначения, в том числе, на базе гидромашин объёмного принципа действия. Одна из последних разработок предназначена для замены фрикционного сцепления на гидравлическое или гидрообъёмное, в котором впервые в мире предложена высокоэффективная конструкция для передачи крутящего момента без трения.

Это особенно актуально для тяжелых высоконагруженных машин и механизмов, так как повышение энергонасыщенности силовых установок создаёт проблемы в передаче крутящего момента от привода к трансмиссии рабочего органа из-за несовершенства конструкций сцеплений фрикционного типа. Чем выше передаваемый крутящий момент, тем сложнее расчёт и конструкция муфты сцепления и тем непредсказуемые её работоспособность и долговечность из-за больших износов в парах трения, зависящих от множества причин, в т.ч. и от температурных условий эксплуатации.

Конструкция гидрообъемного сцепления идентична конструкции многосекционного насоса планетарной компоновки с двумя ведомыми шестернями. Ведущая и ведомые шестерни сборной конструкции размещены в расточках корпуса, жестко соединённым с маховиком двигателя. Центральная шестерня по шлицевой посадке соединена с входным валом коробки передач. В корпусе сцепления выполнены замкнутые полости всасывания и нагнетания, соединенные между собой осевыми дросселями, управляемые штатной нажимной пластиной, установленной на штатном нажимном подшипнике.

Общий вид сцепления представлен на рис. 2. Сцепление состоит из крышки (1) с корпусом (2) водила, жестко соединенного с маховиком двигателя, сателлитов (3), установленных на валах (4), и солнечной шестерни (5), жестко соединенной с первичным валом (6) коробки переключения передач. Торцевое уплотнение секции насоса, образованной зацеплением солнечной шестерни (5) с сателлитом (3), осуществляется компенсатором (8) и манжетой (9), установленной в компенсаторе.

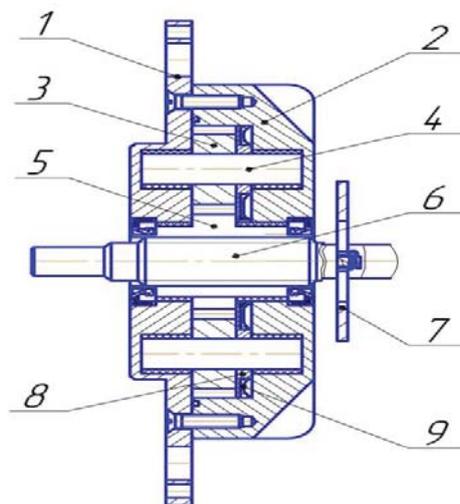


Рис. 2. Общий вид гидрообъемного сцепления

На рис. 3 изображено гидрообъемное сцепление в поперечном разрезе. Нажимная пластина (7), не показанная на данном виде, кинематически соединенная через штатный выжимной подшипник серийного сцепления с педалью сцепления, обеспечивает соединение или изоляцию между собой полостей высокого (ВД) и низкого давления (НД), образованных зацеплением солнечной шестерни (5) с сателлитами (3).

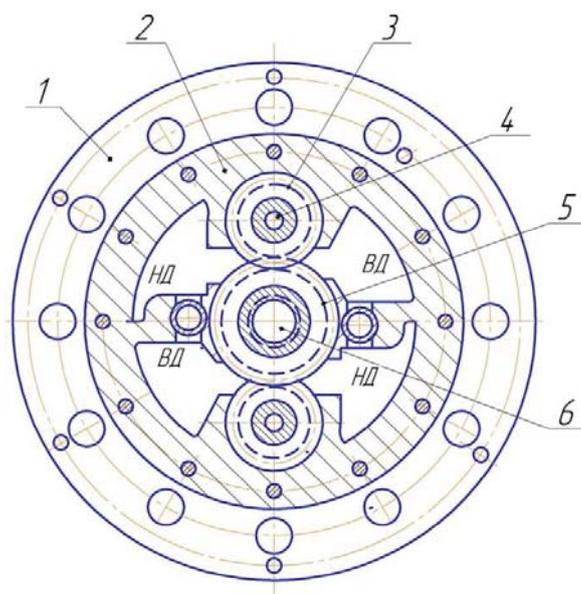


Рис. 3. Гидрообъемное сцепление в поперечном разрезе

Конструкция гидрообъемного сцепления перспективная, надежная и долговечная. Возможные неумелые действия водителя никак не повлияют на работоспособность такого сцепления. Возможен прорыв в создании трансмиссии нового поколения, конкурирующей с АКПП. В случае внедрения данных агрегатов станет возможно произвести замену фрикционных муфт сцепления там, где условия работы традиционного фрикционного сцепления приводят к его частым поломкам – в трансмиссиях тяжёлых самоходных машин. Главное особенность гидрообъемного сцепления заключается в сохранении всех габаритных и присоединительных размеров штатного фрикционного сцепления от любого автомобиля или трактора.

В конструкции гидрообъемного сцепления заложены конструктивные решения, защищенные патентами РФ благодаря отличительным признакам, характерным для принципиально новой, не имеющей аналогов в мире продукции [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Батышев К.А. Литье с кристаллизацией под давлением.: Изд-во МГОУ, 2009. - 168 с.
2. Ожерельев М. Сцепление на вытяжку // 5 колесо, № 4, 2008.
3. Патент РФ №105231 Гидравлическое сцепление / Георгиевский М.Г. и др. – Б.И., 2011, №16.
4. Материаловедение и технология материалов: Учебное пособие / Батышев А.И., Смолькин А.А., Батышев К.А., Безпалько В.И. и др. под ред. А.И. Батышева и А.А. Смолькина. – М.: ИНФРА-М, 2012. - 288 с.
5. Батышев А.И., Батышев К.А., Георгиевский Г.М., Георгиевский М.Г. Технологическое повышение надежности шестеренных насосов // Технология машиностроения, № 5, 2014, С. 44 – 48.
6. Батышев К.А. Литье с кристаллизацией под давлением алюминиевых сплавов. Часть 2 // Металловедение и термическая обработка металлов, 2012, №2, С. 3-10.
7. Батышев К.А., Безпалько В.И., Батышев А.И., Смолькин А.А. Изготовление герметичных отливок из силуминов// Литейное производство, 2012, №1, С. 29-30.

АВТОРЫ

Батышев К. А. – д.т.н., профессор кафедры МТ-13, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, (105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр.1), т. +79030181707, e-mail: konstbat63@mail.ru

Георгиевский М.Г. – к.т.н., генеральный директор НПО Гидравлика, (105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр.1), т. +79778326547, konstbat63@mail.ru

Семенов К. Г. – к.т.н, доцент кафедры МТ-13 Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1), т. +79166945531, e-mail: semenovkg@bmstu.ru

Зеркалов Г. Л. – научный сотрудник, Стэнфордский университет, США, т. +79030181707, e-mail: konstbat63@mail.ru

AUTHORS

Batyshev K. A - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department MT-13, Moscow State Technical University. N.E. Bauman, (105005, Moscow, 2nd Bauman Str., 5, building 1), t. +79030181707, e-mail: konstbat63@mail.ru

Georgievsky M.G. - Ph.D., General Director of the NGO Gidravlika, (105005, Moscow, 2nd Bauman Str., 5, p. 1), t. +79778326547, konstbat63@mail.ru

Semenov K. G. - Cand.Tech.Sci., Associate Professor of the Department MT-13 Moscow State Technical University. N.E. Bauman (105005, Moscow, 2nd Bauman Str., 5, building 1), t. +79166945531, e-mail: semenovkg@bmstu.ru

Zerkalov G.L. - Researcher, Stanford University, USA, t. +79030181707, e-mail: konstbat63@mail.ru

**ПОЛУЧЕНИЕ КАЧЕСТВЕННЫХ ОТЛИВОК ОТВЕТСТВЕННОГО
НАЗНАЧЕНИЯ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

**OBTAINING QUALITATIVE CASES OF RESPONSIBLE APPOINTMENT
FROM ALUMINUM ALLOYS**

БАТЫШЕВ К.А. (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

СЕМЕНОВ К.Г. (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

СВИНОРОЕВ Ю.А., (Луганский национальный университет им. В.Даля)

ЗАЖИГИН В.В. (ПАО «Авиационная корпорация "Рубин"»)

СВИРИДЕНКО Д.С. (ФГУП «Всероссийский институт авиационных
материалов»)

BATYSHEV K.A. (MSTU. Bauman)

SEMENOV K.G. (MSTU. Bauman)

SVINOROYEV YU.A., (Luhansk National University named after V. Dal)

ZAZHYGIN V.V. (PJSC "Aviation Corporation" Rubin ")

SVIRIDENKO D.S. (FSUE "All-Russian Institute of Aviation Materials")

***Аннотация.** Получение качественной продукции является первостепенной задачей авиационных заводов. Для производства рассмотренных отливок применяют алюминиевые сплавы в сочетании с современными технологиями и способами литья.*

***Abstract.** Obtaining high-quality products is a primary task of aviation plants. Aluminum alloys in combination with modern technologies and methods of casting are used for the production of the examined castings.*

***Ключевые слова:** дефекты отливок, алюминиевые сплавы, кокиль, температурный режим, качество.*

***Key words:** casting defects, aluminum alloys, chill mold, temperature regime, quality.*

В данной статье описаны некоторые технологические методы предотвращения дефектов и брака.

Рассмотрим производство отливки крышки гидронасоса НП (рисунок 1).



Рисунок 1. Отливка НП "Крышка"

Отливки изготавливаются из сплава АЛ9М и являются отливками ответственного назначения, к которым предъявляются высокие требования. На пути от изготовителя к заказчику отливки проходят ряд этапов контроля, позволяющих не только выявить дефекты, но и предотвращать их в дальнейшем. В рассматриваемых отливках посредством неразрушающего радиационного контроля (рентгеновский контроль) были выявлены дефекты рыхлоты на внутреннем диаметре фланца отливки и пористости у перешейка со стороны питателя (Рисунок 1 а).



Рисунок 1 а. Рыхлота и пористость

Для обнаружения причин дефектов и принятия мер по их предотвращению необходимо провести анализ процесса плавки и заливки. При плавке важно учитывать: соответствие техническим требованиям используемого оборудования и материалов (плавильно-заливочное оборудование и инструмент, оборудование для дегазации сплава, состав шихты, модификатора и т. д.). Необходимо следовать инструкциям и технологиям.

После приготовления сплава и получения положительного заключения лаборатории о химическом анализе и микроструктуре необходимо подготовить кокиль к заливке. Заливка осуществляется при температуре $720\pm^{\circ}\text{C}$. Перед первой заливкой необходимо равномерно разогреть кокиль до температуры $150-200^{\circ}\text{C}$. Данного температурного интервала необходимо придерживаться перед каждой последующей заливкой данных отливок. Проведённый контроль последующей плавки и заливки выявил несоответствия температурного режима работы кокиля (график 1).

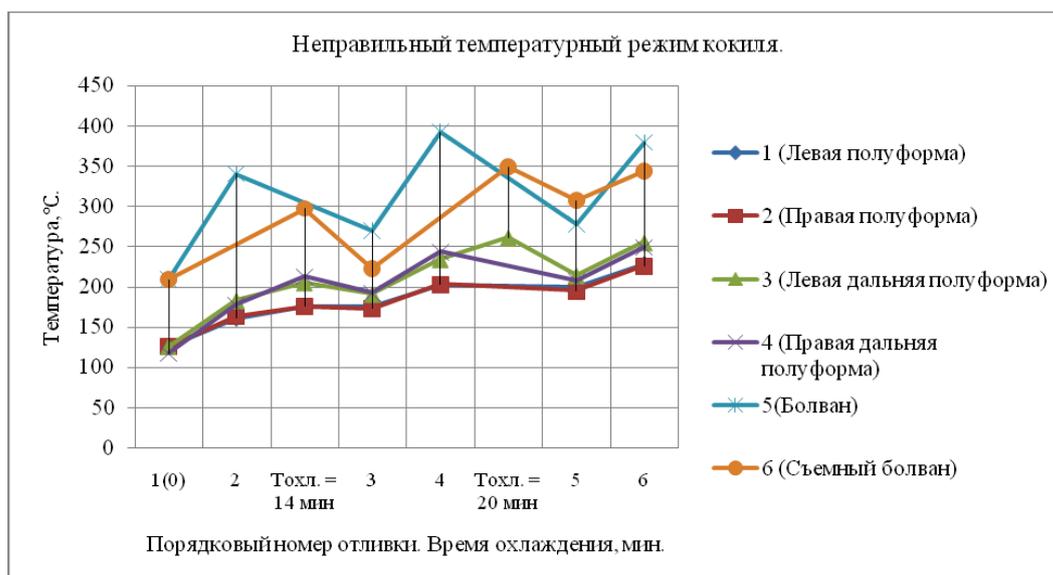


График 1.

На графике 1 представлен температурный режим работы кокиля при недостаточном охлаждении на воздухе. В частности происходил сильный перегрев болвана. На экспериментальной плавке помимо увеличения времени охлаждения кокиля на воздухе, болван охлаждался потоком воздуха под давлением. Поскольку кокиль имеет покрытие необходимо подбирать давление воздуха на выходе так, чтобы исключить его повреждение. Для контроля температуры использовалась внутривальная термопара с терморегулятором, мультиметр с щупом, контактная термопара и оптический пирометр [1].

Замер температуры кокиля производился переносным мультиметром АРРА 62 Т с щупом. Также замер производился оптическим пирометром, но из-за наличия пыли в воздухе погрешность измерений была выше, чем у мультиметра с щупом. Перед заливкой каждой отливки температура кокиля замерялась в шести местах: левая и правая щёки (полуформы) с противоположных внешних сторон, нижний болван и верхний болван (съёмный). После фиксирования экспериментальных данных был составлен график температурного режима работы кокиля при получении четырёх отливок (график 2), а также составлены два промежуточных графика зависимости температуры кокиля от времени перед заливкой третьей (график 3) и четвертой отливок (график 4).

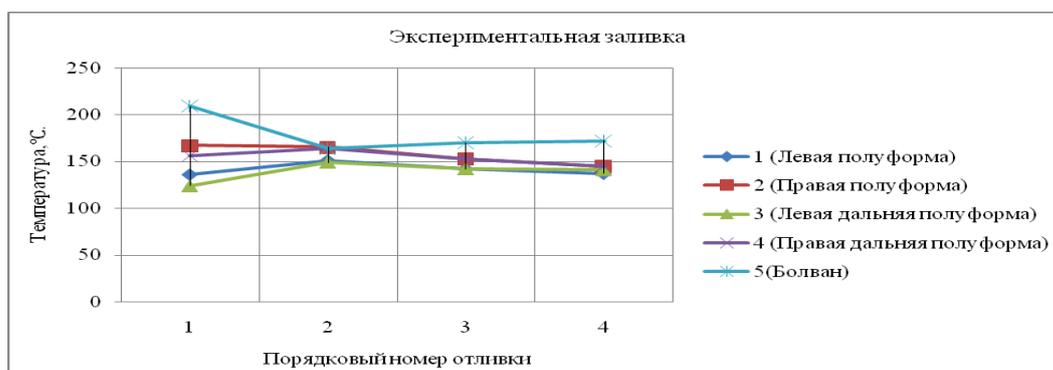


График 2.

На графике 2 представлены температурные режимы работы кокиля при экспериментальном производстве четырёх отливок крышек.

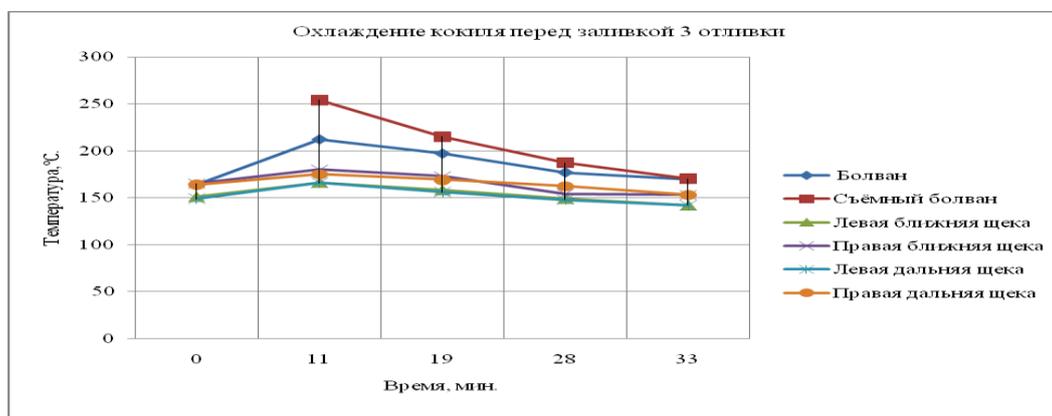


График 3.

На графике 3 изображено поэтапное охлаждение кокиля на воздухе перед заливкой 3 отливки, а на графике 4 также описан процесс охлаждения полуформ на воздухе с дополнительным охлаждением болванов в потоке воздуха под давлением.

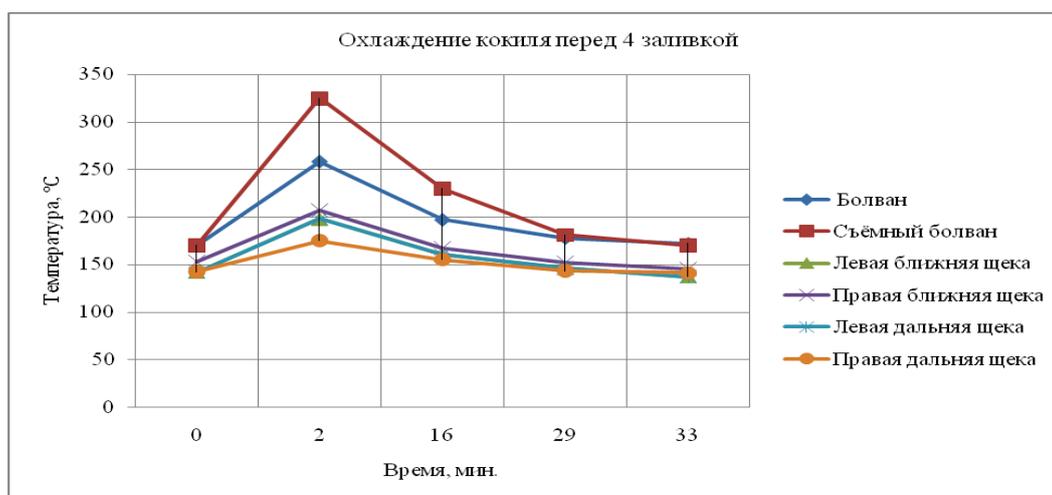


График 4.

Также было принято решение понизить температуру заливки до $710 \pm 10^\circ\text{C}$. Контроль температуры металла в ковше осуществлялся контактной термопарой. После проведения неразрушающего радиационного контроля (рентгеновского контроля) выдано заключение о годности отливок.

На некоторых отливках был выявлен дефект смещения центра. Он был обусловлен неправильной сборкой кокиля (недоработан узел сборки пневматического привода с болваном). Выдвижной (нижний) болван со стороны питателя сильно притирался к направляющей стенке. Происходил перекосяк болвана и сборка осуществлялась неправильно. Изделия имели недопустимые отклонения по геометрии и браковались [2]. После изменения

конструкции узла дальнейшее появление данного смещения было предотвращено.

Важно отметить, что при выдержке готового расплава в течение 30-60 минут, заливку проводить только после повторного модифицирования, отстаивания, дегазации и получения свидетельства о содержании в сплаве основных компонентов (в пределах, указанных в инструкции на приготовление сплава) и заключения о микроструктуре. Контроль плотности готового сплава осуществлялся тестером плотности Unterdruckdichteproben-GeratVDT.

Отметим, что контроль температуры забора металла из печи, температура кокиля перед заливкой, время выдержки металла в ковше и время выдержки металла в кокиле являются важными составляющими получения качественных отливок из алюминиевых сплавов, отвечающих всем требованиям нормативных документов.

Рассмотрим отливки НП “Колесо” из сплава АЛ9М (Рис. 2), НП-М “Малое колесо” из сплава АК5М (Рисунок 3) и отливку НП13 “Колесо” из сплава АК5М (Рисунок 4).



Рисунок 2. Отливка НП “Колесо”.



Рисунок 3. НП-М “Малое колесо”



Рисунок 4. НП13 «Колесо».

Отливки изготавливаются в кокиле с использованием стержня из плакированной смеси 7П (Кварцевый песок, связующее фенольное порошкообразное, эфиральдегидная фракция и борная кислота). Отливки имеют схожую геометрию и, как следствие, аналогичные дефекты. На лопастях некоторых отливок выявлялись неслитины. Для предотвращения данного недопустимого дефекта принято решение повысить температуру заливки на 10 градусов (720 ± 10^0 С. В процессе разметки на некоторых отливках был обнаружен дефект смещения центра и нехватки литья. Причин возникновения оказалось несколько: 1) Нарушение геометрии стержня из-за несвоевременной чистки стержневого ящика от краски (наслоение). 2) Неточная простановка стержня в кокиль. 3) Ошибка токаря при предварительной механической обработке. При визуальном контроле было выявлено, что лопасти имеют неудовлетворительное качество поверхности (решение данной проблемы описано ниже). Также существовала проблема извлечения стержня из тела отливки. Это объясняется сложной внутренней геометрией и тем, что после просушки стержней связующее переходит в стадию нерастворимости и необратимого затвердевания. Уменьшить прочность стержня можно посредством термической обработки отливок при температуре 200-250⁰ С течение полутора-двух часов. Нагрев и выдержка облегчают разрушение и извлечение стержня, но это не решает проблему неудовлетворительного качества поверхностей. Было принято решение заменить стержни из смеси 7П на изготовленные на установке S15 (Кварцевый песок, карбамидоформальдегидная смола, катализатор – водный раствор ортофосфорной кислоты). Несмотря на схожую дисперсность песка качество поверхности стержней изготовленных методом спекания из смеси 7П ниже, чем у стержней напечатанных на установке S15. Также стержни, изготовленные на установке S15, легко разрушить после получения отливки. В результате замены стержней из плакированной смеси 7П на стержни, изготовленные на установке S15 были получены качественные отливки. Поверхность лопастей фактически не нуждается в дополнительной механической обработке, а простота удаления стержней позволила сократить временной цикл получения годной продукции. Также, в качестве эксперимента, шероховатость

поверхности стержней улучшалась посредством его окунания в суспензию коллоидного графита с последующей просушкой при 160⁰ С в течении 2 часов. Это также позволяло добиться необходимого качества поверхности лопастей, но в полной мере не решало проблему извлечения стержня из тела отливки. Стоит также отметить, что перед сдачей продукции заказчику необходимо не только полное соответствие с ОСТ, но высокое визуальное качество продукции.

Контроль производства отливок является важным аспектом получения качественной продукции [3], он позволяет корректировать технологические карты и внедрять оптимальные или новые технологии, что ведёт к уменьшению процента брака.

ЛИТЕРАТУРА

1. Батышев К.А., Зажигин В.В., Кателин В.А. Обеспечение качества отливок из цветных сплавов на авиационных предприятиях / Материалы 1У межвузовской конференции «Инновации в технологии транспортного машиностроения», 6 июня 2017 г., М: ЦНТИБ ОАО «РЖД», 2017, С. 3-8.
2. Батышев К.А., Зажигин В.В. Получение качественных отливок из алюминиевых сплавов на предприятиях авиационной отрасли / Труды 1X международной научно-практической конференции «Прогрессивные литейные технологии», 13-17 ноября 2017 г., Москва, 2017, С. 85-89.
3. Батышев К.А., Кателин В.А., Прохоров А.А., Зажигин В.В., Трофимов А.В. Современные измерительные комплексы для получения качественных отливок ответственного назначения / Труды 1X международной научно-практической конференции «Прогрессивные литейные технологии», 13-17 ноября 2017 г., Москва, 2017, С. 346-349.

АВТОРЫ

Батышев К. А. – д.т.н., профессор кафедры МТ-13, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана.

Семенов К. Г. – к.т.н, доцент кафедры МТ-13 Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана.

Свинооров Ю.А. – к.т.н, доцент кафедры Промышленного и художественного литья Луганский национальный университет им. В.Даля.

Зажигин В.В - инженер ПАО «Авиационная корпорация "Рубин".

Свириденко Д.С. – к.т.н., начальник отдела 50 ФГУП ВИАМ, Москва.

AUTHORS

Batyshev K. A - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department MT-13, Moscow State Technical University. N.E. Bauman, Moscow.

Semenov K. G. - Cand.Tech.Sci., Associate Professor of the Department MT-13 Moscow State Technical University. N.E. Bauman, Moscow.

Svinoroyev Yu.A. - Cand.Tech.Sci., Assistant professor of Industrial and artistic casting Lugansk National University. V.Dalya, Lugansk.

Zazhigin V.V. - engineer of PJSC "Aviation Corporation" Rubin", Balashikha M.O. Shosse enthusiasts.

Sviridenko D.S. - Ph.D., Head of Division 50 FSUE VIAM, Moscow.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ПРИГАРА
НА ПОВЕРХНОСТИ ЧУГУННОЙ ОТЛИВКИ**

**INVESTIGATION OF THE SAMPLE VALUE
ON THE SURFACE OF IRON CASTING**

ИЛЛАРИОНОВ И.Е.

(ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова», Чебоксары, Россия),

ГИЛЬМАНШИНА Т.Р., КОВАЛЕВА А.А., БОРИСЮК В.А.

(ФГБОУ ВО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия)

I.E. ILLARIONOV

(Chuvash state university, Cheboksary, Russia)

GILMANSHINA T.R., KOVALEVA A.A., BORISYUK V.A.

(Siberian federal university, Krasnoyarsk, Russia)

***Аннотация.** Изучено влияния соотношения природного и активированного графитов в составе наполнителя самовысыхающих покрытий на величину пригара на поверхности чугуновой отливки.*

***Annotation.** The influence of the ratio of natural and activated graphites in the composition of the filler of self-drying coatings on the value of the deposit on the surface of the cast iron cast was studied.*

***Ключевые слова:** противопригарные покрытия, пригар, чугун, графит, активация*

***Keywords:** non-stick coatings, coke, cast iron, graphite, activation*

В литейном производстве одним из главных направлений является повышение геометрической точности и качества отливок. Основную массу отливок в настоящее время получают методом литья в разовые формы (около 80 %). Однако получение отливок по этой технологии сопряжено с появлением самого распространенного дефекта – пригара [1–9].

В результате теоретических и экспериментальных исследований, выполняемых в ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» на кафедре литейного производства был разработан ряд технологий повышения качества природных скрытокристаллических графитов [10–12 и др.] и покрытий на их основе [13–15 и др.].

Целью данной работы является исследование влияния соотношения природного и активированного графита в составе наполнителя графитовых покрытий и толщины стенки чугуновых отливок на величину пригара на их поверхности.

Для исследований было выбрано самовысыхающее графитовое покрытие на основе природного и активированного графитов, свойства которого представлены в работе [16].

Механоактивацию графитов осуществляли в планетарно-центробежной мельнице RETSCH PM 400 MA[17].

Для оценки влияния всех факторов, определяющих вероятность образования пригара на поверхности отливок при использовании противопопригарных покрытий использовали ступенчатую пробу [18]. Анализ макроструктуры с целью определения толщины пригара на поверхности отливки проводили на стереомикроскопе CarlZeissStemi 2000-C [19].

Форма выполнена из холоднотвердеющей смеси, смола – альфабонд (табл. 1). Серый чугун (табл.1) заливали при температуре 1 400 °С. Результаты исследований приведены в табл. 2.

Таблица 1 – Составы холоднотвердеющих смесей

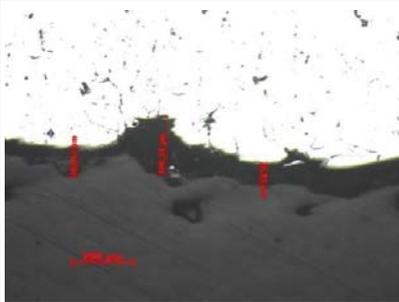
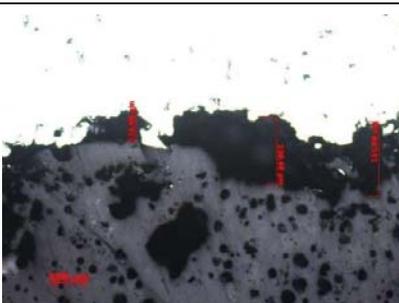
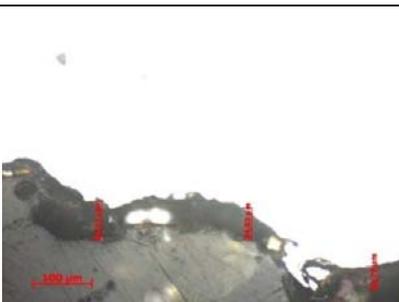
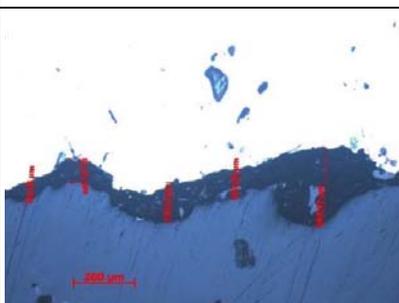
Компонент		Свойства		
наименование	содержание, мас.ч.	Живучесть, мин	Прочность на растяжение (через 1 ч), МПа	Газопроницаемость (через 1 ч), ед.
Кварцевый песок 2К ₁ О ₃ 03	100	3,2	0,19	–
Смола альфабонд	2,4			
ОтвердительТ-01	0,4			

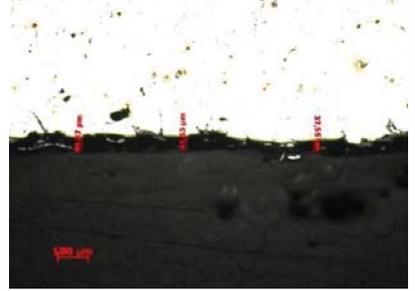
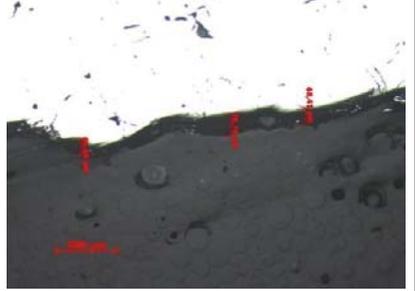
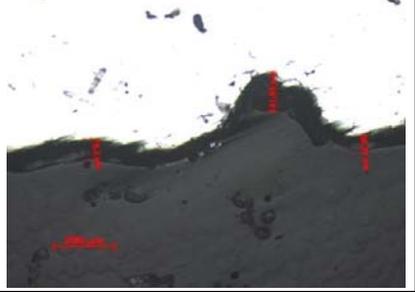
Таблица2 – Химический состав чугуна, %

Элемент	Содержание элемента	Элемент	Содержание элемента
С	2,90–2,97	V	0,049–0,052
Mn	0,92–0,93	Ti	0,021–0,024
P	0,019–0,021	Cr	0,100–0,110
Si	2,41–2,60	Ni	0,084–0,086
Cu	0,120–0,130	S	0,042–0,044
Sn	< 0,01		

С увеличением содержания в наполнителе активированного графита величина пригара снижается. При этом при использовании в составе покрытия природного и механоактивированного графита при соотношении 50 : 50 и 0 : 100 значения толщины пригара практически не отличаются. При нанесении покрытия, содержащее 50 % ГЛС-2 и 50 % ГЛС-2А, крупные частицы природного графита в поры формы не проникают, а остаются на поверхности. В этом случае шероховатость формы будет определяться размерами частиц природного графита, которые значительно мельче, чем средний размер зерна песка.

Таблица 2 – Величина пригара (смесь – ХТС, чугун СЧ20)

Основа покрытий	Сечение, мм	Ракурс			
		Боковая сторона	Нижняя сторона		
Без покрытия	25		68,76–128,18 МКМ		76,83–199,23 МКМ
	50		86,44–191,22 МКМ		123,3–198,22 МКМ
	75		116,66 – 251,08 МКМ		131,84 – 408,79 МКМ
	25		40,77–66,31 МКМ		39,88–171,71 МКМ
	50		60,77–170,81 МКМ		64,71–265,97 МКМ

Основа покрытий	Сечения, мм	Ракурс	
		Боковая сторона	Нижняя сторона
ГЛС-2	75	 78,77 — 223,8 3 мкм	 82,56 — 276,8 4 мкм
	25	 18,97 — 47,66 мкм	 22,76 — 71,13 мкм
	50	 37,55 — 49,87 мкм	 48,41 — 78,74 мкм
	75	 50,3– 70,18 мкм	 58,39 — 131,8 3 мкм

На рис.1 схематически показана часть стержня, который покрыт покрытием на основе наполнителя, содержащего 50 % природного скрытокристаллического графита ГЛС-2 и 50 % активированного графита ГЛС-2А. Литейная форма или стержень изготовлены из зерен песка 1. Песчинки 1 связаны друг с другом с помощью связующего вещества (не показано). Стержень имеет поры 2 между песчинками 1. Когда покрытие наносится на стержень, тонкая фракция графита ГЛС-2А3 пропитывает их через поры до определенной глубины. Крупная фракция графита ГЛС-2 4 имеет размер частиц, слишком большой, чтобы проникнуть в форму или стержень, образуя поверхностный слой 4.

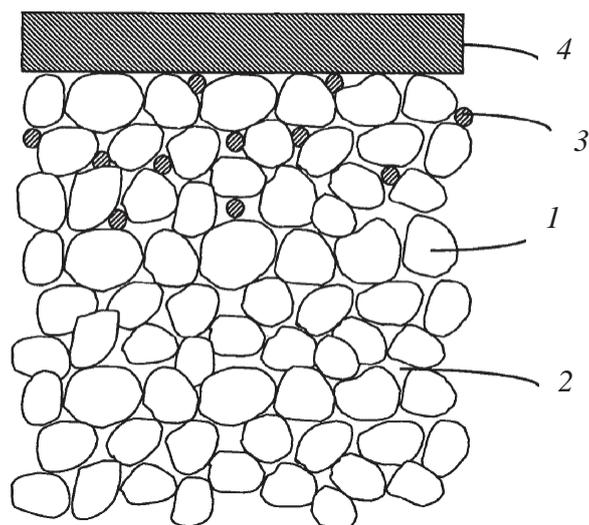
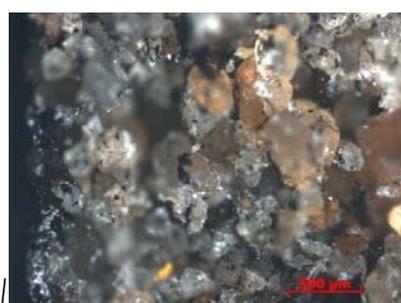


Рис.1. Схематическое изображение разреза стержня [20]

Исследование покровного и проникающего слоя подтвердили данное предположение (рис.2).



покровный
слой

а



зерна песка
частица
графита
поры

б

Рис.2. Микроструктура образцов, окрашенных самосохнущим покрытием, содержащим 50 % природного графита и 50 % механоактивированного:

а – край; *б* – 0,5 мм от края. Смесь жидкостекольная, отверждение по CO₂-процессу, марка песка 2К₁О₃03

Таким образом, покрытие, содержащее 50 % природного графита марки ГЛС-2(К) и 50 % механоактивированного графита марки ГЛС-2А(К), обеспечивает наилучшее качество поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кукуй, Д. М. Теория и технология литейного производства. Формовочные материалы и смеси / Д. М. Кукуй, Н. В. Андриянов. – Минск : БНТУ, 2005. – 390 с.
2. Берг, П. П. Качество литейной формы / П. П. Берг. – М. : Машиностроение, 1971. – 291 с.
3. Илларионов, И. Е. Формовочные материалы и смеси : монография / И. Е. Илларионов, Ю. П. Васин. – Чебоксары : Изд-во Чуваш. гос. ун-та, 1992. – Ч. 1. – 223 с.
4. Илларионов, И. Е. Формовочные материалы и смеси : монография / И. Е. Илларионов, Ю. П. Васин. – Чебоксары : Изд-во Чуваш. гос. ун-та, 1995. – Ч. 2. – 288 с.
5. Валисовский, И. В. Пригар на отливках / И. В. Валисовский. – М. : Машиностроение, 1983. – 192 с.
6. Лясс, А. М. Химический пригар на отливках / А. М. Лясс, И. В. Валисовский, А. А. Багров // Литейное производство. – 1975. – № 5. – С. 22–24.
7. Формирование качества поверхности литейной формы и отливок / И. Е. Илларионов, Е. П. Шалунов, И. А. Стрельников [и др.] // Проектирование и перспективные технологии в машиностроении и металлургии : мат-лы II-ой Республиканской научно-практической конференции. – Чебоксары : ФГБОУ ВПО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова», 2016. – С. 44–51.
8. Формовочные материалы и смеси : справ. / С. П. Дорошенко, К. Русин, В. П. Авдокушин, И. Мацашек. – К. : Выща шк., 1990. – 415 с.
9. Формовочные материалы и технология литейной формы : справ. // С. С. Жуковский, Н. И. Анисович [и др.]; под ред. С. С. Жуковского. – М. : Машиностроение, 1993. – 432 с.
10. Мамина Л.И., Королева Г.А., Гильманшина Т.Р. Перспективные способы обогащения графита // Литейное производство. 2003. № 2. С. 16-18.
11. Получение графитсодержащих наноструктурированных материалов и композиций для литейного производства / В.Н. Баранов, Т.Р. Гильманшина, А.И. Безруких [и др.] // Литейщик России. – 2011. – № 10. – С. 42–45.
12. Химико-механическая подготовка скрытокристаллического графита к дальнейшей переработке / Т.Р. Гильманшина, С.И. Лыткина, В.П. Жереб, Г.А. Королева // Обогащение руд. – 2016. – № 2 (362). – С. 14–19.
13. Исследование свойств противопригарных покрытий для чугунного литья на основе химически и механохимически активированных графитов / Т.Р. Гильманшина, В.Г. Бабкин, С.И. Лыткина, В.Н. Баранов, С.А.Худоногов // Огнеупоры и техническая керамика. – 2014. – № 9. – С. 7–10.
14. Фазовые превращения в графитовых покрытиях и их влияние на чистоту поверхности отливок / В.Г. Бабкин, В.В. Леонов, Т.Р. Гильманшина, Т.Н. Степанова / Черные металлы. – 2017. – № 10. – С. 54–59.
15. Разработка водных и быстросохнувших противопригарных покрытий / Т.Р. Гильманшина, В.Г. Бабкин, В.Н. Баранов [и др.] // Литейное производство. – 2015. – № 6. – С. 15–17.
16. Пат. 2632313 РФ МПК В22С 3/00 (2006.01). Противопригарная краска для литейных форм и стержней/ Гильманшина Т.Р., Партыко Е.Г., Косович А.А., Борисюк В.А., Амельченко В.Н., Фомин П.А.; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО «СФУ». – № 201614576 ; заяв. 22.11.2016 ; опубл. 03.10.2017, Бюл. № 28.
17. Планетарная шаровая мельница RETSCH PM 400[Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://xn--80ac2aleg3a.xn--p1ai/catalog/product/retsch-rm-400-ma.html>
18. Оценка величины пригара на поверхности чугунных отливок / И.Е. Илларионов, Т.Р. Гильманшина, А.С. Кафтанников, Ф.А. Нуралиев // Черные металлы. – 2018. – № 8. – С. 23–28.
19. Стереомикроскоп STEMI 2000[Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.microscope-plus.ru/zeiss-stemi2000.html>
20. Пат. 20130032689 A1 US. Foundry coating composition / Martinus Jacobus Naanepen, Frederik Willem Von Piekartz, Yvonnevon Piekartz-Lutgendorff ; патентообладатель Fosco International Limited. – № US 13/322836 ; заявл. 15.02.11 ; опубл. 07.02.13.

АВТОРЫ

Илларионов Илья Егорович – д.т.н., профессор кафедры материаловедения и металлургических процессов ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова», Чебоксары, Россия.

Гильманшина Татьяна Ренатовна – к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО «Сибирский федеральный университет».

Ковалева Ангелина Адольфовна – доцент, ФГБОУ ВО «Сибирский федеральный университет».

Борисюк Вера Александровна – аспирант ФГБОУ ВО «Сибирский федеральный университет».

THE AUTHORS

Illarionov Ilya Egorovich - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Materials Science and Metallurgical Processes of FSBEI HE I.N. Ulyanova”, Cheboksary, Russia.

Gilmanshina Tatyana Renatovna - Ph.D., Associate Professor, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Siberian Federal University".

Angelina Kovaleva - Associate Professor, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Siberian Federal University".

Borisyuk Vera Alexandrovna - a graduate student of the Federal State-Funded Educational Institution of Higher Education "Siberian Federal University".

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ СВОЙСТВ
РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ И ПРОТИВОПРИГАРНЫХ ПОКРЫТИЙ
ДЛЯЛИТЕЙНЫХФОРМ: ОБЗОР**

**THEORETICAL FOUNDATIONS FOR FORMING THE PROPERTIES
OF FREQUENCY AND ANTI-PRIGARY COATINGS FOR FOUNDRY
FORMS: REVIEW**

ИЛЛАРИОНОВ И.Е.

(ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова», Чебоксары, Россия),

ГИЛЬМАНШИНА Т.Р., КОВАЛЕВА А.А., БОРИСЮК В.А.

(ФГБОУ ВО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия)

ILLARIONOV I.E.

(Chuvash state university, Cheboksary, Russia)

GILMANSHINA T.R., KOVALEVA A.A., BORISYUK V.A.

(Siberian federal university, Krasnoyarsk, Russia)

***Аннотация.** Описаны теоретические основы формирования свойств разделительных и противопригарных покрытий в жидком и твердом состояниях.*

***Annotation.** The theoretical foundations of the formation of the properties of the non-stick and non-stick coatings in the liquid and solid states are described.*

***Ключевые слова:** разделительные покрытия, противопригарные покрытия, свойства, литейная форма*

***Keywords:** separating coatings, non-stick coatings, properties, mold*

Формирование качественной поверхности отливки представляет собой сложный процесс, определяемый характером заполнения сплавом, прогревом литейной формы, физико-химическим и механическим взаимодействием расплава с атмосферой литейной формы и в контактной зоне материал – литейная форма [1–7].

Основополагающая информация о процессах взаимодействия на границе форма – расплав изложена в трудах таких классиков литейного производства, как П.П. Берг [4], П.А. Борсук [8], И.В. Валисовский [9,10], В. А. Васильев [11], Ю.П. Васин [12], Б.Б. Гуляев [13], С.П. Дорошенко [14], С.С. Жуковский [15], И.Е. Илларионов [16–18], А.М. Лясс [8, 10], Л. И. Мамина [19] и другие.

Среди известных теорий и гипотез [1, 2, 4–19], которые не только в определенных случаях адекватно отражают природу взаимодействия жидкого металла и литейной формы, но и объясняют первопричины образования дефектов поверхности отливок, необходимо выделить три основополагающих направления: первое состоит в изучении параметров теплообмена между

отливкой и литейной формой и связанных с ним физических процессов; второе заключается в исследовании гидродинамических процессов взаимодействия в контактной зоне расплав – литейная форма; третье направление связано с изучением физико-химических процессов на границе раздела расплав – литейная форма [1, 2, 4–19].

Механизм формирования свойств противопопригарных и разделительных покрытий весьма сложен и недостаточно изучен, поэтому в исследованиях, как правило, преобладает эмпирический путь подбора противопопригарных и разделительных покрытий с необходимыми свойствами [20, 21].

Формирование качественного слоя покрытия происходит в две стадии(табл. 1): 1 стадия – формирование свойств в процессе приготовления в жидком состоянии; 2 стадия – формирование структуры покрытия в процессе высыхания.

Таблица 1 – Этапы формирования покрытий

Этап формирования свойств покрытия	Технологические факторы	Свойства покрытий	Физико-химические факторы, определяющие взаимодействие компонентов покрытия
Жидкое состояние	Состав покрытия Способ перемешивания Режимы приготовления (интенсивность и время перемешивания)	Плотность Вязкость Седиментационная устойчивость	Смачиваемость, двойной электрический слой, межфазное натяжение, адсорбция, абсорбция
Твердое состояние	Состав покрытия Способ нанесения (кисть, пульверизатор) Характеристики формы (состав формы, шероховатость, пористость, температура) Условия сушки (температура, время)	Приведенная прочность Толщина покровного и проникающего слоя Газопроницаемость	Фильтрация краски через поры формы, когезионно-адгезионные воздействия

Формирование свойств в жидком состоянии. Формирование свойств противопопригарных покрытий происходит в процессе приготовления, когда во всем объеме суспензии протекают когезионно-адгезионные процессы, определяющие будущие эксплуатационные свойства покрытий [17–27].

Двойной электрический слой. В дисперсных системах на поверхности частиц (на границе раздела частица – дисперсионная среда) возникает двойной электрический слой (ДЭС), который представляет собой слой ионов, образующийся на поверхности частицы в результате адсорбции ионов из раствора или диссоциации поверхностных соединений. Поверхность частицы приобретает слой ионов определенного знака, равномерно распределенный по поверхности и создающий на ней поверхностный заряд. Эти ионы называют

потенциалопределяющими. К поверхности частицы из жидкой среды притягиваются ионы противоположного знака, их называют противоионами. Образование двойного электрического слоя приводит к появлению электрического потенциала, значения которого в разных точках соответствуют поверхностному потенциалу, потенциалу адсорбционного слоя, дзета-потенциалу. Таким образом, двойной электрический слой состоит из потенциалопределяющих ионов и слоя противоионов, расположенных в дисперсионной среде [28].

Возможны три механизма образования двойного электрического слоя [29]: во-первых, за счет перехода ионов или электронов из одной фазы в другую (поверхностная ионизация); во-вторых, благодаря адсорбции соединений – примесей водных сред; в-третьих, за счет определенного ориентирования молекул сопряженных фаз в результате их взаимодействия.

Для водных коллоидных систем характерны все три возможных вида ДЭС, причем роль каждого из них в значительной степени связана с рН среды и химическими свойствами коллоидных соединений. Так как все явления на межфазных поверхностях коллоидных систем обусловлены наличием ДЭС и количественные связи между коллоидными частицами зависят от его строения, то представляется важным оценить строение ДЭС [29,30].

Использование ДЭС позволяет формировать свойства покрытий на наноуровне [31–35]. Например, в работе [36] показано, что наножидкости с дзета-потенциалом от 40–60 мВ имеют превосходную седиментационную устойчивость.

Электрокинетический потенциал сильно зависит от природы поверхности контактирующих фаз. В этом отношении можно выделить два крайних положения: активные и инертные поверхности. Активную поверхность могут иметь полимеры, содержащие ионогенные группы, степень диссоциации которых и определяет заряд поверхности. Инертные поверхности (например, у графита) лишены таких групп и приобретают заряд в результате специфической адсорбции ионов [37].

В работе [38] показан случай специфической адсорбции анионного диспергирующего агента на положительно заряженной поверхности, т.е. ДЭС поверхности положителен. Это может произойти, если на гидрофобных незаряженных поверхностях закрепить анионные поверхностно-активные вещества (ПАВ), дзета-потенциал становится отрицательным.

ДЭС и возникающие в нем потенциалы играют основную роль в таких процессах, как адсорбция ионов, электрокапиллярные и электрокинетические явления, перенос вещества и энергии через коллоидные системы, электростатическое взаимодействие коллоидных частиц, определяющее устойчивость дисперсных систем в целом и т.д. Именно эти процессы будут обуславливать свойства противопригарных и разделительных покрытий в жидком состоянии [38–41].

При межмолекулярном взаимодействии между водой и минеральной частицей вдоль линейной границы раздела частица – жидкость – газ (воздух) на твердой поверхности частицы образуется краевой угол смачивания. Его величина для минералов различна, что зависит от состояния поверхности того или иного минерала. На взаимодействие минеральной частицы с водой

оказывают влияние находящиеся в воде ионы. Межмолекулярное взаимодействие воды с поверхностью минерала (адгезия) измеряется силой или работой на единицу площади контакта [27].

В системе «минеральная частица – вода» возникающие адгезионные силы связи количественно характеризуются величинами поверхностного и межфазного натяжений, а также значением краевого угла смачивания. Силы сцепления жидкой и твердой фаз определяются согласно уравнению Дюпре. Принимая во внимание, что гидратный слой воды находится в «особо твердом» состоянии и имеет большее поверхностное натяжение, чем объемная вода, силы взаимодействия этого слоя с минеральной частицей будут значительно превосходить 2σ , где σ – поверхностное натяжение. Следовательно, при отрыве пленки воды от минеральной частицы разрыв произойдет на участке объемной воды. При этом необходимо обратить внимание на то, что поверхность частиц твердой фазы всегда покрыта различными веществами, способными существенно изменять величину адгезии контактирующих материалов [27].

Формирование свойств в твердом состоянии. В работе [42] предложены пути повышения высокотемпературной прочности противопригарного покрытия за счет формирования в контактной зоне расплав – литейная форма матрицы муллита игольчатого строения, которая способна не только образовать дискретную взаимосвязь частиц наполнителя, обеспечив достаточную когезионную прочность противопригарного покрытия при высоких температурах σ_k^t , но и, обладая химическим сродством к основному материалу литейной формы (кварц), создавать адгезионную связь покрытия и литейной формы σ_a^t :

$$\sigma_k^t = \Sigma\sigma_a^t + \Sigma\sigma_1^t + \Sigma\sigma_2^t,$$

где $\Sigma\sigma_a^t$ – суммарная адгезионная прочность контактов муллит – алюмосиликатный наполнитель при высоких температурах, МПа; $\Sigma\sigma_1^t$ – суммарная когезионная прочность муллита при высоких температурах, МПа; $\Sigma\sigma_2^t$ – суммарная когезионная прочность алюмосиликатного наполнителя при высоких температурах, МПа [42].

Механизм повышения высокотемпературной прочности противопригарных покрытий (рисунок 1.7) был предложен в работе [43].

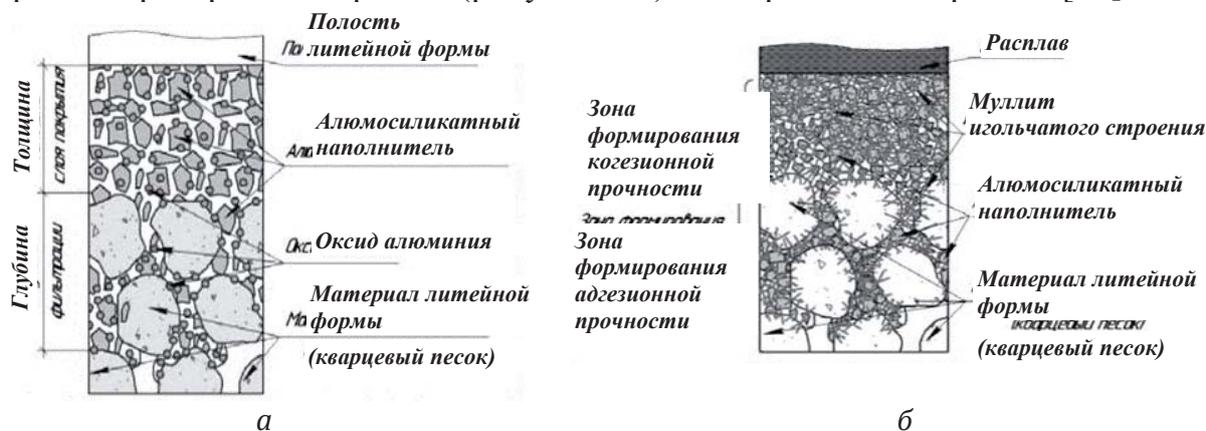


Рисунок 1.7 – Схема механизма повышения высокотемпературной прочности противопригарных покрытий [43]:

а – до взаимодействия с расплавом; б – в период взаимодействия с расплавом

При нанесении на поверхность литейной формы противопригарное покрытие формирует слой определенной толщины (рисунок 1.7, а). Важно отметить, что часть противопригарного покрытия, проникая в межзеренное пространство, будет создавать защитный слой и в приповерхностной зоне литейной формы, упрочняя ее. Далее (рисунок 1.7, б) в период взаимодействия с расплавом (заливка и кристаллизация) высокотемпературная прочность будет обеспечиваться за счет образующегося муллита игольчатой формы, который формирует повышенную когезионную и адгезионную прочность в контакте с кварцевым наполнителем формы и стержня. Исследование микроструктуры противопригарных покрытий до и после высокотемпературных превращений позволило подтвердить эту модель [43].

В работе [44] были изучены закономерности формирования свойств противопригарного покрытия на основе высокоогнеупорного алюмосиликатного наполнителя ($Al_2O_3 \cdot SiO_2$) при модифицировании покрытия наноструктурированным материалом ($AlOOH$). В качестве связующего противопригарных покрытий использована поливинилацетатная дисперсия, дисперсионная среда – водный раствор алифатического изопропилового спирта.

В ходе работы были получены зависимости [44]:

$$\delta = 0,0007x_1^2 - 0,0191x_1 + 0,1094, \quad (1)$$

$$h = 0,0006x_1^2 - 0,0926x_1 + 3,5037, \quad (2)$$

$$\eta = 0,0069x_1^2 - 0,0829x_1 + 11,223, \quad (3)$$

$$\rho = 0,1371x_1^2 + 2,1724x_1 + 926,46, \quad (4)$$

где δ – толщина красочного слоя, мм; h – проникающая способность, мм; η – вязкость, с; ρ – плотность, кг/м³; x_1 – концентрация огнеупорного наполнителя, %.

Построение кривых, описывающих значения изучаемых показателей, выполнено с использованием пакета Microsoft Excel 2010 путем добавления линий тренда. Достоверность аппроксимации оценивали по величине коэффициента детерминации R_z , который для выражений (1)–(4) составил 0,9878, 0,9976, 0,9806, 0,9927 соответственно, что свидетельствует о достаточно точном описании установленными зависимостями характера изменения исследуемых свойств. Повышение концентрации наполнителя в составе покрытия ведет к параболическому росту вязкости и плотности покрытия, что, в свою очередь, определяет увеличение толщины слоя покрытия на поверхности литейной формы и снижение проникающей способности. Установлено, что при концентрации наполнителя более 70 % суспензия переходит в пастообразное состояние, которое характеризуется отсутствием способности к истечению через вискозиметр, это вызывает трудности с нанесением покрытия на поверхность литейной формы равномерным слоем без разводов и подтеков [44].

Нанесение покрытий на поверхность форм и стержней с особыми композициями, включающими недорогие металлсодержащие промышленные отходы или продукты смежных отраслей, образующие в процессе их пиролиза мощные восстанавливающие агенты (атомарный водород и углерод), позволяет модифицировать поверхность чугунных отливок [45].

В отличие от противопригарных покрытий разделительные покрытия, например, при литье под давлением, выполняют роль смазки в начальный период перемещения металла относительно стержня или формы. Возможность сохранения слоя разделительного покрытия достаточной толщины на поверхности формы зависит от многих факторов. В момент заполнения формы расплавом полной деструкции разделительных покрытий не происходит благодаря их термической устойчивости, кратковременности процесса, дефициту кислорода [46].

В работе [47] было установлено, что после первоначального нанесения разделительного покрытия на технологическую оснастку толщина смазочно-разделительного слоя для исследуемых составов отличается: В40 – 12 мкм; СТАВРОЛ 500 – 10 мкм; CONDAFOND 310 – 6 мкм; TrennexW 3325/10 – 4 мкм; РП-1 – 7 мкм. При последующих пяти измерениях практически не наблюдается увеличения толщины слоя. При этом толщина смазочного слоя колеблется в среднем на 3–9 мкм в зависимости от вида разделительного покрытия. Максимальное увеличение толщины смазочного слоя (9 мкм) наблюдается при использовании разделительного покрытия марки В40, минимальное (3 мкм) – при применении разделительного покрытия марки TrennexW3325/10[47].

В настоящее время универсальных разделительных покрытий не существует. Использование тех или иных разделительных покрытий объясняется, прежде всего, сложностью изготавливаемых отливок, применяемым технологическим оборудованием и возможностью механизированного нанесения разделительного покрытия на литейную форму, их стоимостью, технологичностью и экологичностью [48].

Используемые разделительные покрытия, как правило, представляют собой дисперсные коллоидные системы на основе «масло в воде» или «вода в масле». Дисперсной фазой (основой) в них являются смазывающие вещества (одно или несколько). В качестве смазывающих веществ могут использоваться тяжелые минеральные масла, животные и растительные жиры и их производные, а также озокерит, парафин и др. Следует отметить, что упомянутые выше вещества в полной мере не отвечают требованиям, предъявляемым к основе разделительного покрытия, таким как смазывающая и разделяющая способности, кроющая способность, термическая устойчивость, газотворность [49, 50].

Таким образом, разработку теоретических основ получения высококачественных противопригарных и разделительных покрытий может быть осуществлена на базе глубокого изучения сложных физико-химических процессов, протекающих при приготовлении покрытия и его взаимодействии с расплавом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кукуй, Д.М. Теория и технология литейного производства. Формовочные материалы и смеси / Д.М. Кукуй, Н.В. Андриянов. – Минск : БНТУ, 2005. – 390 с.
2. Формирование качества поверхности литейной формы и отливок / И.Е. Илларионов, Е.П. Шалунов, И.А. Стрельников [и др.] // Проектирование и перспективные технологии в машиностроении и металлургии : мат-лы II-ой Республиканской научно-практической конференции. – Чебоксары : ФГБОУ ВПО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова», 2016. – С. 44–51.

3. Разработка составов противопригарных покрытий на основе графитов, активированных с поверхностно-активными веществами / Т.Р. Гильманшина, В.Н. Баранов, С.И. Лыткина, С.А. Худогонов // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. – 2016. – № 1. – С. 222–227.
4. Илларионов, И.Е. Формовочные материалы и смеси : монография / И.Е. Илларионов, Ю.П. Васин. – Чебоксары : Изд-во Чуваш. гос. ун-та, 1992. – Ч. 1. – 223 с.
5. Берг, П.П. Качество литейной формы / П.П. Берг. – М. : Машиностроение, 1971. – 291 с.
6. Илларионов, И.Е. Формовочные материалы и смеси : монография / И.Е. Илларионов, Ю.П. Васин. – Чебоксары : Изд-во Чуваш. гос. ун-та, 1995. – Ч. 2. – 288 с.
7. Металлофосфатные связующие и смеси : монография / И.Е. Илларионов, Е.С.Гамов, Ю.П.Васин, Е.Г.Чернышев. – Чебоксары : Изд-во Чуваш. гос. ун-та, 1995. – 524 с.
8. Холоднотвердеющие металлофосфатные смеси и противопригарные покрытия / И.Е. Илларионов, И.А. Стрельников, А.А. Моляков [и др.] // Современные технологии в машиностроении и литейном производстве : мат-лы I-ой Международной научно-практической конференции. – Чебоксары, 2015. – С. 112–121.
9. Валисовский, И.В. Пригар на отливках / И.В. Валисовский. – М. : Машиностроение, 1983. – 192 с.
10. Лясс, А.М. Химический пригар на отливках / А.М. Лясс, И.В. Валисовский, А.А. Багров // Литейное производство. – 1975. – № 5. – С. 22–24.
11. Васильев, В.А. Физико-химические основы литейного производства / В.А. Васильев. – М. : Интермет Инжиниринг, 2001. – 336 с.
12. Васин, Ю.П. Окислители – новые противопригарные материалы / Ю.П. Васин, А.Я. Расулов. – Челябинск : Юж.-Урал. кн. изд-во, 1969. – 91 с.
13. Фадеев, И.В. Растворы на основе амидоборатов для получения магнетитных покрытий / И.В. Фадеев, И.Е. Илларионов, Ш.В. Садетдинов // Проектирование и перспективные технологии в машиностроении и металлургии : мат-лы II-ой Республиканской научно-практической конференции. Министерство образования и науки РФ; ФГБОУ ВПО "Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова". – Чебоксары, 2016. – С. 52–57.
14. Формовочные материалы и смеси: справ. / С.П. Дорошенко, К. Русин, В.П. Авдокушин, И. Мацашек. – К. : Выща шк., 1990. – 415 с.
15. Формовочные материалы и технология литейной формы: справ. // С.С. Жуковский, Н.И. Анисович [и др.]; под ред. С.С. Жуковского. – М. : Машиностроение, 1993. – 432 с.
16. Илларионов, И.Е. Жидкостекольные смеси, отверждаемые продувкой углекислым газом / И.Е. Илларионов, Н.В. Петрова // Тр. Нижегород.гос. техн. ун-та им. Р.Е. Алексеева. – 2011. – № 2(87). – С. 208–213.
17. Илларионов И.Е. Противопригарные покрытия для литейных форм и стержней / И.Е. Илларионов, И.А. Стрельников // Литейщик России. – 2016. – № 4. – С. 24–25.
18. Противопригарные покрытия для литейных форм и стержней, применяемые в литейном производстве на предприятиях машиностроения / И.Е. Илларионов, И.А. Стрельников, В.А. Гартфельдер, О.В. Моисеева // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. – 2016. – № 4 (30). – С. 55–60.
19. Мамина, Л.И. Теоретические основы механоактивации формовочных материалов и разработка ресурсосберегающих технологических материалов процессов в литейном производстве : дис. ... д-ра техн. наук / Мамина Людмила Ивановна. – Красноярск, 1989. – 426 с.
20. Анализ методов профилактики пригара на поверхности стальных и чугунных отливок / Ю.А. Николайчик, Ф.И. Рудницкий, А.В. Батайчук, В.В. Мудрый // Литье и металлургия. – 2015. – № 1(78). – С. 23–28.
21. Батайчук, А.В. Повышение эффективности противопригарных покрытий литейных форм / А.В. Батайчук, В.В. Мудрый // Литье и металлургия. – 2014. – № 4(77). – С. 138–143.
22. Исследование свойств противопригарных покрытий для чугунного литья на основе химически и механохимически активированных графитов / Т. Р. Гильманшина, В. Г. Бабкин, В. Н. Баранов [и др.] // Огнеупоры и техническая керамика. – 2014. – № 9. – С. 7–11.

23. Разработка водных и быстросохнувших противопопригарных покрытий / Т.Р. Гильманшина, В.Г. Бабкин, В.Н. Баранов [и др.] // *Литейное производство*. – 2015. – № 6. – С. 15–17.
24. Пат. 2368450 Российская Федерация, МПК В22С 3/00. Противопопригарное покрытие для литейных форм / Мамина Л.И., Гильманшина Т.Р., Безруких А.И. [и др.] ; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Сиб. федер. ун-т». – № 2007149203 ; заявл. 29.12.07 ; опубл. 27.09.09, Бюл. № 27(III ч.).
25. Теоретические основы литейной технологии / А.И. Ветишка [и др.] ; под ред. К.И. Ващенко. – Киев : Высш. шк., 1981. – 320 с.
26. Медведев, Я.И. Газы в литейной форме / Я.И. Медведев. – М. : Машиностроение, 1965. – 239 с.
27. Илларионов, И.Е. Теоретические основы формирования физико-механических свойств песчано-глинистых смесей / И.Е. Илларионов // *Тр. Нижегород. гос. техн. ун-та им. Р.Е. Алексеева*. – 2011. – № 1(86). – С. 233–242.
28. Дзета-потенциал. Двойной электрический слой [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.photocor.ru/theory/zeta-potential/>
29. Основы процессов коагуляции и осаждения [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/VPU_book/ch3.htm.
30. Дамаскин, Б. Б. Электрохимия / Б.Б. Дамаскин, О.А. Петрий, Г.А. Цирлина. – 2-е изд., испр. и перераб. – М. : Химия, КолосС, 2006. – 672 с.
31. Исследование свойств наноструктурированных графитовых суспензий с различными жидкими фазами / Л.И. Мамина, Т.Р. Гильманшина, А.И. Безруких [и др.] // *Ультрадисперсные порошки, наноструктуры, материалы: тр. науч.-техн. конф. с междунар. участием*. – Красноярск, 2009. – С. 344, 345.
32. Исследование зависимости смачиваемости используемых в металлургии графитов различного качества / Л.И. Мамина, В.Н. Баранов, Т.Р. Гильманшина [и др.] // *Вестн. Магнитогор. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова*. – 2013. – № 3(43). – С. 55–58.
33. Фазовые превращения в графитовых покрытиях и их влияние на чистоту / В.Г. Бабкин, В.В. Леонов, Т.Р. Гильманшина, Т.Н. Степанова // *Черные металлы*. – 2017. – № 10. – С. 54–59.
34. Получение графитсодержащих наноструктурированных материалов и композиций для литейного производства / В.Н. Баранов, Т.Р. Гильманшина, А.И. Безруких [и др.] // *Литейщик России*. – 2011. – №10. – С. 42–45.
35. Свойства литейных суспензий на основе наноструктурированных графитов / Т.Р. Гильманшина, Л.И. Мамина, В.Н. Баранов [и др.] // *Литейное производство*. – 2011. – № 10. – С. 31–35.
36. Mukherjee, S. Preparation and Stability of Nanofluids-A Review / S. Mukherjee, S. Paria // *IOSR J. of Mech. and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*. – 2013. – Vol. 9, Is. 2. – pp. 63–69.
37. Голованева, Н.В. Особенности механизма и влияние основных технологических параметров на характеристики наночистотных мембран: дис. ... канд. техн. наук / Голованева Надежда Викторовна. – Москва, 2015. – 156 с.
38. Ricardo, K. B. Surfactant-free exfoliation of graphite in aqueous solutions [Электронный ресурс] / K. B. Ricardo, A. Sendekci, H. Liu // *Electronic Supplementary Material (ESI) for Chemical Communications*. This j. is © The Royal Society of Chemistry. – 2014. – Режим доступа : <http://www.rsc.org/suppdata/cc/c3/c3cc49273g/c3cc49273g.pdf>.
39. Colloidal Stability in Aqueous Suspensions: Two Variables [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.brookhaveninstruments.com/literature/pdf/ZetaPlus/ColloidalStabilityOctober.pdf>.
40. Yu, Wei. Nanofluids [Электронный ресурс] / Wei Yu, Huaqing Xie, Lifei Chen. – Режим доступа : <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/35437.pdf>.
41. De Andrade, M. J. Study of electrical properties of 2- and 3- dimensional carbon nanotubes networks: thesis in co-tutelle to obtain the title of Doctor in Engineering / Mônica Jung de Andrade. – Porto Alegre, 2010. – pp. 209.
42. Николайчик, Ю.А. Технологии приготовления и использования модифицированных наноструктурированными материалами противопопригарных покрытий для изготовления

отливок из железоуглеродистых сплавов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Николайчик Юрий Александрович. – Минск, 2013. – 25 с.

43. Кукуй, Д.М. Повышение высокотемпературной прочности противопригарных покрытий путем модифицирования наноструктурированными материалами / Д.М. Кукуй, Ю.А. Николайчик, Р.С. Филимоненко // Литье и металлургия. – 2011. – № 4(63). – С. 23–30.

44. Кукуй, Д. М. Закономерности формирования структурно-механических свойств противопригарных покрытий, модифицированных наноструктурированными материалами / Д. М. Кукуй, Ю. А. Николайчик, Р. С. Филимоненко // Литье и металлургия. – 2013. – № 1(69). – С. 43–47.

45. Harast, A. I. Formation Mechanism Of Wear Resisting Surface Layer On Cast Iron Moulds By Direct Surface Alloying / A. I. Harast // J. of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST). – 2015. –Vol. 2, Is. 9. –pp. 2591–2598.

46. Пивоварчик, А. А. Разделительное покрытие с высокими эксплуатационными характеристиками для пресс-форм литья под давлением алюминиевых сплавов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Пивоварчик Александр Антонович. – Минск, 2010. – 24 с.

47. Пивоварчик, А. А. Формирование слоя разделительного покрытия на поверхности пресс-форм при литье под давлением / А. А. Пивоварчик, А. М. Михальцов // Литье и металлургия. – 2015. – № 1(78). – С. 62–64.

48. Пивоварчик, А. А. Разделительные покрытия для пресс-форм литья алюминиевых сплавов под давлением / А. А. Пивоварчик, Я. С. Чайковский, А. М. Михальцов // Литье и металлургия. – 2013. – № 3(70). – С. 30–32.

49. Пивоварчик, А. А. Разделительные покрытия для пресс-форм литья алюминиевых сплавов под давлением на основе высокомолекулярных гетероцепных кремнийорганических соединений / А. А. Пивоварчик, Е. А. Горбачевский, М. Ю. Серенко // Весн. Гродзен. дзяржаўнага ўн-та імя Янкі Купалы. Сер. 6. Тэхніка. – 2014. – № 2(175). – С. 36–40.

50. Михальцов, А. М. Исследование газотворной способности материалов, используемых при разработке разделительных покрытий для пресс-форм литья алюминиевых сплавов под давлением / А. М. Михальцов, А. А. Пивоварчик // Литье и металлургия. – 2012. – № 2. – С. 43–45.

АВТОРЫ

Илларионов Илья Егорович – д.т.н., профессор кафедры материаловедения и металлургических процессов ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова», Чебоксары, Россия.

Гильманшина Татьяна Ренатовна – к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО «Сибирский федеральный университет».

Ковалева Ангелина Адольфовна - доцент, ФГБОУ ВО «Сибирский федеральный университет».

Борисюк Вера Александровна – аспирант ФГБОУ ВО «Сибирский федеральный университет».

THE AUTHORS

Illarionov Ilya Egorovich - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Materials Science and Metallurgical Processes of FSBEI HE I.N. Ulyanova”, Cheboksary, Russia.

Gilmanshina Tatyana Renatovna - Ph.D., Associate Professor, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Siberian Federal University".

Angelina Kovaleva - Associate Professor, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Siberian Federal University".

Borisyuk Vera Alexandrovna - a graduate student of the Federal State-Funded Educational Institution of Higher Education "Siberian Federal University".

ДИАГРАММА РАСТВОРИМОСТИ СИСТЕМЫ БОРНАЯ КИСЛОТА – ГЕКСАМЕТИЛЕНТЕТРАМИН – ВОДА ПРИ 25°C, КАК НАУЧНАЯ ОСНОВА СОВРЕМЕННОГО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

DIAGRAM OF SOLUBILITY SYSTEM BORIC ACID - HEXAMETHYLENETETRAMINE - WATER AT 25 ° C, AS A SCIENTIFIC BASIS FOR MODERN MATERIAL SCIENCE

ИЛЛАРИОНОВ И.Е., САДЕТДИНОВ Ш.В., СТРЕЛЬНИКОВ И.А.
(ФГБОУ ВПО ЧГУ им. И.Н.Ульянова, г.Чебоксары, Россия)

ILLARIONOV I.E., SADETDINOV SH.V., STRELNIKOV I.A.
(FGBOU VPO ChGUim. I.N. Ulyanova, Cheboksary, Russia)

***Аннотация.** Методами растворимости и определения вязкости, плотности, показателя преломления насыщенных растворов изучена тройная система из борной кислоты, гексаметилентетрамина и воды при 25°C. Диаграмма растворимости системы $H_3BO_3 - C_6H_{12}N_4 - H_2O$ при 25°C состоит из трех ветвей кристаллизации – борной кислоты, гексаметилентетрамина и инконгруэнтно растворимого двойного соединения эквимолекулярного состава $H_3BO_3 \cdot C_6H_{12}N_4$ (ортоборатгексаметилентетрамин). Установлены закономерности физико-химических процессов, протекающих при образовании нового вещества, что представляет собой научную основу современного материаловедения. Проведена идентификация нового соединения кристаллооптическим, денсиметрическим, термографическим, рентгенографическим и ИК спектроскопическим методами. Показана возможность применения ортоборатгексаметилентетрамина в составе известных теплоизоляционных смесей на основе трепела и эковаты для улучшения их физико-механических свойств.*

***Annotation.** The ternary system of boric acid, hexamethylenetetramine and water at 25° C was studied by solubility and determination of viscosity, density, refractive index of saturated solutions. The solubility diagram of the $H_3BO_3 - C_6H_{12}N_4 - H_2O$ system at 25° C consists of three crystallization branches - boric acid, hexamethylenetetramine and incongruently soluble double compound of equimolecular composition $H_3BO_3 \cdot C_6H_{12}N_4$ (orthoborate hexamethylenetetramine). The laws of physical and chemical processes occurring during the formation of a new substance, which is the scientific basis of modern materials science, have been established. A new compound has been identified by crystal-optical, densimetric, thermographic, X-ray and IR spectroscopic methods. The possibility of using orthoborate hexamethylenetetramine in the composition of known heat-insulating mixtures based on tripoli and ecowool to improve their physico-mechanical properties is shown.*

Ключевые слова: борная кислота, гексаметилентетрамин, ортоборатгексаметилентетрамин, диаграмма, растворимость, система $H_3BO_3 - C_6H_{12}N_4 - H_2O$ при $25^\circ C$, научная основа, материаловедение, кристаллооптический, денсиметрический, термографический, рентгенографический, ИК спектроскопический, теплоизоляционные смеси.

Keywords: boric acid, hexamethylenetetramine, orthoborate hexamethylenetetramine, diagram, solubility, $H_3BO_3 - C_6H_{12}N_4 - H_2O$ system at $25^\circ C$, scientific basis, materials science, crystal-optical, densimetric, thermographic, X-ray, IR spectroscopic, thermal insulation mixtures.

Создание новых технологий в различных отраслях индустрии, развитие машиностроения требует применения новых высококачественных материалов. По этой причине поиск новых материалов с требуемыми свойствами ведется непрерывно и является актуальной проблемой научных исследований [1,2]. С целью получения новых, эффективных соединений изучена система борная кислота – гексаметилентетрамин – вода при $25^\circ C$ методами физико-химического анализа, которые являются научной основой современного материаловедения [3,4].

Исходными веществами исследования были борная кислота (H_3BO_3) и гексаметилентетрамин ($C_6H_{12}N_4$) квалификации «х.ч.». Изотермическая среда создавалась в термостате с точностью $\pm 0,1^\circ C$. Перемешивание реакционной смеси осуществлялось в стеклянном сосуде с масляным затвором. Равновесие в системе достигалось через 10 часов, после чего производили отбор проб жидких и твердых фаз для анализа. Содержание борной кислоты определяли алкалиметрическим титрованием в присутствии маннита, гексаметилентетрамин анализировали методом Кьельдаля [5,6]. Составы истинных твердых фаз устанавливали методом Скрейнемакенса [7] и контролировали микрокристаллооптически. Свойства насыщенных растворов изучали измерением вязкости, плотности и показателя преломления.

Полученные данные по растворимости и свойствам жидких фаз в системе $H_3BO_3 - C_6H_{12}N_4 - H_2O$ при $25^\circ C$ приведены в таблице 1 и на рисунках 1,2.

Таблица 1

Растворимость и свойства жидких фаз системы $H_3BO_3 - C_6H_{12}N_4 - H_2O$ при $25^\circ C$

Жидкая фаза, мас.%		Σ	n	$\eta \cdot 10^3$, н·с·м ⁻²	$d \cdot 10^{-3}$, кг·м ⁻³	Твердый остаток, мас.%		Твердая фаза
H_3BO_3	$C_6H_{12}N_4$					H_3BO_3	$C_6H_{12}N_4$	
5,60	-	17,29	1,336	1,032	0,980	100	-	H_3BO_3
7,84	6,46	36,32				98,67	0,46	H_3BO_3
10,02	12,46	58,30	1,360	1,516	1,057	98,24	0,58	H_3BO_3
13,65	21,78	104,93	1,375	1,874	1,073	97,69	0,93	H_3BO_3
17,08	29,12	162,03	1,401	2,908	1,098	97,03	1,14	H_3BO_3
17,12	29,18	162,71	1,401	2,924	1,106	56,20	33,21	$H_3BO_3 + H_3BO_3 \cdot C_6H_{12}N_4$
17,10	29,20	162,67	1,401	2,930	1,120	31,60	68,28	$H_3BO_3 \cdot C_6H_{12}N_4$
12,30	36,42	161,15	1,412	2,918	1,121	31,67	68,34	$6H_3BO_3 \cdot C_6H_{12}N_4$
10,16	41,23	169,93	1,420	4,815	1,125	36,66	68,37	$H_3BO_3 \cdot C_6H_{12}N_4$
8,50	44,08	171,73	1,426	4,910	1,127	36,63	68,42	$H_3BO_3 \cdot C_6H_{12}N_4$

8,43	44,12	171,28	1,426	5,034	1,130	16,52	79,89	$C_6H_{12}N_4 + H_3BO_3 \cdot C_6H_{12}N_4$
8,40	44,09	170,83	1,426	4,841	1,116	0,98	98,57	$C_6H_{12}N_4$
4,10	45,03	137,43	1,424	4,614	1,112	0,60	99,17	$C_6H_{12}N_4$
-	46,94	113,75	1,421	4,582	1,081	-	100	$C_6H_{12}N_4$

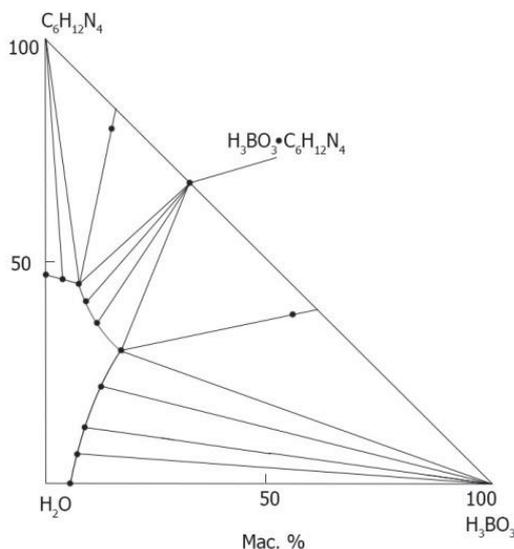


Рисунок 1 – Диаграмма растворимости системы $H_3BO_3 - C_6H_{12}N_4 - H_2O$ при $25^\circ C$

Согласно этим данным, построена диаграмма растворимости системы борная кислота – гексаметиленetetрамин – вода при $25^\circ C$, которая состоит из трех ветвей кристаллизации. Первая ветвь изотермы, идущая со стороны оси абсцисс, характеризует кристаллизацию борной кислоты. Добавление гексаметиленetetрамина к насыщенному раствору борной кислоты увеличивает её растворимость до 17,12% в эвтонической точке при концентрации амина 29,18% , что выше в три раза по сравнению с чистой растворимостью в воде. При этом вязкость и плотность реакционной массы возрастают. С эвтонического раствора берет начало вторая ветвь кристаллизации. Лучи Скрейнемакенса от этой ветви пересекаются на гипотенузе прямоугольного треугольника в точке с содержанием 31,60% H_3BO_3 и 68,28% $C_6H_{12}N_4$, что указывает на образование инконгруэнтно растворимого двойного соединения эквимолекулярного состава $H_3BO_3 \cdot C_6H_{12}N_4$ (ортоборатгексаметиленetetрамин). Его поле простирается на диаграмме по содержанию гексаметиленetetрамина с 29,20% до 44,08%. Третья ветвь изотермы растворимости, идущая со стороны $C_6H_{12}N_4$ доходит до точки, раствор которого содержит 8,43% борной кислоты и 44,12% гексаметиленetetрамина. Она соответствует выделению в твердую фазу $C_6H_{12}N_4$.

На образование соединения указывают и изотермы вязкости, плотности, суммы молей солей на 1000 молей воды и показателя преломления жидких фаз системы (рисунок 2). Изотермы свойств равновесных насыщенных растворов имеют по две экстремальные точки, что свидетельствует о образовании новой твердой фазы в результате химического взаимодействия исходных веществ.

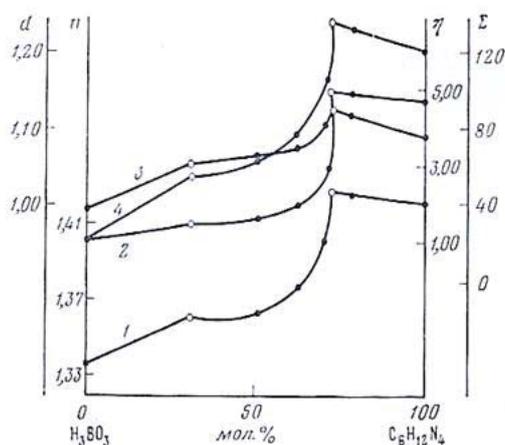


Рисунок 2 – Изотермы свойств жидких фаз системы $\text{H}_3\text{BO}_3 - \text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4 - \text{H}_2\text{O}$ при 25°C : 1 – показатель преломления, n ; 2 – вязкость, η ; 3 – плотность, d ; 4 – сумма молей солей на 1000 молей H_2O , Σ .

Двойное соединение $\text{H}_3\text{BO}_3 \cdot \text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4$ мелкокристаллическое вещество. Показатель преломления кристаллов, найденный иммерсионным методом с помощью поляризационного микроскопа МИН-8, равен 1,612; плотность – 1,318 г/см³; молярный объем – 153,12 см³/моль; удельный объем – 0,76 см³/г.

Соединение $\text{H}_3\text{BO}_3 \cdot \text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4$ идентифицировано термогравиметрически и рентгенофазовым анализом [8,9]. Термогравиметрические исследования, проведенные на дериватографе системы Ф.Паулик, И.Паулик, Л.Эрдей показали, что дериватограмма гексаметилентетрамина имеет один эндоэффект при 240°C , который указывает на его разложение с выделением формальдегида и аммиака. На термогравиграмме борной кислоты имеются термоэффекты при 148 и 170°C , характеризующие переход ортоборной кислоты в метаборную и далее в оксид бора. Термолиз нового соединения $\text{H}_3\text{BO}_3 \cdot \text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4$ происходит при 184°C , конечным продуктом которого является B_2O_3 .

Анализ рентгенометрических данных (рисунок 3), снятых на дифрактометре ДРОН-2 (CuK α -излучение) показывает, что вновь полученное соединение имеет свою кристаллическую структуру, отличающуюся от структуры борной кислоты и гексаметилентетрамина. Дифрактограмма соединения $\text{H}_3\text{BO}_3 \cdot \text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4$ по положению и интенсивности пиков, а также по параметрам кристаллической решетки отличается от таковых борной кислоты и гексаметилентетрамина.

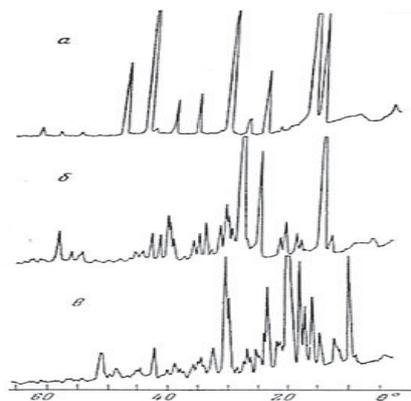


Рисунок 3 – дифрактограммы: а – $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4$; б – H_3BO_3 ; в – $\text{H}_3\text{BO}_3 \cdot \text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4$

Приведенные данные позволяют заключить, что ортоборатгексаметилентетрамин состава $\text{H}_3\text{BO}_3 \cdot \text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4$ является химически индивидуальным веществом с собственными физико-химическими константами.

Для выяснения природы химического взаимодействия борной кислоты с гексаметилентетрамином были измерены ИК спектры соединения и исходных веществ. Спектры сняты на спектрометре ИКС-22 в вазелиновом масле и приведены в таблице 2.

Таблица 2

Отнесение полос поглощения в ИК спектрах борной кислоты, гексаметилентетрамина и ортоборатгексаметилентетрамина

H_3BO_3	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4$	$\text{H}_3\text{BO}_3 \cdot \text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4$
3220 $\nu(\text{OH})$		3220 $\nu(\text{OH})$
	2960-2800 $\nu(\text{CH}_2)$	2980-2800 $\nu(\text{CH}_2)$
	1240 $\nu(\text{C} - \text{N})$	1310 $\nu(\text{C} - \text{N})$
1200 $\delta(\text{OH})$		1264, 1220, 1200, 1166 $\delta(\text{OH})$
885 $\nu(\text{BO}_{\text{сим.}})$		844, 820, 780 $\nu(\text{BO}_{\text{сим.}})$

Из данных таблицы 2 следует, что наблюдается смещение полос валентных колебаний

$\text{B} - \text{O}$ в область низких частот с расщеплением пика на три и валентных колебаний

$\text{C} - \text{N}$ в высокочастотную область. Понижение частоты полосы $\nu(\text{BO})$ можно объяснить уменьшением доли двойной связи $\text{B} = \text{O}$ вследствие конкурентного взаимодействия азота с атомом бора. Смещение полосы $\nu(\text{C} - \text{N})$ в направлении высоких частот связано со смещением неподеленной электронной пары атома азота на вакантную орбиталь атома бора. Следовательно, имеются основания допустить наличие донорно-акцепторной связи между компонентами в рассматриваемом соединении за счет пары электронов атома азота гексаметилентетрамина и вакантной орбитали атома бора [10,11].

Что бы показать примерную направленность применения полученного соединения в техническом плане, проведены исследования влияния его на физико-механические свойства известных теплоизоляционных смесей для теплоизоляции прибылей отливок из черных металлов на основе трепела и экваты. В научной работе [12] отмечено, что борная кислота проявляет модифицирующее воздействие на теплоизоляционные составы.

Исследования проводили на прочность при растяжении в сухом состоянии, прочность на сжатие в сыром состоянии, коэффициент теплопроводности при 1300°C и осыпаемость теплоизоляционных смесей по стандартным методикам [13].

Результаты, проведенных сравнительных испытаний физико-механических свойств (таблица 3) показали, что добавление ортоборатгексаметилентетрамина в известные теплоизоляционные смеси на основе трепела и экваты позволяет улучшить их физико-механические свойства (составы 1, 2, 3).

Таблица 3

Физико-механические свойства составов теплоизоляционной смеси

Показатели	Составы, мас.%			
	1	2	3	Известная
Прочность на растяжение в сухом состоянии, МПа	1,23	1,26	1,32	0,82-1,10
Прочность на сжатие в сыром состоянии, МПа	12,2	12,4	0,095	0,052-0,068
Коэффициент теплопроводности при 1300° С, Вт/м°С	0,14	0,16	0,16	0,10
Осыпаемость, %	1,5	1,7	1,6	2,1

ЛИТЕРАТУРА

1. Леонтьев, Е.Г. Применение экзотермических смесей на ремонтно-механической базе/Е.Г.Леонтьев, С.Л.Арапов, Т.Р.Гильманшина, Г.С.Саначева// В сборнике: Современные технологии в машиностроении и литейном производстве материалы III Международной научно-практической конференции. 2017. С.37-40.
2. Леушин, И.О. Разработка эффективных противопригарных покрытий литейных форм на основе алюмошлаковых наполнителей / И.О.Леушин, А.Н.Грачев// Литейное производство. - 2002. № 4. – С.52-57.
3. Илларионов, И.Е. Влияние фосфатборатных соединений на противокоррозионную устойчивость углеродистой стали в нейтральных водных средах / И.Е. Илларионов, Ш.В.Садетдинов, И.А.Стрельников, В.А. Гартфельдер // Черные металлы. 2018. №5. С. 47-53.
4. Илларионов, И.Е. Разработка боратфосфатных связующих смесей на основе фазовых равновесий в водно-солевых системах / И.Е.Илларионов, Ш.В.Садетдинов // В сборнике: Современные технологии в машиностроении и литейном производстве материалы III Международной научно-практической конференции. 2017.С.4-7.
5. Илларионов, И.Е. Разработка закалочной среды на основе фазовых равновесий в системе $N_2H_4CO - NH_2C_2H_4OH - H_2O$ при 25°С / И.Е.Илларионов, В.К.Половняк, И.В.Фадеев, Ш.В.Садетдинов // Научно-технический вестник Поволжья.2016. № 1. С.7-12.
6. Немодрук, А.А. Аналитическая химия бора и его соединений / А.А.Немодрук, Б.А.Маноле // Сер. Итоги наук и техники. М.: ВИНТИ. 1973. – 106 с.
7. Аносов, В.Я. Основы физико-химического анализа / В.Я. Аносов, М.И. Озерова, Ю.Я. Фиалков. – М.: Наука. 1976. – 504 с.
8. Шварц, Е.М. Исследование синтетических боратов / Е.М. Шварц// Рига: Изд-во Латв. ун-та. 1981. – С. 25–43.
9. Кондратьев, В.В. Структурные и фазовые изменения в природных боратах при нагревании / В.В. Кондратьев// – В кн. «Бораты и боратные системы» – Рига: Зинатне. 1978. – С. 93-100.
10. Плюснина, И.И. Кристаллохимические особенности и инфракрасные спектры поглощения боратов и боросиликатов / И.И. Плюснина, Ю.А. Харитоновна // Журн. структ. хим. 1963. –Т. 4. – № 4. – С. 555-568.
11. Накамото, К. ИК-спектры и спектры КР неорганических и координационных соединений / К. Накамото. – М.: Мир. 1991. – 536 с.
12. Годе, Г.К. Борсодержащие вяжущие материалы / Г.К.Годе // В кн. : Бораты народному хозяйству. Рига. Изд-во Латв. ун-та. 1982. – С. 88-96
13. Илларионов, И.Е. Теплоизолирующие смеси на основе металлофос-фатных связующих материалов/ И.Е. Илларионов, А.А. Евлампиев, И.А. Стрельников // Теория и технология металлургических и машиностроительных процессов. Липецк. 1994. – С. 285 - 287.

АВТОРЫ

Илларионов Илья Егорович – д.т.н., профессор, академик РАЕН, заслуженный деятель науки и техники РФ, заслуженный деятель науки ЧР, зав. кафедрой «Материаловедение и металлургические процессы», ФГБОУ ВПО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова», г. Чебоксары.

Садетдинов Шейиздан Вазыхович - д. х. н., профессор кафедры «Материаловедение и металлургические процессы» ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова».

Стрельников Игорь Анатольевич – к.т.н., доцент кафедры «Материаловедение и металлургические процессы», ФГБОУ ВПО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова», г. Чебоксары.

AUTHORS

Illarionov Ilya Egorovich - Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Honored Scientist of the Chechen Republic, Department of "Material Science and Metallurgical Processes", FGBOU HPE "Chelyabinsk State University. I.N. Ulyanov ", Cheboksary.

Sadetdinov Sheizdan Vazykhovich - doctor of Sciences (Chemistry), professor of Department «Materials Science and metallurgical processes» Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Chuvash state University I. N. Ulyanov».

Strelnikov Igor Anatolievich - Cand.Tech.Sci., Associate Professor of the Department "Materials Science and Metallurgical Processes", FGBOU HPE "Chelyabinsk State University. I.N. Ulyanov ", Cheboksary.

**ОРИГИНАЛЬНЫЕ МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ
ЛИТЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ**

**ORIGINAL RESEARCH METHODS
FOUNDRY PROCESSES**

**БАТЫШЕВ, А.И., (НИТУ МИСиС)
БАТЫШЕВ К.А., (МГТУ ИМ. Н.Э. БАУМАНА)
БЕЗПАЛЬКО В.И., (НПО «ГИДРАВЛИКА»)**

**BATYSHEV, A.I., (NITU MISiS)
BATYSHEV K.A., (MSTU NAME BAUMAN)
BEZPALKO V.I., (NGO "HYDRAULICS")**

***Аннотация:** В МГОУ им. В.С. Черномырдина (бывшем Всесоюзном заочном политехническом институте), были разработаны несколько оригинальных методик для исследования процесса литья с кристаллизацией под давлением (ЛКД), которые не повторены другими исследователями и которые можно использовать для изучения других литейных процессов.*

***Annotation:** In MGOU them. V.S. Chernomyrdin (the former All-Union Corresponding Polytechnic Institute), several original techniques were developed for studying the process of casting with crystallization under pressure (LKD), which were not repeated by other researchers and which can be used to study other foundry processes.*

***Ключевые слова:** исследования, методики, давление, термопары, матрица, пуансон, тепловые процессы, перемещение слоев отливки, макроструктура.*

***Keywords:** research, methods, pressure, thermocouples, matrix, punch, thermal processes, displacement of casting layers, macrostructure.*

Данные методики достаточно подробно описаны в монографиях [1...3]. Они в основном посвящены исследованию тепловых процессов в системе отливка-форма, используя в качестве основного инструмента термопары типа КТМС-ХА (ГОСТ 23847-79) с наружной стальной оболочкой диаметром 1,5 мм и электродами диаметром 0,2 мм. Наличие стальной оболочки позволят размещать термопары в любом сечении как отливки, так и литейной формы. Используемое давление (газовое, механическое) не продавливает расплав в пространство между электродами термопары, так как оно защищено плотным изолирующим материалом. Имея малый наружный диаметр, термопары быстро прогреваются и практически не оказывают существенного влияния на структуру отливки в зоне своего размещения.

Для изучения затвердевания отливки непосредственно с момента приложения давления использовали методику, основанную на отрыве корки, образовавшейся в течение определенного (заданного) промежутка времени со стороны торца прессующего пуансона, от не затвердевшего сплава, остающегося в матрице.

В матрицу 4 (рис. 1, а), изолированную листовым асбестом 3 (толщина листа 5 мм) для предотвращения быстрого роста корки со стороны дна и боковых стенок матрицы, заливали расплав. Затем пуансоном 2, торец которого не был защищен теплоизоляционным покрытием, воздействовали на расплав (рис. 1, б). Со стороны этого торца преимущественно и росла корка с момента соприкосновения пуансона с расплавом (рис. 1, в).

После выдержки под давлением в течение заданного промежутка времени пуансон поднимали в исходное положение, вместе с ним извлекали и корку 7, образовавшуюся со стороны пуансона, так как на торце пуансона были предусмотрены поднутрения в виде ласточкина хвоста. Толщину образовавшейся корки после охлаждения до комнатной температуры измеряли штангенциркулем до и после разрезки вдоль оси (с точностью $\pm 0,1$ мм). Так как толщина корки была различной от периферии к центру, то определяли ее среднее значение после нескольких замеров. Оставшийся в матрице сплав 8 затвердевал под атмосферным давлением, а затвердевший остаток толкателем 5 извлекали из матрицы.

В пуансоне 2 перед каждым опытом размещали три термодпары 1, рабочие спаи которых выступали за пределы его торца на расстояния 1; 5 и 10 мм.

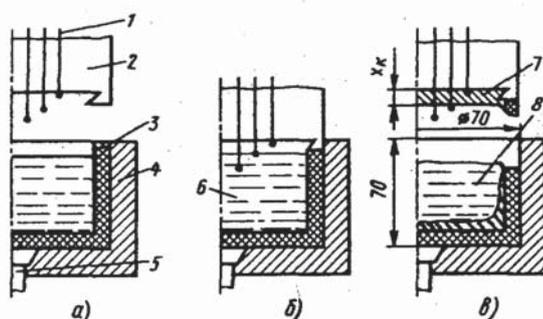


Рис. 1. Схема опыта по отрыву корки от незатвердевшего остатка:

а – после заливки расплава в матрицу; б – в момент соприкосновения пуансона с расплавом; в – после отрыва корки; 1 – термодпары; 2 – пуансон; 3 – теплоизоляционное покрытие (листовой асбест толщиной 5 мм); 4 – матрица; 5 – расплав; 6 – корка

Установлено, что при времени прессования $\tau_n < 10$ с корка легко отрывалась от не затвердевшего остатка, а при $\tau_n > 10$ с корка в некоторых случаях полностью не отрывалась, поэтому толщину последней определяли после разрезки полученной «корки» вдоль вертикальной оси.

Поверхность «корки», соприкасавшаяся с расплавом в момент отрыва, является гладкой у алюминия А7 и сплава АК12, кристаллизующихся при постоянной температуре. При этом к оси пуансона на «корке» наблюдалась выемка (понижение), т.е. толщина корки уменьшается при переходе от периферии к центру. На поверхности контакта корки с расплавом выявлены небольшие «кратеры», расположенные ближе к образующей поверхности.

Поверхность отрыва корки из сплавов АК7ч и АЛ24П, имеющих интервал кристаллизации, при выдержке ее под давлением до 4 с является относительно гладкой с небольшим количеством «кратеров». При $\tau_n > 5$ с она становится шероховатой с большим числом «кратеров», а при $\tau_n > 10$ с поверхность контакта корки с расплавом становится грубой, имея многочисленные выступы и углубления.

Методику, изложенную выше, можно использовать при проведении лабораторных работ для изучения процесса роста корки при отсутствии зазора между растущей коркой и формой. Преимущество этой методики (по сравнению с методом выливания жидкого остатка) заключается в том, что излишек расплава не сливается, смывая отростки кристаллов, а падают вертикально вниз при отрыве «корки». В качестве оборудования в данном случае может быть применен любой ручной пресс.

Разработана методика изучения тепловых процессов, протекающих в формирующейся отливке с момента заливки расплава матрицу до окончания воздействия давления. С использованием схемы пуансонного прессования исследовано затвердевание и охлаждение отливок типа стакана (наружный диаметр $D=60$ мм, высота $H=60$ мм, толщина стенки $X_{от}=5; 10; 15$ и 20 мм) из алюминия и сплавов на его основе. Схема размещения термопар в литейной форме представлена на рис. 2.

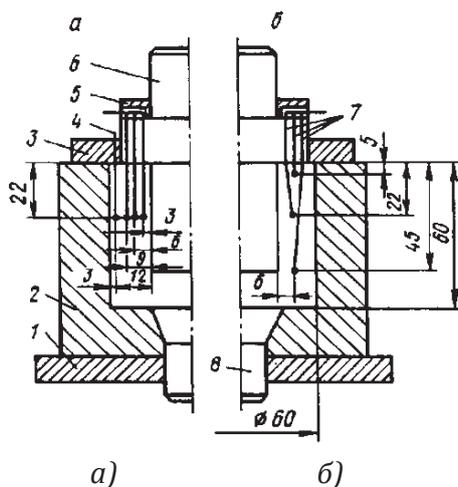


Рис. 2. Схемы установки термопар в полости матрицы при изготовлении отливки типа стакана ($X_{от}=15$ мм): а – по толщине стенки; б – по высоте стенки;
1 – нижняя плита; 2 – матрица; 3 – кольцо; 4, 7 – термопары; 5 – втулка;
6 – пуансон; 8 – толкатель

Для изучения перемещение отдельных слоев отливки по высоте под действием давления использована методика, разработанная в МГОУ, согласно которой на вертикальных стенках рабочей полости матрицы располагали стержни-магниты на строго фиксированных расстояниях от ее дна (рис. 3, а). К моменту окончания выдержки отливки в матрице под давлением они смещались вниз (рис. 3, б), причем каждый из них на определенное расстояние. Расположение стержней-магнитов в цилиндрической отливке диаметром 50 мм и высотой 110 мм показано на рис. 3, в).

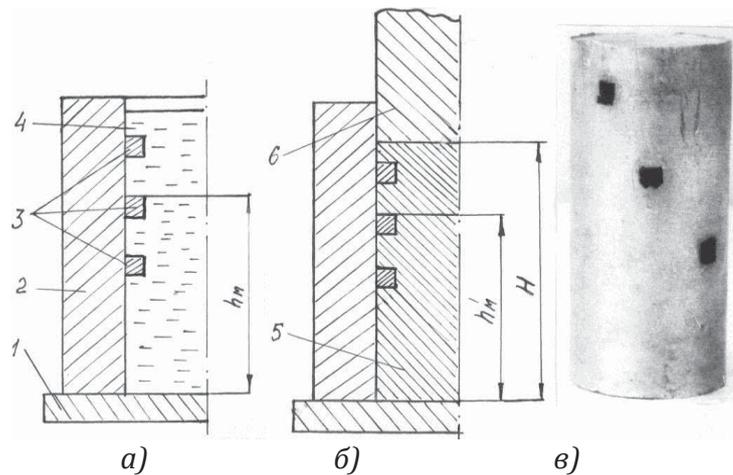


Рис. 3. Схемы установки постоянных магнитов по высоте матрицы до заливки расплава в матрицу (а) и их расположения в отливке (б); в – отливка диаметром 50 мм со стержнями-магнитами (темные квадраты)

Более 50% величины $\Delta h'_m/H$ характерно для зоны, распространяющейся вниз от верхнего торца отливки на величину $(0,25...0,30) H$, где H – высота отливки. Величина смещения отдельных зон отливки тем больше, чем больше объемная усадка сплава (металла) и давление прессования, чем меньше коэффициент затвердевания заготовки. Подтверждением последнего является тот факт, что отливки из сплава АК7ч уплотняются лучше, чем из сплава А356.2, отличающиеся друг от друга условиями затвердевания, как было показано выше. Уменьшение скорости охлаждения отливки из одного и того же сплава также приводит к лучшему ее уплотнению.

Использованная методика позволила экспериментально установить, что наибольшее перемещение слоев, а, следовательно, и лучшее уплотнение затвердевающей под давлением отливки имеет место вблизи прессующего пуансона и распространяется вниз на $1/3$ высоты от верхнего торца отливки (места приложения давления).

Разработана методика изготовления отливок, затвердевших под поршневым давлением в частично теплоизолированных формах.

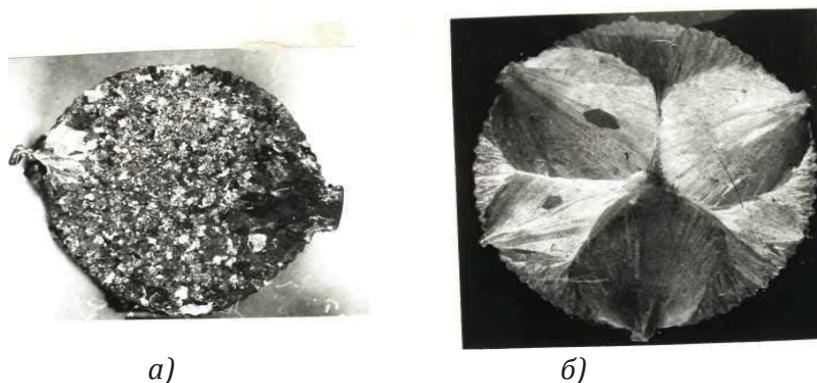


Рис. 4. Макроструктура поперечных темплетов отливок, изготовленных в условиях атмосферного давления (а) и поршневого прессования (б)

Типичные макроструктуры темплетов приведены на рис. 4. Видно, что конфигурация зоны крупных кристаллов, растущих от неизолированной поверхности матрицы, приближается к окружности. В отливках, затвердевших под атмосферным давлением (рис. 4, а), она намного меньше, чем в отливках, затвердевших под механическим давлением (рис. 4, б).

ЛИТЕРАТУРА

1. Батышев А.И. Кристаллизация металлов и сплавов под давлением. – 2-ое изд. – М.: Металлургия, 1990. – 144 с.
2. Батышев К.А. Литье с кристаллизацией под давлением. – М.: Изд-во МГОУ, 2009. – 167 с.
3. Безпалько В.И. Литье с кристаллизацией под давлением силуминов. – М.: Изд-во МГОУ, 2011. – 210 с.

АВТОРЫ

Батышев, А.И. д.т.н., профессор кафедры ЛПиХО НИТУ МИСиС, (Москва, Ленинский проспект, д.4), т. +79030181705, e-mail: konstbat63@mail.ru

Батышев К. А. – д.т.н., профессор кафедры МТ-13, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, (105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр.1), т. +79030181707, e-mail: konstbat63@mail.ru

Безпалько В.И., к.т.н., НПО «ГИДРАВЛИКА», т. +79037647102, e-mail: konstbat63@mail.ru

AUTHORS

Batyshev, A.I. Doctor of Technical Sciences, Professor of the Chair of the LPiKhO NITU MISiS, (Moscow, Leninsky Prospekt, 4), t. +79030181705, e-mail: konstbat63@mail.ru

Batyshev K. A. - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of MT-13, Moscow State Technical University. N.E. Bauman, (105005, Moscow, 2nd Bauman Str., 5, building 1), t. +79030181707, e-mail: konstbat63@mail.ru

Bezpalcko V.I., Ph.D., NGO "HYDRAULICS", t. +79037647102, e-mail: konstbat63@mail.ru

**ПРОИЗВОДСТВО КАЧЕСТВЕННЫХ АВИАЦИОННЫХ ОТЛИВОК
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ ПРОГРАММ
КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

**PRODUCTION OF QUALITATIVE AIRCRAFT CASTINGS WITH
THE USE OF MODERN PROGRAMS OF COMPUTER MODELING**

БАТЫШЕВ К.А. (МГТУ им. Н.Э. Баумана)
СЕМЕНОВ К.Г. (МГТУ им. Н.Э. Баумана)
СВИРИДЕНКО Д.С. (ФГУП ВИАМ)
ГЕОРГИЕВСКИЙ М.Г. (НПО Гидравлика)
ПРОХОРОВ А.А. (АО «НПЦ Газотурбостроения «Салют»)
КАТЕЛИН В.А. (АО «НПЦ Газотурбостроения «Салют»)

BATYSHEV K.A. (MSTU. BAUMAN)
SEMENOV K.G. (MSTU. BAUMAN)
SVIRIDENKO D.S. (FSUE VIAM)
GEORGIEVSKY M.G. (NPO HYDRAULICS)
PROKHOROV A.A. (JSC SPC GAS TURBINE CONSTRUCTION SALYUT)
KATELIN V.A. (JSC SPC GAS TURBINE CONSTRUCTION SALYUT)

***Аннотация:** при производстве отливок ответственного назначения важно добиваться получения высокого выхода годного литых заготовок. В настоящее время этому способствует широкое применение в производстве современных средств компьютерного моделирования отливок.*

***Annotation:** in the production of castings of critical use, it is important to obtain a high yield of suitable cast billets. Currently, this is facilitated by the widespread use in the manufacture of modern tools for computer modeling castings.*

***Ключевые слова:** дефекты отливок, компьютерное моделирование, современные технологии САПР, система ProCAST, система ПолигонСофт, распределение температурных полей, усадочная пористость.*

***Key words:** defects in castings, computer modeling, modern CAD technologies, ProCAST system, PolygonSoft system, distribution of temperature fields, shrinkage porosity.*

Дефекты отливок условно подразделяют на поверхностные, внутренние, отклонения размеров и конфигурации, несоответствия по химическому составу, структуре и механическим свойствам [1,5].

Так, дефекты поверхности у отливки «Створка сверхзвуковая ведомая» (рис. 1) могут возникнуть вследствие недостаточной подготовки поверхности пресс-формы, плохого качества поверхности моделей, плохого смачивания поверхности моделей суспензией, пробивания первого слоя суспензии песком при обсыпке.

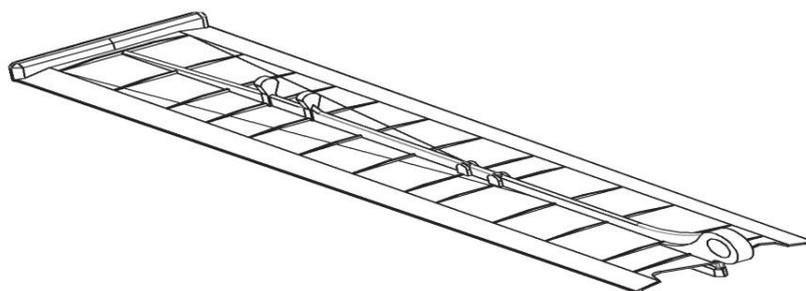


Рис. 1. Створка сверхзвуковая ведомая (общий вид)

К внутренним дефектам отливки относятся усадочные раковины, возникающие в результате недостаточного питания при затвердевании; газовые раковины, образующиеся вследствие недостаточной газопроницаемости оболочковой формы.

Отклонения размеров и конфигурации отливки от заданных могут вызваны нестабильностью усадки пастообразного модельного состава из-за содержащегося в нем воздуха.

Несоответствие химического состава и структуры отливок заданным могут быть вызваны отклонениями в составе шихтовых материалов, нарушениями режимов плавки сплава и режимов охлаждения отливки в форме.

Компьютерное моделирование формирования отливок является исключительно важным инструментом исследования процесса литья и выбора рациональных технико-технологических решений. Для решения технологических задач на основе математических моделей выполняют расчеты на ЭВМ кинетики затвердевания отливки, питания, усадки металла, деформации и других процессов формирования отливок. Для расчетов используют численные методы конечных разностей (МКР) и конечных элементов (МКЭ). С помощью геометрического моделирования и машинной графики производится выдача изображений полей распределения температуры, твердой фазы, усадочной пористости и раковин, параметров макроструктуры и других результатов расчета затвердевания отливки в условиях выбранного технологического процесса. Полученный объем информации позволяет оценить этот вариант технологического процесса и при необходимости внести в него соответствующие изменения. Следовательно, проектирование технологического процесса проводится в интерактивном диалоговом режиме, заключающемся в поиске рационального решения путем последовательного изменения и расчетной проверки измененных вариантов.

В настоящее время при проектировании технологических процессов литья «Створок сверхзвуковых ведомых» из никелевых сплавов применяют системы автоматизированного моделирования литейных процессов (САМ ЛП), пакеты прикладных программ (ППП) расчетов литниково-питающих систем (ЛПС) и компоновки на них блоков лопаток, а также интегрированные системы автоматизированного проектирования литейной технологии (ИСАПР ЛТ) [2].

Для моделирования процессов заливки и затвердевания использовались современные технологии САПР (ProCAST и ПолигонСофт).

Основа ProCAST — единый графический интерфейс Visual Environment с интегрированными в него генератором конечно-элементных сеток, препроцессором, базами данных, постпроцессором и двумя решателями: гидродинамическим (Flow solver) и тепловым (Thermal solver). В качестве дополнительных опций предлагается большой список модулей, расширяющих базовые возможности программы.

Почти все модули ProCAST используют для решения соответствующих дифференциальных уравнений метод конечных элементов (МКЭ). Исключение составляют модуль расчета газовой и усадочной микропористости (Advanced Porosity Module), использующий метод конечных разностей (МКР), и модуль расчета процесса зарождения и роста зеренной структуры (SAFE), сочетающий в себе МКЭ и клеточные автоматы.

Для подготовки сеточной модели в ProCAST используется автоматизированный генератор 2D- и 3D-конечно-элементной сетки Visual-Mesh. Он позволяет импортировать CAD-модели в форматах IGES, STEP, CATIA, ProE, UG и Parasolid, а также сеточные 2D- и 3D-модели в форматах NASTRAN, PATRAN, I-DEAS, ANSYS, ABAQUS и др. В составе Visual-Mesh есть алгоритмы для автоматического создания многослойных сеточных оболочек, что позволяет формировать модели керамической формы, теплоизоляционных материалов и т.п., не прибегая к моделированию в CAD-системе. Специальная среда выполнения типовых операций использует пошаговую схему работы и проводит пользователя через необходимые этапы построения сетки до полного завершения ее генерации.

В данной программе учитывали следующие параметры:

материал отливки ВЖЛ12У-ВИ; материал оболочки – керамика; толщина оболочки – 9 мм; температура заливки металла $T_{зал}=1455$ °С; температура формы $T_{\phi}=1050$ °С; температура муфеля $T_M=1090$ °С; температура термостата $T_T=900$ °С.

В данной программе моделировалась заливка и распределение температурных полей.

На рис. 2 видно, что показания температуры в отливке достаточно равномерно распределены. Это уменьшает вероятность образования дефектов. Быстрее всех начинает затвердевать самая тонкая часть отливки, после чего затвердевают более массивные части литниковой системы и питатели. В последнюю очередь затвердевает металл в литниковой чаше.

СКМ ЛП "ПолигонСофт"- система моделирования литейных процессов методом конечных элементов. Она применима для моделирования практически любых литейных технологий и любых литейных сплавов [3, 4]. Долгое время СКМ ЛП "ПолигонСофт" оставалась единственной в мире системой моделирования литейных процессов, имеющей в составе специальную модель для расчета микропористости.

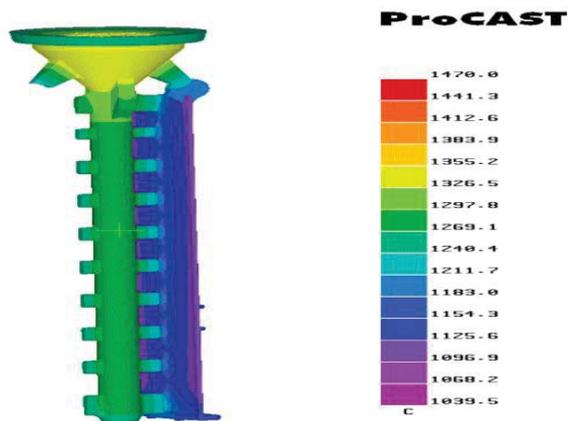


Рис. 2. Распределение температур.

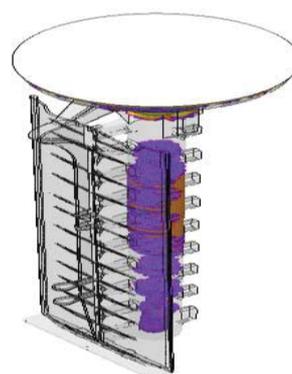


Рис. 3. Пористость в отливке

До сих пор, эта модель может считаться наиболее устойчивой, а результаты, полученные с ее помощью, способны удовлетворить самых требовательных пользователей.

По многим параметрам, СКМ ЛП "ПолигонСофт" может считаться российским аналогом известной системы ProCAST.

Система "ПолигонСофт" имеет модульную структуру и разные варианты поставки. Это позволяет производителям ПО максимально охватить рынок программного обеспечения для моделирования литья. Не только промышленные гиганты, но и средние, и малые предприятия в состоянии приобрести программу, благодаря гибкой ценовой политике ООО "Полигон".

Моделирование литейного процесса проводили в системе компьютерного моделирования (СКМ ЛП) «PoligonSoft».

Исходные данные для расчетов аналогичны приведенным при расчете в системе ProCAST.

Принимали время выдержки формы в печи перед заливкой – 10 мин., выдержка в муфеле после заливки – не менее 8 мин., выдержка в термостате при температуре $(900 \pm 50)^\circ\text{C}$ – не менее 1 час.

В этой программе было промоделировано распределение температур и возможная пористость.

Результаты моделирования представлены на рис. 3. По результатам моделирования усадочной пористости видно, что ЛПС должна обеспечивать получение чистой отливки, т.е. пористость образуется только в стояке.

Время охлаждения блока до температуры $(900 \pm 50)^\circ\text{C}$ (температура в термостате) составило 889 сек. За данное время отливка полностью закристаллизовалась.

Выводы: использование в процессе разработки технологии отливок ответственного назначения современных средств моделирования позволяет гарантированно получать литые заготовки повышенного качества, а также значительно сократить время разработки технологического процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Материаловедение и технология материалов: Учебное пособие / Батышев А.И., Смолькин А.А., Батышев К.А., Безпалько В.И. и др. под ред. А.И. Батышева и А.А. Смолькина. – М.: ИНФРА-М, 2014. - 288 с.
2. Батышев К.А., Кателин В.А., Семенов К.Г., Панкратов С.Н., Колосков С.В. Современные системы моделирования и измерительные комплексы для получения газотурбинных отливок // Литейное производство, №2, С. 28-31.
3. Батышев К.А., Кателин В.А., Семенов К.Г., Панкратов С.Н., Колосков С.В., Васяров А.В. Использование современных систем моделирования и контроля для производства отливок ответственного назначения // Современные материалы, техника и технологии, 2018, №1, С. 4-10.
4. Батышев К.А., Семенов К.Г., Демьянов Е.Д., Юсипов Р.Ф., Паремский И.Я., Прохоров А.А., Кателин В.А. Получение качественных отливок ответственного назначения с использованием современных методов моделирования // Литейщик России, 2018, №4, С. 26-28.
5. Методы контроля и обеспечения качества отливок: Учебное пособие / Илларионов И.Е., Батышев А.И., Батышев К.А., Гартфельдер В.А., Стрельников И.А. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2018 – 100 с.

АВТОРЫ

Батышев К. А. – д.т.н., профессор кафедры МТ-13, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, (105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр.1), т. +79030181707, e-mail: konstbat63@mail.ru

Семенов К. Г. – к.т.н, доцент кафедры МТ-13 Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана(105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1), т. +79166945531, e-mail: semenovkg@bmstu.ru

Свириденко Д.С. – к.т.н., начальник отдела 50 ФГУП ВИАМ, (Москва, ул. Радио д.17), т. +79031933289. e-mail: d_sviridenko@mail.ru

Георгиевский М.Г. – к.т.н., генеральный директор НПО Гидравлика, (105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр.1), т. +79778326547, konstbat63@mail.ru

Прохоров А.А. - инженер, АО «НПЦ газотурбостроения «Салют», (105118, г. Москва, проспект Буденного, 16, к.2.), konstbat63@mail.ru

Кателин В.А. – инженер, АО «НПЦ газотурбостроения «Салют», (105118, г. Москва, проспект Буденного, 16, к.2.), konstbat63@mail.ru

AUTHORS

Batyshev K. A - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department MT-13, Moscow State Technical University. N.E. Bauman, (105005, Moscow, 2nd Bauman Str., 5, building 1), t. +79030181707, e-mail: konstbat63@mail.ru

Semenov K. G. - Cand.Tech.Sci., Associate Professor of the Department MT-13 Moscow State Technical University. N.E. Bauman (105005, Moscow, 2nd Bauman Str., 5, building 1), t. +79166945531, e-mail: semenovkg@bmstu.ru

Sviridenko DS - Ph.D., Head of Division 50 FSUE VIAM, (Moscow, Radio St. 17), t. +79031933289. e-mail: d_sviridenko@mail.ru

Georgievsky M.G. - Ph.D., General Director of the NGO Gidravlika, (105005, Moscow, 2nd Bauman Str., 5, p. 1), t. +79778326547, konstbat63@mail.ru

Prokhorov AA - Engineer, JSC "NPC of gas turbine construction" Salyut ", (105118, Moscow, Budenny prospect, 16, room 2.), konstbat63@mail.ru

Katelin VA - Engineer, JSC "NPC of gas turbine construction" Salyut ", (105118, Moscow, Budenny prospect, 16, room 2.), konstbat63@mail.ru

Batyshev K.A. Doctor of Technical Science, professor of department MT-13, Bauman Moscow Technical University (ul. Baumanskaya 2-ya, 5/1, Moscow, 105005), tel: 899030181707, e-mail: konstbat@rambler.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ НА КОРРОЗИЮ МЕТАЛЛА

RESEARCH OF THE EFFECT OF POLLUTION OF THE SURFACE OF AUTOMOBILE ROADS TO METAL CORROSION

¹ИЛЛАРИОНОВ И.Е., ¹САДЕТДИНОВ Ш.В., ²ФАДЕЕВ И.В.

(¹ – ФГБОУ ВПО ЧГУ им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия;

² – ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный
технический университет (МАДИ)», Волжский филиал)

¹ILLARIONOV I. Y., ¹SADETDINOV SH. V., ²FADEYEV I. V.,

(¹ – Federal state budgetary educational institution of higher professional education
«Chuvash state University I. N. Ulyanov», Cheboksary, Russia;

² – Federal state budgetary educational establishment of the Higher Education
«Moscow automobile and road technical University (MADI)», Volzhskie branch)

Реферат. Рассматривается процесс коррозии стали 08кп, применяемой для изготовления кузовов автомобилей ВАЗ, в среде, имитирующей дорожные условия эксплуатации автомобилей. Отмечено, что у автомобиля наиболее подверженным коррозионному разрушению агрегатом является кузов, особенно его днище. Решающую роль в этом процессе играют агрессивные загрязнения поверхности автомобильных дорог. Исследованиями проб загрязнений дорожной поверхности автомобильной трассы М7 «Москва-Уфа» установлено, что основными компонентами загрязнения являются ионы хлоридов Cl^- , аммония NH_4^+ , сульфатов SO_4^{2-} и нитратов NO_3^- .

Для определения коррозионной агрессивности загрязнения дорожной поверхности были проведены сравнительные исследования его с раствором хлорида натрия, которые показали, что среда, имитирующая дорожные условия, по коррозионной агрессивности равноценна 5%-му водному раствору хлорида натрия. Приведены экспериментальные данные зависимости коррозии стали в выбранных средах от продолжительности экспозиции и аэрации растворов. Выведены кинетические уравнения зависимости скорости коррозии от времени.

Экспериментально выявлено, что добавление в среду, имитирующую дорожные условия (СИДУ), соединения карбамидмоноборат калия (КМК) состава $KBO_2 \cdot (NH_2)_2CO$ повышает коррозионную стойкость стали 08кп. КМК рекомендован в качестве эффективной противокоррозионной присадки к водным технологическим средствам.

Abstract. The article reveals the corrosion process of 08crs steel applied to the manufacture of VAZ vehicles in an environment simulating road conditions of the automobile operation. It is noted that the most susceptible to corrosive destruction

unit of the automobile is the body, especially its bottom. The crucial role in this process is played by aggressive surface contaminations of highways. Investigations of pollution of the road surface of M7 automobile route «Moscow-Ufa» it is found that the main components of pollution are the ions of Cl⁻ chlorides, NH₄⁺ ammonium, SO₄²⁻ sulfates and NO₃⁻ nitrates.

To determine the corrosiveness of road surface pollution, comparative researches with a sodium chloride solution were conducted, which showed that the environment simulating road conditions on corrosion aggressiveness is equivalent to a 5% water solution of sodium chloride. There were presented the experimental data on the dependence of steel corrosion in the chosen environments on the exposure duration and the aeration of solutions. The kinetic equations for the corrosion rate versus time are presented.

It has been experimentally found that the addition of the compound of carbamide monoborate potassium (CMP) of KBO₂ · (NH₂)₂CO composition to the environment simulating road conditions increases the corrosion resistance of steel 08rcs. CMP is recommended as an effective anticorrosive additive to water technological facilities.

Ключевые слова: коррозия кузова автомобиля; сталь 08кп; среда, имитирующая дорожные условия эксплуатации автомобилей; раствор хлорида натрия; коррозионные потери металла; зависимость коррозионных потерь стали 08кп от продолжительности выдержки образцов в растворах; аэрация растворов; ингибитор коррозии; карбамидмоноборат калия состава KBO₂ · (NH₂)₂CO; водные технологические среды.

Key words: corrosion of the car body; steel 08rcs; environment, simulating road conditions for the operation of cars; sodium chloride solution; metal corrosion losses; the dependence of 08rcs steel corrosion losses on the duration of endurance of samples in solutions; aeration of solutions; corrosion inhibitor; carbamidemonoborate potassium of KBO₂ · (NH₂)₂CO composition; water technological environments.

Введение

Впервые на коррозию кузовов легковых автомобилей, как широко распространенное явление, обратили внимание в 1950-х годах. В эти годы начали использовать кузова несущей конструкции и изменился коррозионный характер окружающей среды, выразившийся в росте содержания сернистых соединений в атмосфере. Кузов является основным и самым дорогим элементом легкового автомобиля. В общей стоимости у легковых автомобилей его удельный вес составляет 72-78%, а у автобусов – 80-85%. Капитальный ремонт кузова занимает 50-70% общего объема ремонтных работ автомобиля. Стоимость ремонтного восстановления наиболее изношенных кузовов часто приближается к стоимости нового кузова. Для изготовления кузова в основном применяют листы из стали 08кп толщиной 0,5-1,5 мм, затрачиваются в большом количестве дорогие и дефицитные материалы. Срок службы современного

автомобиля в основном зависит от коррозионной стойкости его кузова, а она лимитируется противокоррозионными свойствами применяемых защитных покрытий, конструкцией кузова и т. д. [1-4].

Кузов в коррозионном отношении более уязвим, чем другие узлы, агрегаты и детали автомобиля, так как он имеет много неventedулируемых полых элементов, труднодоступных для противокоррозионной обработки. Детали кузова автомобиля подвержены действию не только коррозионно-активных составляющих окружающей среды и дорожной поверхности, но и механическому воздействию от удара выбрасываемых колесами различных частиц (песка, гравия, щебня, почвы и т. п.). Кузова большинства легковых автомобилей имеют несущую конструкцию (нет отдельной рамы) и воспринимает нагрузки от собственной массы (агрегатов), пассажиров и груза. Каркас кузова неразъемный, поскольку детали соединены различными видами сварки. Несущая конструкция кузовов наиболее распространенная в автомобилестроении, но она имеет большое количество сварочных швов, щелей, зазоров, которые являются благоприятным условием для возникновения и развития коррозии [5, 6]. Детали кузова автомобиля подвержены действию коррозионно-активных составляющих окружающей среды и дорожной поверхности. Решающую роль в коррозионном разрушении кузова автомобиля, особенно его днища, играют агрессивные загрязнения поверхности автомобильных дорог и химические средства, применяемые для борьбы с обледенением дорог в зимнее время [7]. Из применяемых на практике способов защиты металлоизделий от коррозии широкое распространение в настоящее время получили ингибиторы коррозии металлов [8-11].

Экспериментальные исследования

С целью изучения процесса коррозии черных металлов в средах, имитирующих условия эксплуатации автомобилей были исследованы пробы загрязнений дорожного полотна автомобильной трассы М7 «Москва – Уфа», в весенне-зимний период эксплуатации. Они показали, что основными компонентами загрязнения являются ионы хлоридов Cl^- , аммония NH_4^+ , сульфатов SO_4^{2-} и нитратов NO_3^- с концентрацией, мг-экв/л: 22,00 – 26,00; 0,25 – 0,55; 5,18 – 5,82; 5,00 – 7,00 соответственно [12].

Для определения коррозионной агрессивности загрязнения дорожной поверхности были проведены сравнительные исследования его с раствором хлорида натрия. Для этого готовили водные 1, 3, 5 и 7,5%-ые растворы хлорида натрия и среду, имитирующую дорожные условия (СИДУ), которую создавали, исходя из значений концентрации активных ионов загрязнений, растворением в одном литре дистиллированной воды:

- хлористого натрия $NaCl$ – 1,404 г;
- аммиачной воды NH_4OH – 0,0068 г;
- нитрата натрия $NaNO_3$ – 0,051 г;
- сульфата натрия Na_2SO_4 – 0,3905 г.

При этом концентрация ингредиентов рассчитана на максимальное возможное их содержание в дорожных условиях.

Исследования проводили по стандартным методикам, приведенным в научной литературе [13-15]. Для этого образцы из стали 08кп размерами 30× 100 × 0,8 мм помещали в раствор хлорида натрия и в СИДУ. Коррозионные потери массы образцов за год (скорость коррозии) K вычисляли по формуле:

$$K = \frac{M_1 - M_2}{P \cdot T} \cdot 10000 \cdot 8760, \text{ г/м}^2 \cdot \text{год}, \quad (1)$$

где M_1, M_2 – масса образца до и после испытаний, г;

P – площадь образца, см²;

T – продолжительность экспозиции, ч.

1/10000 – коэффициент перевода см² в м²;

1/8760 – коэффициент перевода час. в год.

Экспериментальные данные по определению коррозионных потерь массы образцов из стали 08кп в растворах хлорида натрия и СИДУ при различных концентрациях растворов приведены в табл. 1 и 2, соответственно.

Таблица 1.

Коррозионные потери массы образцов из стали 08кп в растворах хлорида натрия при различных концентрациях

Концентрация раствора	№ образцов	Размеры образцов, см		Масса образцов, г		Годовые коррозионные потери массы образцов, г/м ² ·год	
		длина, а	ширина, в	до испытания М ₁	после испытания М ₂	каждого образца	средние по варианту
Раствор хлорида натрия							
1	01	10,01	3,00	20,16425	20,15595	257,85	248,16
	02	10,01	3,00	20,74445	20,73655	245,42	
	03	10,60	3,01	20,95500	20,94981	215,43	
	04	9,98	3,00	21,00395	20,99565	258,62	
	05	10,00	3,01	21,00420	20,99570	263,47	
3	06	10,00	2,99	20,85305	20,83405	549,75	595,57
	07	9,99	2,99	20,89445	20,87570	585,53	
	08	10,01	3,00	21,08095	20,06205	587,15	
	09	10,00	3,01	21,09910	21,08010	588,95	
	10	10,00	3,00	21,31130	21,29125	623,49	
5	11	9,89	3,00	21,31245	21,26845	1369,62	1490,64
	12	9,98	3,00	20,23600	20,19055	1416,16	
	13	10,01	3,00	20,73715	20,68715	1553,31	
	14	10,00	3,01	20,95200	20,90260	1529,73	
	15	10,01	3,00	20,97235	20,92135	1584,37	
7,5	16	10,00	3,01	21,84590	21,78590	1857,97	1816,61
	17	10,00	3,00	20,98115	20,92235	1826,69	
	18	9,99	3,00	20,25610	20,19910	1774,28	
	19	10,00	3,00	20,25890	20,20325	1733,65	
	20	10,01	3,01	21,22890	21,16785	1890,48	

Таблица 2.

Коррозионные потери стали 08кп в средах, имитирующих дорожные условия при различных концентрациях

Концентрация раствора	№ образцов	Размеры образцов, см		Масса образцов, г		Расчетные годовые потери образцов, г/м ² ·год	
		длина, а	ширина, в	до испытания М ₁	после испытания М ₂	каждого образца	средние по варианту
Раствор, имитирующий дорожные условия							
25	21	9,98	2,99	20,94625	20,93575	328,22	331,62
	22	9,98	2,99	20,94450	20,93200	390,84	
	23	10,00	2,98	21,05500	20,04460	325,50	
	24	10,00	3,00	21,00420	20,99435	306,30	
	25	10,00	3,00	21,05310	21,04320	307,86	
50	26	9,99	3,02	20,98095	20,96565	473,21	480,35
	27	10,01	3,00	21,06805	21,05175	506,38	
	28	10,01	3,00	21,07710	21,06180	476,85	
	29	10,00	3,00	21,81305	21,86755	482,00	
	30	9,98	3,00	20,58280	20,56790	463,34	
75	31	9,98	3,01	21,56210	21,53170	944,18	956,69
	32	10,01	3,00	21,08145	21,04995	978,34	
	33	10,00	3,00	21,04980	21,01930	948,46	
	34	10,00	3,00	21,07760	21,04760	932,91	
	35	10,00	3,00	21,09800	21,06550	979,55	
100	36	10,01	2,99	21,12805	21,07805	1558,33	1572,51
	37	10,00	3,00	21,23765	21,18810	1539,32	
	38	10,02	2,98	21,22005	21,16805	1625,93	
	39	9,99	2,98	20,80070	20,74865	1630,72	
	40	10,01	3,00	21,27070	21,22215	1508,26	

Согласно данным табл.1,2. среда, имитирующая дорожные условия при максимальной концентрации, по коррозионной агрессивности равноценна 5%-му водному раствору хлорида натрия, поэтому для последующих исследований принята данная концентрация.

Экспериментальные данные зависимости коррозии стали в выбранных средах от продолжительности экспозиции приведены в таблице 3. Продолжительность лабораторных исследований составляла 10 суток, а выемка образцов и оценка коррозионных потерь были проведены через 24, 72, 120, 168 и 240 часов.

Таблица 3.

Зависимость коррозии стали 08кп от продолжительности выдержки образцов в растворах

Продолжительность выдержки образцов в растворах, ч	Потери металла, г/м ²	
	в 5%-ом растворе хлорида натрия	в среде, имитирующей дорожные условия
Без аэрации		
24	22,43	12,65
72	49,95	30,34
120	70,35	45,65
168	88,33	68,24
240	112,08	80,74
С аэрацией раствора в течение 4 ч в сутки		
24	50,47	37,23
72	98,83	84,11
120	136,35	118,60
168	170,50	150,14
240	209,01	190,39

Аэрация растворов увеличивает коррозионные потери массы образцов. В расчете на год увеличение коррозионных потерь составляет, %:

- в растворе хлорида натрия..... 37,50;
- в СИДУ 64,20.

В соответствии с полученными данными были вычислены скорости коррозии стали 08кп в определенный момент времени K_u дифференцированием во времени известного уравнения :

$$K_u = \frac{dK}{dt}.$$

В результате получены следующие выражения:

- в 5%-ом растворе NaCl:

– без аэрации раствора: $K_u = \frac{dK}{dt} = 1,72$,

– с аэрацией раствора: $K_u = \frac{dK}{dt} = 4,34$,

- в СИДУ:

без аэрации раствора: $K_u = \frac{dK}{dt} = 0,91$,

с аэрацией раствора: $K_u = \frac{dK}{dt} = 2,81 \frac{1}{T^{0,28}}$.

Увеличение срока службы технологического оборудования, изделий и продукции из черного металла возможно путем защиты их от коррозии с применением ингибиторов коррозии металлов. В современных научных литературных источниках указано, что высоким противокоррозионным эффектом с широким спектром действия по отношению к различным видам

коррозии, а также доступностью реагентов и мягкими условиями синтеза характеризуются боратсодержащие ингибиторы коррозии [16-18].

В связи с этим для повышения коррозионной стойкости стали в СИДУ было добавлено соединение карбамидмоноборат калия (КМК) состава $\text{KBO}_2 \cdot \text{CO}(\text{NH}_2)_2$. В научной работе [19] описаны методы синтеза карбамидмонобората калия и показаны его эффективные противокоррозионные свойства.

Исследования влияния КМК на противокоррозионную устойчивость стали проводили гравиметрическим методом согласно [20-22]. Время выдержки образцов в коррозионно-активной среде (СИДУ) составляло 30 суток.

Эффективность действия ингибиторов оценивали по потере массы образцов в исследуемых средах. Скорость коррозии (K) вычисляли по убыли массы образцов, отнесенной к единице поверхности за единицу времени по формуле $K = (m_0 - m) / S \cdot t$, где m_0 и m – масса пластинки до и после опыта, соответственно, г; S – площадь пластинки, м^2 ; t – время проведения опыта, ч.

Ингибиторный эффект (коэффициент торможения), который показывает во сколько раз ингибитор замедляет скорость коррозии вычисляли по формуле: $\gamma = K_0 / K$, где K и K_0 – скорость коррозии в присутствии ингибитора и без него, соответственно.

Степень защиты, характеризующая полноту подавления коррозии определяли в %: $Z = K_0 - K / K_0 \cdot 100$.

Результаты исследования влияния КМК на скорость коррозии, ингибиторный эффект и степень защиты стали 08 кп в СИДУ за 30 суток приведены в табл.4.

Таблица 4.

Влияние карбамидмонобората калия ($\text{KBO}_2 \cdot \text{CO}(\text{NH}_2)_2$) на среднюю скорость коррозии (K), коэффициент торможения (γ) и степень защиты (Z) стали 08 кп в среде имитирующей дорожные условия за 30 суток

Состав среды имитирующей дорожные условия	$K \cdot 10^{-3}$, г/м ² ·ч	γ	Z, %
СИДУ	68,12	1,00	0,00
СИДУ + 2г/л КМК	14,86	4,58	78,19
СИДУ+ 3г/л КМК	7,96	8,56	88,31
СИДУ + 4г/л КМК	3,08	22,12	95,48
СИДУ+ 5г/л КМК	2,16	31,54	96,83
СИДУ+ 6г/л КМК	2,05	33,23	96,99

Из приведенных данных следует, что в СИДУ сталь интенсивно корродирует, а введение КМК в СИДУ приводит к снижению скорости коррозии металла. При этом наибольший ингибиторный эффект достигается при значении концентрации КМК 5 г/л. Дальнейшее увеличение концентрации КМК практически не повышает степень защиты стали.

Согласно [23-25], пассивация стали в растворах аминокборатов щелочных металлов связана как с образованием защитных оксидных пленок, так и с хемосорбцией аминокборатов на поверхности металла в условиях коррозии с кислородной деполяризацией.

С учетом литературных данных [26-32] о необходимости уменьшения коррозионной агрессивности водных технологических средств, в частности, растворов синтетических моющих средств, применяемых для очистки поверхностей деталей от масляно-жировых загрязнений при ремонте узлов и агрегатов, поверхностей деталей кузова автотранспортных средств перед покраской, КМК можно рекомендовать в качестве эффективной противокоррозионной присадки.

ВЫВОДЫ

Исследования загрязнений дорожной поверхности автомобильной трассы М7 «Москва-Уфа» в осенне-зимний период эксплуатации показали, что основными компонентами загрязнений являются ионы хлоридов Cl^- , аммония NH_4^+ , сульфатов SO_4^{2-} и нитратов NO_3^- . Определение коррозионной агрессивности загрязнений дорожной поверхности методом сравнительного исследования СИДУ с раствором хлорида натрия показало, что она равноценна 5%-му водному раствору хлорида натрия. Отмечено, что в автомобиле коррозионному износу наиболее подвержен кузов, для изготовления которого в основном применяют листы из стали 08кп. В статье приведены результаты исследования коррозии стали 08кп в СИДУ и растворе хлорида натрия при различных концентрациях, а также в зависимости от продолжительности выдержки образцов в растворах и аэрации. Экспериментальными данными установлено, что скорость коррозии стали 08кп при добавлении ингибиторной присадки КМК снижается. На основе экспериментальных данных КМК можно рекомендовать в качестве эффективной противокоррозионной присадки к водным технологическим средствам, в частности, растворам синтетических моющих средств, применяемым для очистки поверхностей деталей от масляно-жировых загрязнений при ремонте узлов и агрегатов, поверхностей деталей кузова автотранспортных средств перед покраской.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кучер И.Л. Способы подготовки поверхности кузова автомобиля при ремонтном восстановлении формообразующими клеевыми составами // Интернет журнал «Науковедение». 2017. №3. Том. 9.
2. Борычев С.Н., Шемякин А.В., Терентьев В.В., и др. Защита сельскохозяйственной техники от коррозии // Международный научный журнал. 2017. № 2. С.90-94.
3. Старостин К.В. Защита кузова автомобиля от коррозии // Молодой ученый. 2016. №25. С. 85-89
4. Губанов Н.Н., Иванов В.А., Лукина Л.А. Инновационные методы защиты металлических трубопроводов от коррозионного разрушения // (Электронный журнал) «Сервис в России и за рубежом». 2013. № 1. С. 59-69.
5. Шемякин А.В., Терентьев В.В., Латышенко М.Б. Повышение эффективности противокоррозионной защиты стыковых и сварных соединений сельскохозяйственных машин консервационными материалами // Известия Юго-Западного гос. ун-та. – Курск: ФГБОУ ВО ЮЗГУ, 2016. № 2. С. 89-91.
6. Фадеев И.В., Ременцов А.Н., Садетдинов Ш.В. Влияние моноэтаноламинтетра-бората аммония в составе защитного покрытия на электрохимическое поведение стали 08кп // Грузовик. 2016. № 12. С.15-21.

7. Фадеев И.В., Садетдинов Ш.В., Новоселов А.М. Влияние амидоборатного комплекса на коррозию и коррозионную усталость стали Ст. 10 // Приволжский научный журнал. 2014. №3. С. 31-35.
8. Юркинский В.П., Батунова Е.Г., Фирсова Е.Г. Коррозионная стойкость сталей в расплаве NaOH // Черные металлы. 2014. № 4. С. 73-74.
9. Ashassi-Sorkhabi H., Shaabani B., Seifzadeh D. Corrosion inhibition of mild steel by some Schiff base compounds in hydrochloric acid // Applied Surface Science. 2005. №239. pp. 154-164.
10. Jiang X., Zheng Y.G., Ke W. Effect of flow velocity and entrained sand on inhibition performances of two inhibitors for CO₂ corrosion of N80 steel in 3% NaCl solution // Corrosion Science. 2005. no.47. pp. 2636-2658.
11. Голи-Оглу Е.А. Микролегирующие добавки для атмосферной коррозии низкоуглеродистой стали для мостостроения // Черные металлы. 2016. № 11. С. 35-40.
12. Фадеев И.В. Исследование влияния компонентов агрессивной среды дорожного полотна на коррозию днища кузова легкового автомобиля: дисс. ... канд. техн. наук: 05.22.10 / Фадеев Иван Васильевич. – М., 2010. – 222 с.
13. Kaputkina L. M., Svyazhin A. G., Smarygina I. V., Kindop V. E. Influence of nitrogen and copper on hardening of austenitic chromium-nickel-manganese stainless steel // CIS Iron & Steel Review. 2016. № 1. С. 30-34.
14. Фадеев И.В., Новоселов А.М., Садетдинов Ш.В. Теоретические основы разработки новых ингибиторов коррозии для автотранспортного комплекса // Вестник МАДИ. 2014. № 4. С. 17-21.
15. Anderko A., Sridhar N., Brossia C.S., Dunn D.S., Yang L.T., Saldanha B.J., Grise S.L., Dorsey M.H. An Electrochemical Approach to Predicting and Monitoring Localized Corrosion in Chemical Process Streams // CORROSION. 2003. Paper no. 03375. pp. 104-110. (Houston, TX: NACE International, 2003).
16. Илларионов И.Е., Садетдинов Ш.В., Стрельников И.А., Гартфельдер В.А. Влияние фосфатборатных соединений на противокоррозионную устойчивость углеродистой стали в нейтральных водных средах // Черные металлы. 2018. №5. С. 47-53.
17. Левашова В.И., Янгирова И.В., Казакова И.В. Обзор ингибиторов коррозии на основе борорганических соединений // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. С. 67-72.
18. Кузнецов Ю.И. Прогресс в науке об ингибиторах коррозии // Коррозия: металлы, защита. 2015. № 3. С. 12-14.
19. Фадеев И.В., Садетдинов Ш.В. Повышение коррозионной стойкости стали 10 // Вестник МАДИ. 2015. № 2. С. 107-114.
20. Козлов В.Г., Титова И.В., Коноплин А.Н., и др. Методы борьбы с коррозией металлов // Фундаментальные исследования. 2017. № 6. С. 53-57.
21. Неверов А.С., Родченко Д.А., Цырлин М.И. Коррозия и защита металлов. – Минск: Высшая школа, 2013. 223 с.
22. Yang L., Pabalan R.T., Dunn D.S. Evaluation of Corrosion Inhibitors in Cooling Water Systems Using a Coupled Multielectrode Array Sensor // CORROSION. 2002. Paper no. 03426. pp. 126-130. (Houston, TX: NACE International, 2002).
23. Yang L., Pabalan R.T., Dunn D.S. The Study of Atmospheric Corrosion of Carbon Steel and Aluminum under Salt Deposit Using Coupled Multielectrode Array Sensors // the 204th Meeting of the Electrochemical Society – Abstract 465, Extended Abstract Volume 2003-II (Pennington, NJ: Electrochemical Society, 2003).
24. Рахманкулов Д.Л., Бугай Д.Е., Габитов А.И., и др. Ингибиторы коррозии. Теория и практика противокоррозионной защиты нефтепромышленного оборудования и трубопроводов. – М.: Интер, 2007. – 300 с.
25. Половняк В.К., Тимофеева И.В., Быстрова О.Н., и др. Защитное действие азот, фосфорсодержащих ингибиторов коррозии стали и их промышленные испытания в

условиях нефтедобычи и нефтепереработки // Практика противокоррозионной защиты. 2006. №3. С. 44-48.

26. Бышов Н.В., Борычев С.Н., Кокорев Г.Д., и др. Повышение эффективности очистки и мойки сельскохозяйственных машин // Труды ФГБОУ ВО РГАТУ. Рязань. 2016. – 102 с.

27. Шемякин А.В., Терентьев В.В., Андреев К.П., и др. Современные способы повышения эффективности процесса очистки сельскохозяйственных машин // Международный научный журнал. 2017. № 2. С. 95-99.

28. Кузин Е. Г. Противокоррозионная защита техники // Технические науки: проблемы и перспективы: материалы V Междунар. науч. конф. – СПб.: Свое издательство, 2017. С. 55-57.

29. Голи-Оглу Е.А. Исследование микро- и наноструктурной неравномерности по толщине 150-мм плит из микролегированной стали для мостостроения, стойкой к атмосферной коррозии // Черные металлы. 2017. № 9. С. 36-40.

30. Кузин Е. Г. Противокоррозионная защита техники [Текст] // Технические науки: проблемы и перспективы: материалы V Междунар. науч. конф. (г. Санкт-Петербург, июль 2017 г.). — СПб.: Свое издательство, 2017. — С. 55-57.

31. Фахрутдинова А.Р., Мукатдисов Н.И., Елпидинский А.А. и др. Составы ингибиторов коррозии для различных сред // Вестник Казанского технологического университета. Казань: Вып.4.Т.16. 2013. С.272-276.

32. Илларионов И.Е. Применение технологии получения металлофосфатных связующих, стержневых смесей на их основе // Черные металлы. 2018. №4. С. 13-19.

АВТОРЫ

Илларионов Илья Егорович – д. т. н., профессор, зав. кафедрой «Материаловедение и металлургические процессы» ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова.

Садетдинов Шейиздан Вазыхович - д. х. н., профессор кафедры «Материаловедение и металлургические процессы» ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова».

Фадеев Иван Васильевич - к. т. н., доцент, доцент кафедры транспортных, технологические машины и наземные транспортные и технологические средства, ФГБОУ ВПО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», Волжский филиал.

AUTORS

Illarionov Ilya Yegorovich – d. t. n., professor, Deputy head of. Department «Materials Science and metallurgical processes» Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Chuvash state University I. N. Ulyanov».

Sadetdinov Sheizdan Vazykhovich - doctor of Sciences (Chemistry), professor of Department «Materials Science and metallurgical processes» Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Chuvash state University I. N. Ulyanov».

Fadeev Ivan Vasilyevich - candidate of Sciences (Engineering), associate professor, the dean of the automobile and road faculty, Federal State Budget Educational Establishment of the Higher Professional Education “Moscow automobile and road technical University (MADI)”, Volzhskie branch.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СВЕРЛЕНИЯ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА

RESEARCH OF THE PROCESS OF DRILLING HIGH- STRENGTH CAST IRON

ЗОРИНА М.М., ВОРОНЦОВ Ю.И.

*(ФГБОУ ВПО «Чувашский государственный университет
им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия)*

ZORINA M.M., VORONTSOV Yu.I.

*(FGBOU VPO "Chuvash State University.
I.N. Ulyanova, Cheboksary, Russia)*

Аннотация. Изложены результаты экспериментов по оценке обрабатываемости высокопрочного чугуна на операции сверления.

Annotation. The paper presents the results of experiments to assess the machinability of high-strength cast iron for drilling operations.

Ключевые слова: высокопрочный чугун, операция сверления.

Keywords: high-strength cast iron, the drilling operation.

Известно, что высокопрочный чугун имеет достаточно широкую область применения за счет улучшенных механических характеристик и хороших литейных свойств. Этот материал применяют не только взамен серого чугуна с целью повышения срока службы деталей, но и вместо стали и цветных сплавов, снижая тем самым расходы на производство и дефицитные материалы. Высокопрочный чугун смело можно назвать прогрессивным материалом, роль которого в промышленности с каждым годом растёт.

Несмотря на значительные достоинства, этому виду чугуна в огромной степени присущи недостатки, проявляющиеся при обработке менее прочных, но более технологичных серых чугунов. Это не только проблема неоднородности механических характеристик, особенно - твердости, но и нарушение сплошности за счет наличия раковин, к образованию которых приводит специфика литья. Перечисленные проблемы усугубляются тем, что графит в структуре находится в свободном состоянии в виде сферической или вермикулярной формы. Именно по этой же причине невозможно увеличить интенсивность обработки за счет повышения скорости [1].

Колебания твердости и сплошности приводят к возникновению ударных нагрузок, которые, в свою очередь, не только осложняют процесс резания, но и зачастую делают его неосуществимым. Указанные технологические сложности, возникающие в процессе обработки высокопрочного чугуна, определили

значительное ограничение возможного применения этого материала в промышленности.

Эта проблема наиболее актуальна для многолезвийных инструментов, при работе которых удар может повторяться и усиливаться многократно. В наибольшей степени этот фактор проявляется в том случае, если инструмент работает в стесненных условиях и имеет ограниченную жесткость. Поэтому для очередных исследований по оценке обрабатываемости высокопрочного чугуна была выбрана сверлильная операция.

Для сравнения обрабатываемости рассматривались различные марки чугунов: высокопрочный ВЧ 70 с шаровидным (ВЧШГ) и вермикулярным (ВЧВГ) графитом, а также серый СЧ 25 (СЧ) и серый легированный (СЧЛ), с характерными для них механическими характеристиками и структурой. Помимо обрабатываемости изучалось влияние на ряд показателей применение покрытий и действие СОЖ.

С целью уменьшения влияния негативных факторов на чистоту эксперимента образцы для проведения исследований вырезались из сплошного материала, после чего изучалась их структура и оценивалась твердость. Для исключения затирания высота образцов ограничивалась 5D. Скачок момента, возникающий при выходе сверла из заготовки, исключался.

Полученные в результате экспериментов показатели (рис. 1) позволяют сделать заключение, что чугуны перлитного класса имеют худшую обрабатываемость. Таким образом, подтверждается ранее высказанное предположение об отрицательной роли свободного графита.

Можно также сделать вывод, что применение покрытия (TiC) повышает стойкость режущего инструмента, но не столь эффективно, как действие СОЖ. Кроме того, поскольку износ режущей части происходит, в основном, по задней поверхности и требуется постоянная переточка сверла использование покрытий не является эффективным.

На основе результатов экспериментов возможно произвести аналитический расчет скорости резания [2]. Общая закономерность может быть представлена в виде:

$$V = \frac{C_v \cdot D^q}{T^m \cdot S^y} \cdot K_v;$$

где $C_v = 9,61$; $m = 0,222$; $q = 0,25$; $y = 0,55$ - что характерно для обработки только высокопрочных чугунов (зависит от твердости и состояния графита).

Общий поправочный коэффициент на скорость резания, учитывающий фактические условия обработки :

$$K_v = K_m \cdot K_n \cdot K_c ,$$

где K_m - коэффициент, зависящий от состояния и твердости обрабатываемого материала. Для высокопрочного чугуна ВЧ-70 с вермикулярным графитом $K_m = 1,22$.

K_n - коэффициент, зависящий от применяемого инструментального материала. Для быстрорежущей стали Р6М5 $K_n = 1$. При использовании покрытия TiC $K_n = 1,5$.

K_c - коэффициент, учитывающий влияние применяемой СОЖ. Для Укринол-1М, подаваемой поливом с расходом 8 л/мин $K_c = 1,5...2$.

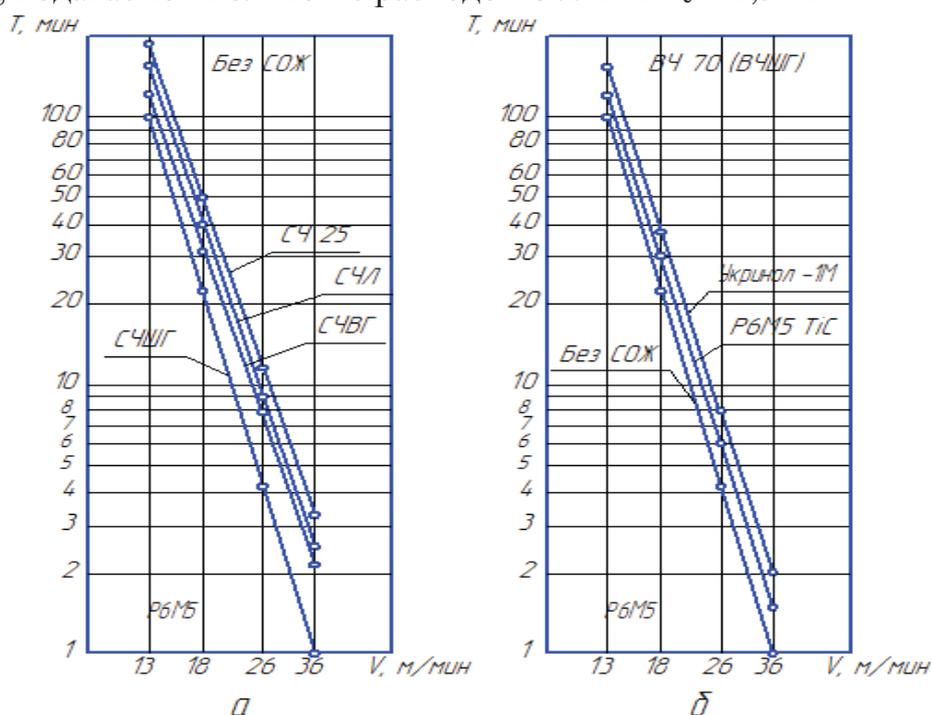


Рис. 1. Зависимость стойкости от скорости резания при сверлении: а - различных марок чугуна; б - а применением покрытия и СОЖ.

Проведенные силовые испытания позволяют дать более развернутую оценку обрабатываемости высокопрочных чугунов. Экспериментально полученные зависимости $P_x = f(V)$ и $M_{cp} = f(V)$ подчиняются основным законам обработки хрупких материалов [3], т.е. увеличение скорости резания приводит к снижению момента сопротивления резанию и приводит к повышению значений осевой составляющей.

Эффективность применения СОЖ аналогична увеличению скорости, т.е. оказывает существенное влияние на процесс резания через трение и, практически, не оказывает никакого действия на работу поперечной режущей кромки. Здесь даже наблюдается отрицательный эффект, что также вполне закономерно, поскольку процесс резания заменен простым выдавливанием. Особенно выражено это проявляется при использовании СОЖ на синтетической основе. Обладая высокой проникающей способностью, она значительно понижает температуру в зоне резания, но интенсифицирует при этом контактные взаимодействия. Поэтому при небольшой глубине сверления использование СОЖ на синтетической основе вполне возможно.

Проведенные эксперименты показали, что высокопрочные чугуны имеют худшую обрабатываемость по сравнению с серыми. Результаты экспериментов позволили определить аналитические зависимости $T = f(V)$, $M_{cp} = f(V, S)$, $P_o = f(V, S)$, а также сделать заключение о целесообразности применения СОЖ и покрытий на операции сверления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Степанов П.И., Медведев Б.П. и др. Исследование обрабатываемости резанием серых и высокопрочных чугунов . Деп. в ВНИИТЭМР. МШ 91. – 12 с.
2. Справочник технолога-машиностроителя: В 2-х т. /Под ред. А.Г.Косиловой и Р.К.Мещерякова. М.: Машиностроение, 1986.Т. 2. 496 с.
3. Вульф А.М. Резание металлов. Л.: Машиностроение, 1973. - 496 с.
4. Зорина М.М., Зорин Е.А., Васильев С.Р. Влияние свободного графита на особенности резания конструкционных материалов. В сборнике: Фундаментальные основы механики: Материалы международной научно-практической конференции. – Новокузнецк: НИЦ МС, 2017. – №2. – с.133-134.
5. Илларионов И.Е., Кадышев Е.Н., Стрельников И.А. Модернизация на предприятиях машиностроения. В сборнике «Проектирование и перспективные технологии в машиностроении, металлургии и их кадровое обеспечение». Материалы III-ей всероссийской научно-практической конференции. Чебоксары; Чуваш. гос. ун-т, 2017. с. 85-87

АВТОРЫ

Зорина Марина Михайловна – старший преподаватель кафедры «Технология машиностроения», Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, 428015, г.Чебоксары, ул.Спиридона Михайлова, д.3, 45-21-93, E-mail: zorina-mari2015@mail/ru

Воронцов Юрий Иванович – доцент кафедры «Технология машиностроения», Чувашский государственный университет имени И.Н.Ульянова, 428015, г.Чебоксары, ул.Спиридона Михайлова, д.3, 45-21-93

AUTHORS

Zorina Marina Mikhailovna - senior lecturer of the chair "Technology of Mechanical Engineering", Chuvash State University named after I.N. Ulyanov, 428015, Cheboksary, ul.Spiridona Mikhailova, 3, 45-21-93, E-mail: zorina-mari2015@mail/ru

Vorontsov Yury Ivanovich - head of the department "Technology of Mechanical Engineering", Chuvash State University named after I.N. Ulyanov, 428015, Cheboksary, ul.Spiridona Mikhailova, 3, 45-21-93

**ПРИМЕНЕНИЕ РАЗНОСТНЫХ СХЕМ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ
ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В СИСТЕМЕ
«ОТЛИВКА–ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТАЯ ФОРМА»**

**APPLICATION OF DIFFERENCE SCHEMES TO IDENTIFY
TEMPERATURE FIELDS IN THE SYSTEM
«CASTING IS THE SAND-CLAY FORM»**

САВИНОВ А.С., ПОСТНИКОВА А.С., САВИНОВ Е.С., РАДОМСКАЯ В.В.

*(Магнитогорский государственный технический университет им.
Г.И.Носова, г.Магнитогорск, Российская Федерация)*

SAVINOV A. S., POSTNIKOVA, A. S., SAVINOV E. S., RADOMSKAYA V. V.

(Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia)

***Аннотация.** В работе рассмотрены количественные методы анализа теплового состояния системы «отливка-форма», направленные на возможность проектирования технологического цикла изготовления литой детали. Показана возможность применения функций эквивалентной теплоемкости для учета теплоты кристаллизации и парообразования в системе «отливка-форма».*

***Abstract.** The quantitative methods of analysis of the thermal state of the system "casting-form", aimed at the possibility of designing the technological cycle of production of cast parts.*

***Ключевые слова:** напряженно-деформированное состояние, тепловое поле, отливка, эквивалентная теплоемкость.*

***Keyword:** the stress-strain state, temperature field, casting.*

Прогнозирование появления брака в отливках, появляющегося при возникновении критических напряжений, на основе математического анализа напряженно-деформированного состояния литой детали в процессе ее кристаллизации и охлаждения напрямую связано с тепловыми условиями ее формирования, а, следовательно, качественное моделирование теплового поля системы отливка-форма является актуальной задачей [1-2].

Одним из важных факторов является прогнозирование время выбивки литой заготовки с целью устранения возникающего критического напряженного состояния и как следствие нарушения сплошности тела отливки, связанного с усадочными процессами [3-4].

Рассмотрим процесс моделирования теплового состояния системы отливка-форма. Для его расчета применим существующие разностные методы решения задач теплопроводности [5]. Расчет произведем для плоской стенки

толщиной 30 мм, залитых в сырую песчано-глинистую форму, материал: алюминий, сталь, медь.

Температура заливки принималась на 50 °С выше температуры плавления или температуры ликвидус. При расчетах теплота кристаллизации принималась для алюминия 390000 Дж/кг, для стали 84000 Дж/кг, для меди 213000 Дж/кг. Плотность принималась постоянной и равной для алюминия $\rho = 2700$ кг/м³, для стали $\rho = 7800$ кг/м³, для меди $\rho = 8900$ кг/м³. Влажность песчано-глинистой формы 5 %, плотность 1600 кг/м³.

В качестве расчетной схемы теплового поля примем неявную разностную схему, аппроксимирующую решение линейной одномерной задачи теплопроводности, получение которой детально описано в источниках [5-6]. В отличие от аналогичных явных разностных схем применение выбранной методики расчета характеризуется большей устойчивостью [5], что позволяет применять ее в широком диапазоне временных и пространственных интервалов расчетной модели.

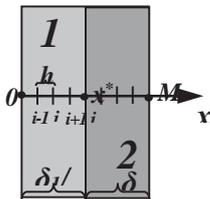


Рис. 1. Схема к расчету теплового поля

Принимая объект «отливка-форма» как систему из двух сопряженных элементов толщиной δ_1, δ_2 с различными теплофизическими характеристиками (рис. 1; (индекс 1 будем применять к отливке, 2 - к форме), разбив систему на ряд слоев толщиной h и определив начальные условия расчета в момент времени $n=0$ (температура заливки сплава, температура формы, температура окружающей среды), рассчитаем температуру в i -м узле пространственной решетки в момент времени $n+1$ как [5]

$$T_i^{n+1} = \alpha_i T_{i+1}^{n+1} + \beta_i, \quad i=1, \dots, N-1, \quad (1)$$

где T_i^{n+1} – температура в i -м узле системы в $n+1$ момент времени, °С;
 α_i, β_i – прогоночные коэффициенты.

Прогоночные коэффициенты α_i, β_i найдем по следующим формулам:

$$\alpha_i = \frac{A_i}{B_i - C_i \cdot \alpha_{i-1}}, \quad (2)$$

$$\beta_i = \frac{C_i \cdot \beta_{i-1} - F_i}{B_i - C_i \cdot \alpha_{i-1}}. \quad (3)$$

В свою очередь, коэффициенты A_i, B_i, C_i и F_i определим из следующих уравнений [5]:

$$A_i = C_i = \frac{\lambda}{h^2}; \quad (4)$$

$$B_i = \frac{2\lambda}{h^2} + \frac{\rho c}{\tau}; \quad (5)$$

$$F_i = -\frac{\rho c}{\tau} T_i^n, \quad (6)$$

где λ – теплопроводность i -го слоя, Вт/м °С;
 h – величина i -го слоя, м;
 ρ – плотность материала в i -м слое, кг/м³;
 c – теплоемкость i -го слоя, Дж/кг °С;
 τ – временной интервал между n и $n+1$ моментом времени, с;
 T_i^n – температура i -го слоя в момент времени n , °С.

Для определения α_i и β_i по формулам (2), (3) необходимо знать α_1 и β_1 (граничные условия для центра стенки отливки), которые применительно к условиям решения нашей задачи определяются из условия симметрии [1]

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0. \quad (7)$$

Применив условие симметричности (7) к выражению (1), получим $\alpha_1 = 1$, $\beta_1 = 0$.

Учитывая, что сопряжение стенки отливки и формы происходит в узле i^* , применим для него граничное условие IV рода, при этом прогоночные коэффициенты для этого узла запишутся как

$$\begin{cases} \alpha_{i^*} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 + \lambda_1(1 - \alpha_{i^*-1})}; \\ \beta_{i^*} = \frac{\lambda_1 \beta_{i^*-1}}{\lambda_2 + \lambda_1(1 - \alpha_{i^*-1})}. \end{cases} \quad (8)$$

Таким образом, при определении температурного поля в области $0 \leq x < x^*$ (см. рис.1) используем прогоночные коэффициенты (2), (3), построенные на основе теплофизических характеристик среды 1. В области $x^* < x \leq M$ - среды 2. При $x=x^*$ используем выражение (8).

Температуру поверхности формы в слое $i=N$ найдем по формуле [1]

$$T_N^{n+1} = \frac{\lambda_2 h^2 T_N^n + 2a_2 \tau (\lambda_2 \beta_{N-1} + h \gamma T_0)}{\lambda_2 h^2 + 2a_2 \tau (h \gamma + \lambda_2 (1 - \alpha_{N-1}))}, \quad (9)$$

где T_0 – температура окружающей среды, °С;

$a_2 = \lambda_2 / c_2 \rho_2$ - температуропроводность среды 2, м²/с;

T_N^n – температура границы в т. М (см. рис.1), °С.

Коэффициент теплоотдачи γ , применяемый в формуле (9), рассчитаем по формуле Стефана-Больцмана [7-8].

$$\gamma = \frac{\varepsilon' \sigma_0 \left[\left(\frac{T_N^n}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right]}{T_N^n - T_0} + \gamma_{\text{конв}}, \quad (10)$$

где ε' - степень черноты ;

σ_0 – постоянная Стефана-Больцмана ($\sigma_0 = 5,67$);

$\gamma_{\text{конв}}$ – конвективная теплоотдача, Вт/(м²·К).

Для учета теплоты кристаллизации в расчете использовали формулу эквивалентной теплоемкости [9-10]

$$C_{доб}^{ме} = \frac{\omega \cdot e \cdot \frac{\left(T_i^n - \frac{T_{ликв} + T_{сол}}{2}\right)^2}{(T_{ликв} - T_{сол})^{2,0055} e^{-3.342 \cdot 3 \cdot 10^{-5} (T_{ликв} - T_{сол})}}}{0,337 \cdot (T_{ликв} - T_{сол})}, \quad 2,5 \leq (T_{ликв} - T_{сол}) \leq 333 \quad (11)$$

где ω – теплота кристаллизации сплава, Дж/кг;

T_i^n – температура в i -том узле системы в n -ый момент времени, °С;

$T_{ликв}$ – температура ликвидус, °С;

$T_{сол}$ – температура солидус, °С,

а для учета теплоты испарения влаги в слое формовочной смеси использовали выражение [11]

$$C_{эkv}^{\phi} = (952,5 + 184,33 \cdot [T_i^n + 273] \cdot 10^{-3}) \rho_{сух} + 15,431 \cdot 10^3 U_0 \rho_{формы} e^{-1,11(T_i^n - 97,5)^2} \left| \begin{array}{l} U_0 = 0; \\ 2 \leq U_0 \leq 10. \end{array} \right. \quad (11)$$

где $C_{эkv}^{\phi}$ – эквивалентная теплоемкость формы, Дж/кг_{смеси} °С;

$\rho_{формы}$, $\rho_{сух}$ – начальная плотность формы и плотность сухого слоя смеси при полном испарении влажности, кг/м³.

Возможность использовать функции (11), (12) показана в работах [12-13]. По представленной методике произвели расчет температурных полей для системы «отливка - серая песчано-глинистая форма» для плоской стенки толщиной 30 мм. Графики представлены на рис. 2.

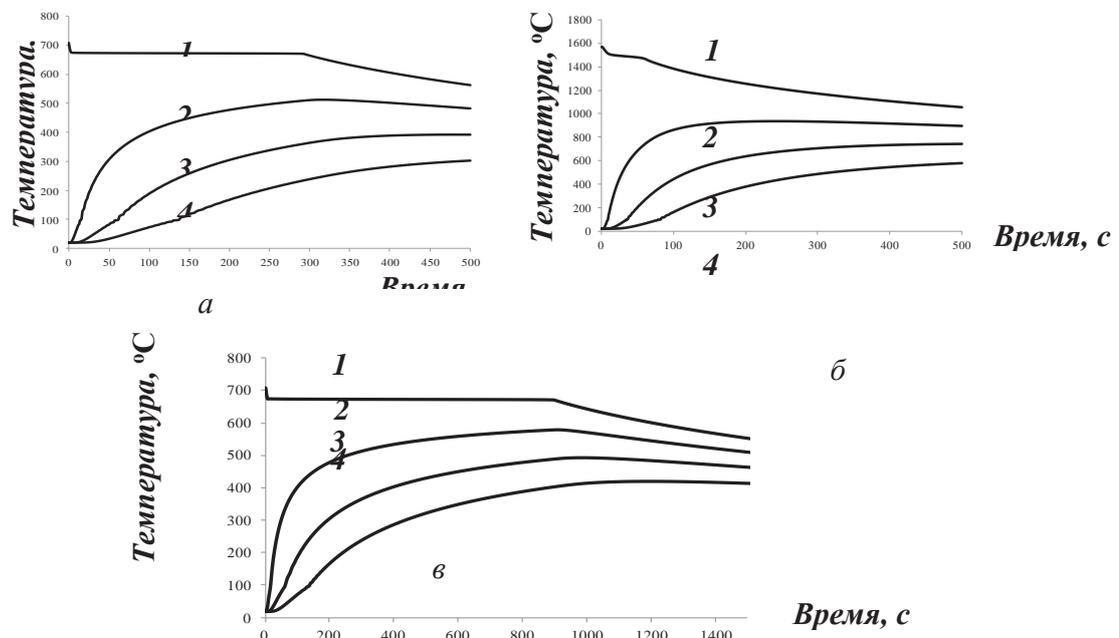


Рис. 2. Температурные кривые системы отливка – сырая ПГФ:

а - алюминия; б - стали; в - меди.

1 – температура отливки; 2 – температура формы в 2 мм от границы с металлом;
2 – 2,5 мм; 3 – 3 мм

Представленный алгоритм позволяет количественно в динамике оценивать тепловое состояние отливки в форме и, как следствие, проводить своевременную выбивку литой заготовки. Таким образом, применение количественных методов анализа теплового состояния системы «отливка-форма», направленное на прогнозирование и возможность проектирования технологического цикла изготовления детали.

ЛИТЕРАТУРА

1. Savinov A.S. Quantitative evaluation of the effect of technological factors on origination of hot cracks in "Track link" casting/ Savinov A.S., Selivanov V.N., Zhelezkov O.S., Tuboltseva A.S./ CISIronandSteelReview. 2017 14, p. 14-18
2. Илларионов И.Е. Теоретические основы формирования физико-механических свойств песчано-глинистых смесей//Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2011. № 1(86). С. 233.
3. Антошкина, Е. Г. Процессы формирования прочности песчаных формовочных и стержневых смесей/Е. Г. Антошкина, В. А. Смолко //Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия». -2012. -№ 15 (274). -С. 6-8.
4. Вдовин, К.Н. Прогнозирование трещиностойкости крупных стальных отливок/ К.Н. Вдовин, А.С. Савинов, Н.А. Феоктистов// Литейное производство. – 2014. - № 12. - С. 8 - 10.
5. Кузнецов Г.В., Шеремет М.А. Разностные методы решения задач теплопроводности. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007.-172 с.
6. Савинов, А.С. Расчет теплового поля сырой песчано-глинистой формы./ А.С. Савинов, А.С. Тубольцева, Д.В. Варламова// Черные металлы. - 2011. – Спец. вып. - С. 36-38.
7. Арутюнов В.А., Бухмиров В.В., Крупенников С.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей: Учебник для вузов.– М.: Metallurgy, 1990. –239 с.
8. Савинов А.С., Андреев С.М., Тубольцева А.С. Программа расчета тепловых полей в литейных системах//Литейщик России. 2013. №3. С. 39-42.
9. Определение теплоемкости формовочной смеси при расчете теплового поля сырой песчано-глинистой формы/Савинов А.С., Тубольцева А.С., Радомская В.В. и др.//Современная металлургия начала нового тысячелетия: сб. науч. тр. Ч. I. Липецк: ЛГТУ, 2010. С. 32-36
10. Савинов А.С. Расчет теплоемкости затвердевающей стенки отливки// Теория и технология металлургического производства: Межрег. сб. науч. тр. - Магнитогорск: МГТУ, 2011. -Вып. 11. - С. 130 – 133.
11. Савинов А.С. Расчет удельной теплоемкости слоя сырой песчано-глинистой формы с различной влажностью/ Савинов А.С., Постникова А.С., Радомская В.В./ Теория и технология металлургического производства №3. 2017. С.17-21
12. Колокольцев В.М., Синицкий Е.В., Савинов А.С. Моделирование температурных полей при получении отливок// Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. - 2015. - № 3. -С.39-43
13. Савинов А.С. Расчет температурного поля системы отливка–песчано-глинистая форма/ Андреев С. М., Тубольцева А.С., Синицкий Е.В. / Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2014. № 4. С. 10-14.

АВТОРЫ

Савинов Александр Сергеевич - д.т.н., директор института металлургии, машиностроения и материалобработки, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». E-mail: savinov_nis@mail.ru. Тел.89068523515;

Постникова Алёна Сергеевна - ст. преп. каф. механики ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». E-mail: a-tus@mail.ru. Тел.89090928843;

Савинов Евгений Сергеевич – преподаватель Многопрофильного колледжа ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»;

Радомская Валерия Вячеславовна – преподаватель Многопрофильного колледжа ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

THE AUTHORS

Alexander Sergeevich Savinov - Doctor of Technical Sciences, Director of the Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Material Processing, Magnitogorsk State Technical University; G.I. Nosov ". E-mail: savinov_nis@mail.ru. Tel.89068523515;

Postnikova Alyona Sergeevna - Art. prep. kaf Mechanics of Magnitogorsk State Technical University G.I. Nosov ". E-mail: a-tus@mail.ru. Tel.89090928843;

Savinov Evgeny Sergeevich - lecturer of the Versatile College FSBEI HE "Magnitogorsk State Technical University. G.I. Nosov ";

Radomskaya Valeria Vyacheslavovna - Lecturer of the Multidisciplinary College of the Magnitogorsk State Technical University. G.I. Nosov ".

БИОПОЛИМЕРНЫЕ СВЯЗУЮЩИЕ НА ОСНОВЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ЛИГНИНОВ – ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ

BIOPOLYMER BINDER BASED ON TECHNICAL LIGNINS – ASSESSMENT OPPORTUNITIES

СВИНОРОЕВ Ю.А.¹, БАТЫШЕВ К.А.²

(¹Луганский национальный университет имени В. И. Даля, г. Луганск.

²Московский государственный технический университет
им. Н.Э. Баумана, г. Москва)

SVINOROEV YU., BATYSHEV K. A.

(¹Lugansk national University named after V. I. dal, Lugansk.

²Moscow state technical University. N. Uh. Bauman, Moscow)

Аннотация. Дан анализ проблемы использования технических лигнинов для создания новых связующих материалов, отвечающих современному уровню требований литейного производства. Раскрыты причины, сдерживающие их применение. Показаны их объективные (основанные на физической природе материала) и субъективные (базирующиеся на коммерческой выгоде) истоки. Рассмотрены перспективы применения технических лигнинов, на примере использования технических лигносульфонатов (основного представителя из семейства технических лигнинов представленных на российском рынке связующих).

Annotation. He analysis of the problem of using technical lignins to create new binders that meet the current level of requirements of the foundry. The reasons constraining their application are revealed. Their objective (based on the physical nature of the material) and subjective (based on commercial benefit) origins are shown. Prospects of application of technical lignins, on the example of use of technical lignosulfonates (the main representative from family of technical lignins presented in the Russian market of binders) are considered.

Ключевые слова: технический лигнин, биополимерные связующие материалы, связующая способность, прочность, технические лигносульфонаты, технологии литья.

Keywords: technical lignin, biopolymer binding materials, binding capacity, strength, technical lignosulfonates, casting technologies.

Анализ состояния. Технический лигнин – продукт делигнификации растительного сырья, в качестве которого могут выступать любые растительные ткани, от древесины, до морской водоросли. В растительной клетке этот материал присутствует неизменно в разных состояниях, выполняя

функцию связи, которая обеспечивает общую прочность конструкции. По этой причине при переработке он генерируется как побочный продукт, как правило, в виде отхода. Масштабность проблемы такова, что в 1992г. в г. Лозанне (Швейцария) был создан Международный институт лигнина (International Lignin Institute).

По его данным [1], ежегодно в мире формируется от 40 до 50 млн. тонн технического лигнина, утилизация которого представляет существенные трудности и не имеет на сегодняшний момент рационального решения.

Россия, обладая крупнейшими лесными ресурсами, является одним из основных стран генерирующих технический лигнин. Лидером в этом процессе является целлюлозно-бумажная промышленность. По оценкам, приведенным в работах [2,3], контролируемые объемы ежегодного образования этого продукта, в различных формах его представления (сульфитный щелок, технические лигносульфонаты, гидролизный лигнин и др.) колеблются в пределах 4-5 млн. тон. По данным [4], в России, за прошедшие периоды хозяйственной деятельности, накоплено порядка 95 млн. тонн технического лигнина. По оценкам экспертов, объемы переработки растительного сырья будут увеличиваться, ожидается что к 2050 г. этот показатель возрастет на 50-60% [1, 4], в этой связи вопрос разумной утилизации лигнинных отходов будет остро стоять как в ближайшей перспективе так и в будущем.

Одним из перспективных направлений рационального использования лигнина является применение его модификаций в качестве связующих материалов в литейном производстве.

Цель работы состояла в оценке возможностей создания на основе технических лигносульфонатов связующих материалов отвечающих современным требованиям литейного производства.

Предпосылки. Технические лигносульфонаты (ЛСТ), являются модификацией технического лигнина широко и традиционно представленного на российском рынке связующих. Они являются крупнотоннажным отходом при переработке древесины в сульфитную целлюлозу. Этот материал традиционно применялся в различных производствах, в том числе и при производстве отливок, в качестве связующего материала.

ЛСТ, в качестве связующего широко применялись в СССР [5], так например, в работе [6] указывается, что этот материал занимает третье место по объемам применения в литейном производстве после глины и жидкого стекла. На основе проведенных исследований, посвященных смесям на лигносульфонатной основе, защищались диссертационные работы, в том числе и докторские [7]. Однако, с конца 90-х годов применение ЛСТ в литейном производстве резко снижается, замещаясь разнообразными смоляными связующими. В настоящее время этот материал практически не применяется в современных технологиях литья. Сфера его применимости ограничивается выпуском простых отливок, например чугунных изложниц. Причины носят как объективный, так и субъективный характер.

Объективно, связующие на основе ЛСТ не отвечают современному уровню требований, состоящему в выполнении следующих требований:

1) имеют не достаточно высокие прочностные свойства, присущие смоляным связующим;

2) обладают не стабильными свойствами, что проявляется в резких (до 30% от номинальных значений) колебаниях свойств материала различных партий от одного производителя, и не соответствие свойств в случае перехода на приобретение материала у другого производителя, а также зависимость свойств от сезонного колебания температуры;

3) имеет не достаточную термостойкость, ограничивающуюся областью температур 300-350⁰С;

4) литейным стержням/формам на их основе присуща высокая гигроскопичность;

5) технологии их применения требуют теплового отверждения, что увеличивает энергозатраты и удлиняет цикл производства.

Субъективный характер причин резкого падения потребления лигнинных связующих заключается в том, что с середины 90-х годов прошлого столетия в России литейная отрасль претерпела значительных изменений, в плане технической модернизации. На смену устаревшим, как правило, физически, пришли технологии и оборудование ведущих западных фирм, которые являются доминирующими и на данный момент. Это привело к замещению отечественной ресурсной базы связующих материалов, импортными связующими, как правило, смоляными. Отечественные материалы не были приспособлены к работе на импортном оборудовании (в этом не было заинтересованности), с одной стороны; рыночные отношения – коммерческая выгода, диктовала необходимость «привязки» вновь приобретаемых иностранными компаниями рынков к своим расходным материалам, с другой. По этой, чисто коммерческой причине, отечественные материалы были вытеснены из рынка литейных связующих материалов.

В этот же период времени, в Нижнем Тагиле, был модернизирован, а фактически заново отстроен, с помощью немецких инвестиций, химический комбинат – «Уралхимпласт» (Hüttenes-Albertus) [8], ведущий производитель химической продукции для литейной промышленности. На сегодняшний день, данное предприятие является лидером в производстве литейных связующих материалов в России, оно способно удовлетворить любые потребности литейной отрасли современными смоляными связующими изготавливаемыми на сырье, поставляемом из Германии (!) [9]. Возникает резонный вопрос: а что будет, если поставки сырья из Германии прекратятся!?

Были упомянуты недостатки лигнинсодержащих связующих, однако они обладают комплексом положительных свойств, которые, умалчиваются. По этим показателям они существенно превосходят существующие импортные смоляные связующие:

1) источником сырья для их производства являются отечественные предприятия [3,7];

2) стоимость лигносульфонатных связующих несоизмеримо меньше: 4,5 – 6,0 руб/кг жидких ЛСТ, против 3,5-5,0 евро/кг (265 – 378 руб/кг, по текущему валютному курсу рубля) для смоляных материалов [2];

3) технологии на их основе являются экологически безопасными: при транспортировке, в процессе использования, при утилизации [7,10,11];

4) простота при хранении: не требуют особых режимов, имеют длительный срок хранения [7,10];

5) отечественные литейные предприятия имеют многолетний положительный опыт их применения [7].

Для понимания, на данный момент, значимости и перспектив применения лигнинных продуктов, целесообразно проанализировать основные тенденции в развитии литейных связующих.

Связующие, на основе технического лигнина, можно отнести к биополимерной группе связующих материалов, которые традиционно и особенно активно разрабатываются в странах европейского союза [12, 13]. Причина активности связана с ужесточением требований к санитарно-гигиеническим условиям труда в литейных цехах и к общей экологической безопасности работы литейных предприятий. Что отражено в материалах регламентирующих этот аспект их функционирования [14], и усилено в директиве от 2010 г. [15], которая, жестко регламентирует применение смоляных материалов на фенольной основе, на долю которых приходится 90-95% современных литейных связующих. Это связано с многочисленными исследованиями выявившими негативное влияние упомянутых материалов на здоровье производственного персонала [16], и населения, проживающего в районах размещения предприятий использующих данные материалы [17, 18].

Указанная директива [15], предполагает полное устранение подобных смоляных связующих материалов из технологического цикла производства. Это обусловило исследования направленные на поиск альтернатив. В частности, предлагаются композиции на основе белковых материалов [19], на основе крахмала [20], отходов разнообразных производств [21, 22]. Их общим недостатком, является ограниченность сырьевой базы в сочетании с высокой исходной стоимостью отдельных исходных компонентов (крахмал), в этой связи связующие на основе технического лигнина, в частности на ЛСТ, смогли бы компенсировать эти недостатки.

Перспективы и возможности. По своему генезису, лигнин выполняет функцию скрепления отдельных элементов растительной ткани и обеспечивает герметичность клеточных стенок, а благодаря находящимся в нем пигментам обуславливает оттенок одревесневевшей ткани. Он расположен в узлах межклеточного пространства и в клеточных стенках, обеспечивая прочную сцепку целлюлозных волокон. Такое позиционирование приводит к обеспечению прочности – «одеревенению» растительной ткани.

Лигнинный полимер формируется на стадии роста - лигнификации растения, после формирования растительной клетки в межклеточном пространстве и непосредственно в стенке самой клетки [23].

Генезис лигнина, объясняет специфику его строения и многофакторность влияния на формирование структуры и химического состава. Это влечет за собой трудности в процессе технологической переработки растительного сырья, объясняет невозможность извлечения природного лигнина из растительной ткани в естественном, природном его состоянии. По этой причине

различают «протолигнин» - вещество находящееся непосредственно в растении и материал – продукт сформировавшийся в результате совокупности технологических воздействий по делигнификации растительного сырья.

Следует особо подчеркнуть, что лигнин не изготавливают целенаправленно по жестко устоявшимся стандартам, а получают лигнин-содержащие вещества, являющиеся, как правило, крупнотоннажными отходами различных производств. Это в свою очередь предопределяет неопределенность химического состава, полимолекулярной структуры и молекулярно-массового распределения формирующихся лигнинных продуктов. В процессе физико-химических воздействий на растительную ткань, регламентируемых конкретикой технологии переработки и видом исходного растительного сырья, молекулярная масса лигнина трансформируется, за счет уменьшения в несколько раз, претерпевает изменения его химическая активность, изменяется консистенция и компонентный химический состав.

В химическом отношении лигнин не является индивидуальным химическим веществом, а представляет собой композицию ароматических полимеров родственного строения. Истинная, эмпирическая, или брутто-формула лигнина может быть представлена в виде: $C_{288}H_{318}O_{102}$ [24]. Общий вид лигнинного материала может быть представлен в виде схемы – структурной формулы (см. рис. 1) . Её структурные элементы – фенил-пропановые звенья, т.е. структурные единицы являющиеся производными фенилпропана.

Различают технические формы лигнинных материалов, встречающиеся на рынке, а потому являющиеся потенциальными объектами для дальнейшей разработки: сульфатный лигнин, сульфитный лигнин и гидролизный лигнин. Именно эти материалы могут выступать в качестве исходного сырья для разработки новых конкурентных продуктов для различных потребностей. В этом плане лигнин-содержащие материалы являются типичным представителем функциональных материалов, перспективным сырьем для разработки новых связующих материалов для литейного производства [25].

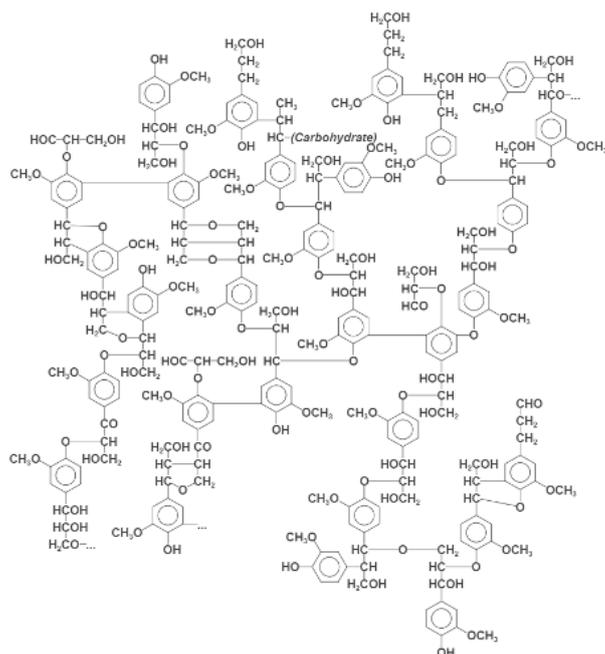


Рис. 1. Структурная формула лигнина [24].

ВЫВОДЫ

Приведенные результаты разработки литейного связующего материала на основе технического лигнина (ЛСТ), позволяет говорить о технологической возможности создания связующих материалов на основе лигнинных материалов, способных успешно конкурировать с широко применяющимися сейчас синтетическими смолами на фенольной основе. Лигносulfонатные материалы можно рассматривать как типовой пример технологии ресурсосбережения и рационального использования вторичного сырья производимого из возобновляемого природного ресурса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Электронный ресурс, информационная база International Lignin Institute: <http://www.ili-lignin.com/aboutlignin.php>
2. Информационный ресурс – «Обзор рынка лигносульфонатов в России» (2015г.): <http://www.infomine.ru/research/36/500>
3. Варфоломеев А. А. Разработка экологически безопасных феноло-формальдегидных смол, модифицированных техническими лигнинами./Диссертация кандидата химических наук: спец. 05.21.03 «Технология и оборудование химической переработки биомассы дерева; химия древесины»// Варфоломеев А. А. – Братск, 2009. – 160с.
4. Государственный доклад о состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области в 2003 году Текст. / Иркутск : Облмашинформ, 2004. - 296 с.
5. Илларионов И.Е. Формовочные материалы и смеси: Монография / И.Е. Илларионов, Ю.П. Васин. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. Ун-та, 1992.-Ч.1.- 223с.
6. Формовочные материалы и смеси / [Дорошенко С. П., Авдокушин В. П., Русин К. , Мацишек И.]. – К.: Вища школа, 1990; Прага: СНТЛ, 1990. – 415 с.
7. Семик А. П. Формовочные и стержневые смеси со связующими материалами на основе технических лигносульфонатов. / Дис. доктора техн. наук : спец. 05.16.04 «Литейное производство»// Семик А. П. - К., 1987. – 225 с.
8. Информационный ресурс, ведущий производитель литейных связующих в России, «Hüttenes-Albertus», Германия, адрес доступа: <http://www.huettenes-albertus.ru/>
9. Дибров И.А. О проведении XIII международного съезда литейщиков и международной выставки «Литье - 2017» 19-21 сентября 2017 г., Челябинск/ Литейщик России №10, 2017г., с. 7-14.
10. Формування екологічної безпеки підприємств регіону: монографія / О.В. Родіонов, Ю.О. Свинороев. – Луганськ: видавництво «Ноулідж», 2011.- 232с.
11. Литейные связующие в массовом производстве: каталог / [Суворов Б. Л., Оглоблина Р. И., Коравоев Е.С. и др.] – Свердловск: ВНИИОТ ВЦСПС, – 1987. – 36 с.
12. Tackes, G. (2001). Core Binders: A Look into the Future. Modern Casting . No 10. 24 – 27.
13. Serghini, A. (2011). The future of organic foundry binders in Europe. Przegląd Odlewnictwa. Nr 11-12, pp.548-553 (in Polish).
14. Integrated Pollution Prevention and Control Reference Document on Best Available Techniques in the Smitheries and Foundries Industry. European commission, 2005, 363p.
15. The Directive of the European Parliament and Council of the 24-th November 2010 concerning industrial emissions (2010).
16. Löfstedt H., Westberg H., Seldén A.I., Lundholm C. & Svartengren M. (2009) Respiratory symptoms and lung function in foundry workers exposed to low molecular weight isocyanates. American Journal of Industrial Medicine, 52, 455-463.
17. Löfstedt H., Westberg H., Seldén A.I., Rudblad S., Bryngelsson I.L., Ngo Y. & Svartengren M. (2011) Nasal and ocular effects in foundry workers using the Hot Box method. Journal of Occupational and Environmental Medicine, 53, 43-48.

18. Löfstedt H., Westberg H., Seldén A.I., Bryngelsson I.L. & Svartengren M. (2011) Respiratory symptoms and lung function in foundry workers using the Hot Box method – a 4-year follow-up. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 53, 1425-1429.
19. Eastman, J. (2000). Protein – based binder update: Performance put to the Test. *Modern Casting*. No 10. 32-34
20. Zhou, X., Yang, J. & Guohui, Q. (2007). Study on synthesis and properties of modified starch binder for foundry. *Journal of Materials Processing Technology*. 18. 407-411. DOI: 0.1016/j.jmatprotec.2006.11.001.
21. Grabowska, B. (2009). Cross-linking of polyacrylan compositions with biopolymers with use of selected chemical and physical agents. *Polimery*. 54. 7-8. 19-20 (in Polish).
22. Patterson, M. & Thiel, J. (2010). Developing Bio-Urethanes for No-Bake. *Foundry Management & Technology*.
23. Antonio Pizzi, Milena Properzi, Jean-Michel Leban, Michela Zanetti, Frederic Pichelin Mechanically-induced wood welding /Maderas. *Ciencia y tecnología* 5(2): 101-106, 2003.
24. Кулезнев В. Н. Химия и физика полимеров. Учеб. пособие для хим. - технол. вузов./ В. Н. Кулезнев, В. А. Шершнеv – М., «Лань», 2014. – 312с.
25. Yu. Svinoroev, V. Kostrub, O. Klimova New ecological binder materials based on vegetative raw aterials processintg products/Teka commission of motorization and power industry in agriculture Lublin university of technology Volodymyr Dal East-Ukrainian national university of Lugansk, Volume XB, Lubin 2010 - p. 227 – 231.

АВТОРЫ

Свинороев Ю.А. - Луганский национальный университет имени В. И. Даля, г. Луганск.
Батышев К.А. - Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва.

THE AUTHORS

Svinoroev Yu.A. - Lugansk National University named after V.I. Dahl, Lugansk.
Batyshev K.A. - Moscow State Technical University. N.E. Bauman, Moscow.

**ПОВЫШЕНИЕ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ
ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ ПРИ ФРИКЦИОННО-
МЕХАНИЧЕСКОМ КОНТАКТЕ С ОРГАНИЧЕСКИМИ ПОЛИМЕРАМИ**

**THE INCREASED CORROSION RESISTANCE OF IRON-
CARBON ALLOYS DURING FRICTIONAL MECHANICAL
CONTACT WITH ORGANIC POLYMERS**

ПИЛЮШИНА Г.А., ПАМФИЛОВ Е.А.
(БГТУ, г. Брянск, Россия)

PILYUSCHINA G. A., PAMFILOV E. A.
(Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia)

***Аннотация.** Предложены эффективные пути повышения износостойкости железоуглеродистых сплавов, основанные на реализации комплексных подходов, включающих перспективные методы упрочняющей обработки и технологического обеспечения благоприятного состояния поверхностных слоев.*

***Annotation.** The effective ways of increasing the wear resistance of iron-carbon alloys based on the implementation of integrated approaches, including promising methods of hardening treatment and technological support of the favorable state of the surface layers.*

***Ключевые слова:** износостойкость, коррозия, трение, упрочняющая обработка.*
***Keywords:** wear resistance, corrosion, friction, hardening treatment.*

Значительная интенсивность изнашивания в условиях коррозионно-механического взаимодействия металлов с древесиной во многом связана с тем, что продукты коррозии и вторичные структуры поверхностных слоев зачастую являются менее износостойкими, чем основной металл, на котором они образуются. Они имеют относительно слабую к нему адгезию, что способствует своего рода «разрыхлению» поверхностного слоя материала деталей и ускоряют их разрушение.

Поэтому решение задачи повышения износостойкости в указанных условиях требует выявления и снижения влияния негативных явлений, наблюдаемых при фрикционном контактом взаимодействии материалов с древесиной и, наоборот, оптимизация тех свойств, которые способствуют повышению износостойкости.

Выполненный и систематизированный нами анализ особенностей контактного взаимодействия рабочих поверхностей деталей лесозаготовительного и деревоперерабатывающего оборудования с обрабатываемой древесиной позволил выявить совокупность основных факторов, определяющих

сопротивляемость их изнашиванию, как за счет реализации коррозионных процессов, так и механического поверхностного разрушения [11,12].

Поверхностное разрушение материала при трении древесиной происходит за счет совместной и взаимосвязанной реакции химического и механического механизмов.

При этом химическое разрушение преимущественно представляет собой результат воздействия на оксидную пленку в локальных участках металлической поверхности с последующим развитием питтинговой, интеркристаллитной или щелевой коррозии [9].

Для торможения коррозионных процессов в зоне фрикционного контакта рекомендуется использовать пассивирующие пленки, содержащие труднорастворимые соединения (оксиды, фосфаты, сульфаты и др.) или наносить покрытия из металлов, стойких к коррозии (например, никелирование, хромирование и др.). Защитное действие этих покрытий реализуется за счет изоляции металла от активной окружающей среды. Существенным недостатком этих методов является возможное удаление поверхностного слоя. В результате этого скорость коррозии на поврежденном месте резко возрастает.

Положительные результаты также могут быть достигнуты за счет образования некристаллических (стеклообразных) пленок, наиболее склонных к быстрой репассивации. Такие пленки в отличие от кристаллических, не имеют границ зерен, являющимися путями облегченной диффузии к поверхности металла частиц активной среды.

При динамических нагрузках некристаллические пленки способны длительно сопротивляться разрушению, приводящему к возникновению контактной коррозии или трещинообразования [1, 4, 6]. По некоторым данным степень кристалличности пленки оказывает влияние и на пластичность, зачастую, ее существенно повышая. Скорость повторного роста пленки и эффективность замедления растворения металла увеличивается, когда на поверхности сплава находится стабильно существующая некристаллическая пленка [3, 7].

Механическое разрушение происходит при приложении к детали спектра силовых нагрузок, приводящих к разрушению пассивирующей пленки, и созданию условий для воздействия среды на ювенильную поверхность. Это обуславливает развитие коррозии под напряжением, водородного охрупчивания или коррозионной усталости.

В процессе изучения механического изнашивания железоуглеродистых сплавов при фрикционном контакте с древесиной можно полагать, что износостойкость рассматриваемых деталей, главным образом, определяется условиями протекания следующих триботехнических процессов: разрушение и удаление поверхностных оксидных и, расположенных под ними, металлических слоев, и в том числе под действием абразивных частиц; усталостное накопление и рост дефектов и повреждений, возникновение остаточных напряжений, структурная трансформация изнашиваемого материала; изменение макро- и микрогеометрических параметров; образование продольных и поперечных трещин.

Существенное влияние на закономерности и интенсивность изнашивания оказывает температура. При положительной температуре окружающей среды, низких скоростях скольжения и высоких нагрузках изнашивание железоуглеродистых сплавов в основном происходит вследствие упругой и пластической деформации. При этом иногда наблюдается выдавливание металла из максимально нагруженной зоны на периферийные участки. Выдавленный металл часто подвергается повторным деформациям, что приводит к отделению частиц износа. Фактически этот процесс характеризуется как изнашивание в результате малоциклового усталости [14,16].

При действии климатически низких температур нередко происходит охрупчивание металлических материалов. В этом случае при воздействии ударных нагрузок изнашивание происходит путем скола по опасным сечениям и является следствием развития дефектов кристаллического строения материала. Поверхностно-активные вещества, содержащиеся в древесине, вызывают адсорбционное пластифицирование (эффект Ребиндера), облегчающее развитие микротрещин и интенсифицирующее хрупкое разрушение [10].

Кроме того под действием сил трения разрыхленный оксидный слой легко разрывается, обнажая ювенильные поверхности, что значительно облегчает проникновение ионов водорода в поверхностные слои и интенсифицирует процесс разрушения. Водород, проникая в поверхностный слой металла, создает в нем высокие давления, которые приводят к образованию напряженного состояния в решетке металла, возникновению и росту микротрещин и расслаиванию структуры.

На изнашивание железоуглеродистых сплавов при ударе существенное влияние оказывает наличие абразива в зоне фрикционного контакта, энергия удара, форма и площадь контакта, размер абразивных частиц, соотношение твердости материала и абразива и т.д. При высокой удельной энергии удара по абразиву в зоне контакта реализуется малоцикловое усталостное разрушение, в результате которого при недостаточной прочности металла одновременно с абразивным изнашиванием происходят микрорезание, выкрашивание металла и его сколы [13].

Таким образом, для достижения повышенной износостойкости железоуглеродистых сплавов, контактирующих с древесным веществом необходимо обеспечить формирование в поверхностном слое благоприятных физико-механических характеристик: твердости, ударной вязкости, сопротивляемости росту микротрещин, а также стойкости к действию абразива и коррозионно-активных сред. Также для уменьшения интенсивности изнашивания необходимо повышение контактной выносливости и абразивной стойкости поверхностей. Немаловажную роль играет наличие в зоне фрикционного взаимодействия концентраторов напряжений, и способность к их развитию в процессе фрикционного взаимодействия. Снижение количества концентраторов напряжений и торможение развития микротрещин можно обеспечить путем создания вязких прослоек между отдельными зонами, а также сформировать благоприятный уровень сжимающих остаточных напряжений.

Как отмечено выше, количество факторов, определяющих закономерности протекания процессов изнашивания железуглеродистых сплавов при фрикционном взаимодействии с древесиной достаточно многообразно. В то же время от их взаимовлияния в значительной степени зависит интенсивность протекания процессов изнашивания. Такое взаимовлияние коррозионного и механического изнашивания в целом, так и отдельных их частных механизмов следует рассматривать, как синергетический эффект, проявляющийся в процессе коррозионно-механического изнашивания [4, 8, 9].

В частности, коррозионные процессы, протекающие в зоне действия механических нагрузок, значительно ускоряют изнашивание железуглеродистых сплавов. В зоне действия растягивающих, изгибающих напряжений и остаточных деформаций развивается коррозия под напряжением, которая ведет к транскристаллитному коррозионному растрескиванию железуглеродистых сплавов. При знакопеременных нагрузках, характерных при эксплуатации машин и оборудования лесного комплекса, проявляется коррозионная усталость, выражающаяся в резком понижении предела усталости металла в присутствии коррозионной среды [15].

Обычно в основе коррозии металлов лежат химические реакции между структурными составляющими материала и средой, протекающие на границах раздела фаз. Этот процесс является самопроизвольным и происходит вследствие окислительно-восстановительных реакций с компонентами окружающей среды. При этом утечка электрического тока через границу металла с агрессивной средой вызывает в зависимости от характера и направления утечки дополнительные анодные и катодные реакции, которые могут прямо или косвенно вести к ускоренному местному или объемному разрушению (коррозия блуждающим током).

При одновременном воздействии напряженного состояния, чаще всего напряжений растяжения, и агрессивных сред происходит квазихрупкое разрушение стали, представляющее собой коррозионное растрескивание с характерным образованием единичных и множественных трещин, особенно в зонах концентрации рабочих и остаточных напряжений. Эти трещины могут распространяться между кристаллами или по телу зерен, но с гораздо большей скоростью в плоскости, нормальной к действующим напряжениям, чем в плоскости их действия [10].

К ускоренному износу металла приводит одновременное воздействие коррозионных факторов и разрушающего абразивного воздействия. В этом случае особо интенсивное механическое удаление образующихся продуктов коррозии при трении приводит к постоянной регенерации химического потенциала поверхности и замедлению процесса пассивации. На изменение потенциала влияет пластическая деформация, характерная для абразивного износа и связанная с движением и выходом на поверхность дислокаций. Таким образом, поверхность трения работает в условиях интенсивного импульсного колебания химического потенциала [8].

При этом коррозионные процессы наиболее вероятны в зонах разнообразных дефектов металла, что приводит к неравномерному разрушению

и разрыхлению поверхностного слоя в отдельных микрообъемах и, соответственно, уменьшению показателей механической прочности. Поэтому увеличение скорости образования и удаления частиц износа и снижение прочностных свойств поверхности обуславливает ускорение проявления механической составляющей процесса изнашивания.

Таким образом, в зоне фрикционного контакта древесины и железоуглеродистых сплавов чрезвычайно сложно исключить взаимовлияние коррозионных и механических воздействий при их изнашивании.

Поэтому для решения проблемы повышения коррозионной стойкости, усталостной и контактной выносливости функциональных поверхностных слоев железоуглеродистых сплавов целесообразно применение комплексной упрочняющей обработки, позволяющая оптимизировать многие триботехнические параметры поверхностных слоев.

При этом одним из перспективных методов упрочняющей обработки функциональных поверхностных является комплексная обработка, сочетающая поверхностное легирование и механическую деформацию. При этом в качестве деформирующих инструментов целесообразно применение металлических щеток с управляемой жесткостью[2].

Достоинствами указанного метода являются простота, высокая стойкость и гибкость рабочей части инструмента, что позволяет обрабатывать маложесткие детали, детали с прерывистыми и сложными поверхностями. Для такого рода упрочняющей обработки возможно применение дисковых щеток различной конструкции, в том числе позволяющих совмещать электроискровое легирование и последующую деформационно-миксирующую обработку.

Большими перспективами повышения износостойкости рассматриваемых изделий обладают деформационные методы обработки в сочетании с воздействием концентрированными потоками энергии, например, использование электроискрового упрочнения. Дополнительным достоинством этого метода является возможность локальной концентрации энергии в требуемой зоне труднодоступной для других методов.

В результате электроискрового воздействия образуется упрочненный слой, под которым расположен материал с понижающейся по глубине твердостью и обладающей повышенной пластичностью. В процессе электроискровой обработки происходит перенос материала электрода, растворимость его в основном материале и прочное сцепление поверхностного слоя с нижележащим за счет их интенсивного смешивания в расплавленном состоянии. Наблюдается также растворение и взаимная диффузия элементов, изменение структуры с образованием карбидов, уплотнение материала поверхностного слоя, препятствующее перемещению дислокаций на поверхность [3, 4]. В результате электроискровой обработки изменяются физико-механические свойства обрабатываемого материала с образованием структур высокой гетерогенности.

К недостаткам данного метода можно отнести значительные высотные параметры шероховатости формируемых поверхностей, образование остаточных напряжений растяжения и нестабильность получаемых свойств [5, 14]. Устранить эти недостатки в процессе электроискрового упрочнения,

позволяет дополнительная деформационная обработка. Она обеспечивает снижение параметров микрогеометрии и формирование благоприятных напряжений сжатия в поверхностном слое. При этом эффективность повышается в случае выполнения деформирующей обработки непосредственно после электроискрового разряда, пока рассматриваемый участок поверхности находится в разогретом состоянии [5,15].

В связи с этим были предложены процессы обработки, сочетающие электроискровое воздействие и последующее за ним деформационное упрочнение обрабатываемой поверхности, представляющее своего рода термомеханическую обработку, сочетающуюся с поверхностным легированием. Такая обработка позволяет обеспечить высокую износостойкость поверхностных слоев деталей рассматриваемой техники.

Таким образом, повышение коррозионной стойкости, усталостной и контактной выносливости железоуглеродистых материалов можно обеспечить применением комплексных конструкторско-технологических методов, позволяющих формировать благоприятную совокупность физико-механических свойств поверхностных слоев. Эффективными методами упрочняющей обработки является одновременное или последовательное воздействие концентрированными потоками энергии и деформационное упрочнение, обеспечивающее оптимизацию многих триботехнических параметров функциональных слоев.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ажогин Ф. Ф. Коррозионное растрескивание и защита высокопрочных сталей. – М. : Металлургия, 1974 г. – 256 с.
2. Анцупов В.П. Теория и практика плакирования изделий гибким инструментом. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова.- 1999. 241 с.
3. Гаркунов Д.Н. Триботехника. Износ и безизносность. - М.: Изд-во МСХА, 2001. - 616 с.: ил. 280.
4. Козлов В.Г., Титова И.В., Коноплин А.Н., Булыгин Н.Н. Методы борьбы с коррозией металлов // Фундаментальные исследования. – 2017. – № 6. – С. 53-57.
5. Buglaev A.M., Pamfilov E.A. Improving wear resistance of surface of hard alloy parts by diamond polishing// Трение и износ. 2001. Т. 22. № 4. С. 429-434.
6. Жарков, В. Я. Триботехническое материаловедение: учеб. пособие. – Брянск: БГТУ, 2005. –159 с.
7. Кочергин В. П. Защита металлов от коррозии в ионных расплавах и растворах электролитов - Екатеринбург. Изд-во Урал. ун-та, 1991. – 304 с.
8. Прозоров Я. С. Разработка композиционных покрытий для узлов трения оборудования для производства стружки // Сборник науч. труд. «Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика». – Воронеж: ФГБОУ ВПО «ВГЛТА», 2014. - № 3 ч.2 (8-2) – С. 407-411.
9. Прозоров Я. С. Особенности водородного изнашивания деревообрабатывающего оборудования// Новые материалы и технологии в машиностроении: сб. науч. тр. – Брянск, 2011. – Вып.14. – С. 98- 105.
10. Pamfilov E.A., Prozorov Y.S. On the modeling of mechanochemical wear. Journal of Friction and Wear. 2012. Т. 33. № 3. С. 224-232.
11. Pilyushina G.A., Pyrikov P.G., Rukhlyadko A.S. Improving the performance of machining tools for nonmetallic materials//Russian Engineering Research. 2013. Т. 33. № 9. С. 532-535.

12. Памфилов Е.А., Пилюшина Г.А. Возможности и перспективы повышения работоспособности машин и оборудования лесного комплекса//Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2013. № 5 (335). С. 10-13.
13. Сорокин Г.М. Трибология сталей и сплавов. Учебн. для вузов.- М.:ОАО «Издательство «Недра»,2000.-317 с.
14. Сорокин Г. М., Ефремов А. П., Саакян Л. С. Коррозионно-механическое изнашивание сталей и сплавов. - М.: Нефть и газ, 2002 – 424 с.
15. Семенова, И. В. Коррозия и защита от коррозии [Текст] / И. В. Семенова, Г. М. Флорианович, А. В. Хорошилов. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 336 с.
16. Tribocorrosion of passive metals and coatings / Edited by Dieter Landolt and Stefano Mischler. - UK, Cambridge : Woodhead Publishing Limited, 2011. – 579 p.

АВТОРЫ

Памфилов Евгений Анатольевич - заведующий кафедрой «Триботехническое материаловедение и технологии материалов», доктор технических наук, профессор научно-исследовательской лаборатории инженерии материалов и адаптивных, г. Брянск технологических систем ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет».

Пилюшина Галина Анатольевна - кандидат технических наук, доцент ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», г. Брянск.

THE AUTHORS

Evgeny Anatolyevich Pamfilov - Head of the Department "Tribological Engineering Materials and Materials Technology", Doctor of Technical Sciences, Professor Research Laboratory of Materials Engineering and Adaptive, Bryansk. technological systems FSBEI HE "Bryansk State Technical University".

Pilyushina Galina Anatolievna - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Bryansk State Technical University, Bryansk.

**ПОВЫШЕНИЕ АБРАЗИВНОЙ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ
ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩЕЙ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ ЦЕМЕНТАЦИИ**

**INCREASIN THE ABRASIVE WEAR RESISTANCE OF TOOL STEEL FOR
WOODWORKING INDUSTRY WITH LASER CEMENTATION METHOD**

МАРИНИН Е.А. (ВятГУ, Киров, РФ),
ГАВРИЛОВ Г.Н. (НГТУ им. Р.Е. Алексеева, Н. Новгород, РФ),
ЧИРКОВ А.М. (ВятГУ, Киров, РФ)

MARININ E.A. (VyatSU, Kirov, Russia),
GAVRILOV G.N. (NNSTU, N. Novgorod, Russia),
CHIRKOV A.M. (VyatSU, Kirov, Russia)

***Аннотация.** Работа посвящена исследованиям износостойкости инструментальных сталей после лазерной цементации. Приведены режимы лазерной цементации и результаты испытаний исследуемых материалов. Выявлены причины повышения износостойкости.*

***Abstract.** The paper is devoted to the study of the wear resistance of tool steel after laser cementation. The modes of laser cementation and the test results of the studied materials are presented. The reasons of increasing wear resistance are revealed.*

***Ключевые слова:** Лазерная цементация, износостойкость, абразив, микротвердость.*

***Keywords:** Laser plasma, diffusion, cementation, hardening.*

Низколегированные инструментальные стали, обладающие низкой теплостойкостью и высокой твердостью поверхности, в настоящее время имеют ограниченное применение. Основными областями их использования являются дереворежущий инструмент и штампы холодного деформирования [1-3]. К таким материалам относятся стали 6ХС, 9ХС, 9ХФ, ХВГ. Во многих случаях использование этих материалов является экономически целесообразным и оправданным наравне с инструментом, изготовленным из твердых сплавов и среднелегированных инструментальных сталей (8Х6НФТ и Х6ВФ).

Повышение ресурса работы инструмента из сталей 6ХС, 9ХС, 9ХФ, ХВГ позволит повысить конкурентоспособность продукции и снизить эксплуатационные затраты, связанные с подготовкой инструмента к работе (заточка).

В качестве критерия ресурса работы исследуемых инструментальных материалов была использована абразивная износостойкость. А в качестве способа повышения абразивной износостойкости лазерная цементация с использованием угольного электрода в качестве источника углерода [4,5].

Эксперимент проводился при следующих энергетических режимах: мощность лазерного излучения – 500 Вт, диаметр сфокусированного лазерного излучения – 1 мм, скорость сканирования луча лазера по поверхности – 20мм/с, дуга обратной полярности, сила тока 50 А. В качестве образцов были выбраны пластины 60x30x10 мм следующих марок сталей: 6ХС, 9ХС, 9ХФ, ХВГ, 8Х6НФТ и Х6ВФ. Зону обработки защищали аргоном.

В результате лазерной цементации на поверхности всех образцов сформировалась область с повышенными значениями микротвердости, значения которых превышают величину, обеспечиваемую при объемных способах термической и химико-термической обработки. Максимальные значения микротвердости для исследуемых марок сталей составили: 6ХС – 8500 МПа, 9ХС – 9050 МПа, 9ХФ – 8750 МПа, ХВГ – 7350 МПа, 8Х6НФТ – 8700 МПа, Х6ВФ – 7650 МПа. Объективно установлено, что микротвердость поверхности исследуемых сталей имеет более низкие значения, чем после лазерной закалки [6-8].

При исследовании структурного состояния выявлено, что в поверхностный слой представляет собой структурную композицию мартенсита, аустенита остаточного и карбидов. Также было отмечено формирование переходной области, где не происходит насыщение углеродом. Микротвердость такой области примерно равна микротвердости исходного материала.

Отмечено, что часть карбидов растворяется в аустените при лазерной цементации (рис.1). Дисперсность карбидов при этом существенно увеличивается. При этом необходимо отметить, что некоторые карбиды не успевают раствориться и присутствуют в структуре практически неизменном виде, являясь дополнительными центрами кристаллизации [9].

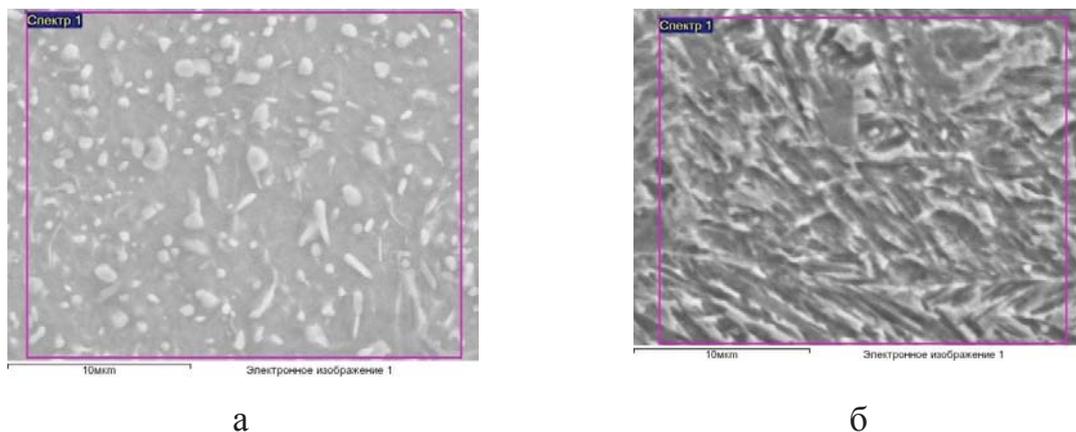


Рис.1 Электронная микроскопия стали 6ХС:

а – исходная нормализованная структура; б – зона лазерной цементации

В результате рентгенофазового анализа, установлено, что количество аустенита остаточного составляет – 35-40%, в некоторых случаях достигает 60%, что значительно выше для исследуемых марок стали после лазерной закалки [10, 11].

Причинами повышения содержания аустенита остаточного являются следующие факторы:

1. Обогащение поверхностного слоя углеродом и снижение мартенситной точки;

2. При высоких плотностях мощности энергии лазерного излучения за счет больших температур происходит более полное растворение карбидов, чем это имеет место во время печной закалки по стандартным режимам [12].

Остаточный аустенит обладает более высокой теплопроводностью ($\lambda=0,1$ кал/(см·с·°С)) по сравнению с другими структурными составляющими (например карбидами $\lambda=0,017$ кал/(см·с·°С)) [10]. При нагреве в результате выполнения технологических операций это позволяет отводить излишки тепла, предупреждая перегрев и потерю прочности вследствие этого, что является весьма актуальным для исследуемых сталей, большинство которых относится к классу сталей с низкой теплостойкостью.

Для определения абразивной износостойкости были проведены испытания в соответствии с ГОСТ 23.208-79 «Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытания материалов на износостойкость при трении о не жестко закрепленные абразивные частицы». Износостойкость оценивали по величине потери массы образца. Число оборотов ролика для испытаний всех образцов составило 3600 при скорости вращения 60 об/мин. В качестве эталона был использован образец стали 6ХС, свойства которого были сформированы в результате закалки 870°С и отпуска на 300°С. Результаты проиллюстрированы на рис. 2.

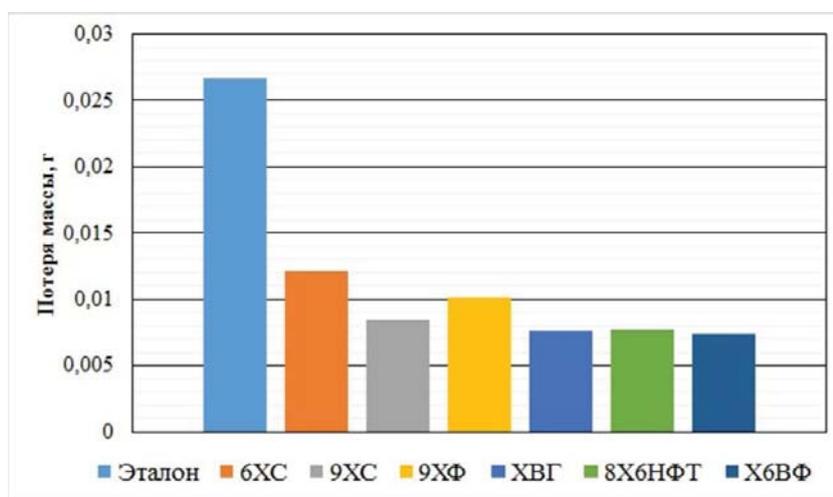


Рис. 2 Результаты испытаний на относительную износостойкость

Максимальная износостойкость была отмечена для стали ХВГ, при этом ее износостойкость практически равна износостойкости сталей 8Х6НФТ и Х6ВФ. Хотя стали 8Х6НФТ и Х6ВФ относятся к сталям с повышенной износостойкостью. Вероятно, повышенная износостойкость объясняется остаточным аустенитом в поверхностном слое, который может претерпевать деформационное мартенситное превращение [13], что благотворно влияет на свойства поверхности. Такие выводы достаточно хорошо согласуются с научными работами последних лет [14,15].

ЛИТЕРАТУРА

1. Полевой, С.Н. Упрочнение машиностроительных материалов: Справочник [Текст] / С.Н. Полевой, В.Д. Евдокимов - М.: Машиностроение, 1994.- 496 с.
2. Арзамасов, Б.Н. Материаловедение: учебник для вузов [Текст] /Б.Н. Арзамасов, В.И. Макарова – М.: Изд – во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2002.– 648 с.
3. Геллер, Ю.А. Инструментальные стали. [Текст] М.: Металлургия, 1975.-584 с.
4. Маринин, Е.А. Экспериментальная оценка способов лазерной цементации низколегированных инструментальных сталей [Текст] / Е.А. Маринин, А.М. Чирков, Г.Н. Гаврилов, Г.П. Фетисов, Д.А. Чернышов, Ю.А. Курганова //Технология металлов. №11. 2017. С. 31-37.
5. Маринин, Е.А. Исследование структуры и свойств сталей после лазерной цементации с использованием энергии лазерного излучения /Е.А. Маринин, А.М. Чирков, Г.Н. Гаврилов [Текст] // Современные технологии в машиностроении и литейном производстве: материалы III междунар. науч.-практ. конф. (Чебоксары, 4-6 декабря 2017 г.) / под ред. д-ра техн. наук, проф. И.Е. Илларионова.–Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2017, 380 с.
6. Гаврилов Г.Н. Разработка и освоение технологий поверхностного термического упрочнения и наплавки металлических материалов лазерным излучением: дис. доктора техн. наук / Г.Н. Гаврилов; НГТУ. - Н.Новгород, 2000. - 397 с.
7. Григорьянц, А.Г. Основы лазерного термоупрочнения сплавов [Текст] / А.Г. Григорьянц, А.Н., Сафонов – М.: Высшая школа, 1988. – 159 с.
8. Kulakov S. On the Mechanism of Adhesive and Tribocorrosion Wear Under Dry Friction and Boundary Lubricatio №. Proc. of the JAPAN Inter№. Tribology Conf, Nagoya, 1990, v . 1 , P. 493-498.
9. Ставрев, Д.С. Образование и изменение карбидов в железоуглеродистых сплавах под действием КПЭ [Текст] // Д.С. Ставрев, Металловедение и термическая обработка металлов.– №11.– 2003.– С. 3-6.
10. Кремнева, Л.В. Режимы лазерного упрочнения дереворежущего инструмента из легированных сталей [Текст] / Л.В. Кремнева, В.И. Малыгин, К.К. Снегирева // ИВУЗ «Лесной журнал».– 2016.–№5.– С.157-166.
11. Теоретическое исследование кинетики аустенитизации в сталях при нагреве непрерывным лазерным излучением [Текст] / Е.И. Ким, А.Г. Григорьянц, А.Н. Сафонов и др. // Инженерно-физический журнал. - 1987. - Т.52, №3. - С. 444-492.
12. Федосов, С. А. Влияние лазерной обработки на содержание остаточного аустенита в углеродистых и хромистых сталях [Текст] /С.А. Федосов // ФХОМ.– 1990. –№5.– С.18-22.
13. Чейлях, А.П. Влияние закалки на структуру, состав метастабильного остаточного аустенита и абразивную износостойкость цементованных конструкционных сталей [Текст] / А.П. Чейлях, М.А. Рябикина, Н.Е. Караваева // Вестник Приазовского государственного технического университета.– 2012.– Вып. 25.–С.95-101.
14. Макаров, А.В. Влияние лазерной закалки и последующей термической обработки на структуру и износостойкость цементированной стали 20ХН3А [Текст] / А.В. Макаров, Л.Г. Коршунов, И.Ю. Малыгина, А.Л. Осинцева // Физика металлов и металловедение.– 2007.– т.103.–№5.– С.536-548.
15. Белашова, И.С. Исследование кинетики массопереноса при лазерном легировании конструкционных сталей углеродом и кремнием в режиме оплавления поверхности [Текст] / И.С. Белашова, Т.В. Тарасова // Упрочняющие технологии и покрытия.– 2007.– №4.– С.34-38.

АВТОРЫ

Маринин Евгений Анатольевич, ассистент кафедры ИТМ ФГБОУ ВО «ВятГУ», г Киров, marinin@vyatsu.ru, +79229075997.

Гаврилов Геннадий Николаевич, профессор кафедры МТМиТОМ ФГБОУ ВО НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д.т.н., г. Нижний Новгород, gavrilov1109@mail.ru, +79036577981.

Чирков Анатолий Михайлович, директор НП ВЛИТЦ, к.т.н., г.Киров, techlaser@mail.ru, (8332)742-486.

THE AUTHORS

Evgeny Marinin, FTED, Vyatka State University, 36 Moskovskaya Street, Kirov city 610000, Russian Federation.

Gennady Gavrilov, R.Y. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, 24 Minina Street, Nizhny Novgorod 603950, Russian Federation

Anatoly Chirkov, FTED, Vyatka State University, 36 Moskovskaya Street, Kirov city 610000, Russian Federation.

**О НАСЛЕДСТВЕННОСТИ В ФОРМОВОЧНЫХ, СТЕРЖНЕВЫХ
СМЕСЯХ И ПРОТИВОПРИГАРНЫХ ПОКРЫТИЯХ**

**ABOUT HEREDITY IN FORMING, ROD MIXTURES AND
ANTI-BURNING COATINGS**

**ИЛЛАРИОНОВ И.Е., НИКИТИН В.И., ¹ГИЛЬМАНШИНА Т.Р.,
СТРЕЛЬНИКОВ И.А., ШАЛУНОВ Е.П., САДЕТДИНОВ Ш.В.,
САЛОВ П.М., КОРОЛЕВ А.В., МОИСЕЕВА О.В.**

(ФГБОУ ВПО ЧГУ им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия;

¹Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Российская Федерация;

²Самарский государственный университет, г. Самара.)

**ILLARION I.E., NIKITIN V.I., GILMANSHINA T.R., STRELNIKOV I.A.,
SHALUNOV E.P., SADETDINOV SH.V., SALOV P.M.,
KOROLEV A.V., MOISEEVA O.V.**

(FGBOU VPO ChGU them. INN Ulyanov, Cheboksary, Russia;

¹Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation;

²Samara State University, Samara)

***Аннотация.** Впервые рассмотрены вопросы наследственности в формовочных, стержневых смесях и противопригарных покрытиях. Экспериментально и теоретически доказано, что свойства смесей и покрытий во многом определяется качеством применяемых связующих органического и неорганического происхождения и материалами, применяемыми для изготовления литейных форм и стержней. В работе исследовано влияние электрических свойств кварцевого песка на прочность песчано-глинистых формовочных смесей, которая зависит от явления пьезоэлектрического и трибоэлектрического эффектов. Увеличение прочности оценивалось по значениям коэффициента эффективности, величина которого изменяется от 0 до 26 %. Результаты лабораторных исследований подтверждены заводскими опытами.*

***Annotation.** For the first time, questions of heredity in molding, core mixtures and antiburning coatings were considered. It was experimentally and theoretically proved that the properties of mixtures and coatings are largely determined by the quality of the used binder of organic and inorganic origin and materials used for the manufacture of molds and cores. The paper investigates the influence of the electrical properties of quartz sand on the strength of sand-clay molding compounds, which depends on the phenomenon of the piezoelectric and triboelectric effects. The increase in strength was estimated by the values of the efficiency coefficient, the value of which varies from 0 to 26%. The results of laboratory studies are confirmed by factory experiments.*

Ключевые слова: трибо- и пьезоэлектрические эффекты, магнитная обработка, формовочные и стержневые смеси, противопригарные покрытия, свойства, качества литейных форм, стержней и отливок.

Keywords: tribo- and piezoelectric effects, magnetic processing, molding and core mixtures, nonstick coatings, properties, qualities of casting molds, cores and castings.

Свойства формовочных и стержневых смесей во многом определяются химическим составом, но и особенностями внутреннего строения формовочных материалов. При этом следует обратить внимание на структурную наследственность свойств смесей, зависящих от особенностей химического состава и структуры применяемых наполнителей как кварцевые пески и глины, бентониты различных месторождений, связующие органического и неорганического происхождения и другие добавки, применяемые для улучшения формы – механических, технологических и эксплуатационных свойств смесей, стержней и форм, а также противопригарных покрытий.

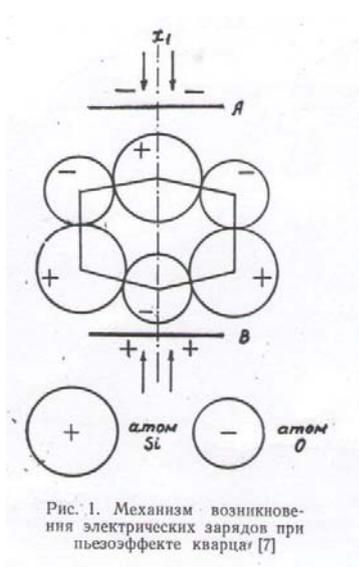
Нами [1-12] было экспериментально и теоретически доказано, что вода, как связующее (растворитель) между огнеупорной глиной и кварцевым песком изменяет свои свойства (поверхностное натяжение, водородный показатель, электросопротивление, краевой угол смачивания после магнитной обработки в переменном и постоянном магнитных полях. Также было доказано влияние магнитной обработки на свойства кварцевого песка и огнеупорной глины и изменение физико-механических свойств песчано-глинистых смесей в случае применения электромагнитной активации [1-13].

Сырые песчано-глинистые формовочные смеси представляют собой капиллярно-пористую систему, состоящую из твердой, жидкой и газообразной фаз. Изменение свойств одной из фаз приводит к изменению свойств всей системы. Среди многочисленных факторов, влияющих на формирование прочности смесей, являются электрические свойства песка, которые определяются диэлектрической проницаемостью, удельным сопротивлением и диэлектрическими потерями. В работе П. П. Берга [14] отмечено, что зерно кварца несет на себе электрический заряд. Однако явление электризации зерен песка вследствие неизученности не находит практического применения в технологических процессах литейного производства.

Применяемые для приготовления формовочных смесей кварцевые пески состоят из минерала кварца, особенностью которого является приобретение электрического заряда под действием механических напряжений [15, 16]. Сущность этого, так называемого пьезоэлектрического эффекта состоит в том, что при механическом воздействии на кристалл кварца механическая энергия переходит в электрическую, в результате чего поверхности его приобретают электрические заряды (рис. 1).

В процессах подготовки формовочных материалов и приготовления смесей явление пьезоэлектрического эффекта тесно переплетается с другим – трибоэлектрическим эффектом [6], сущность которого заключается в том, что

процессы сушки, транспортировки и перемешивания песка связаны с контактными явлениями и трением минеральных частиц друг о друга, в результате чего последние приобретают электрические заряды. На величину трибоэлектрического эффекта оказывают влияние многие факторы, среди которых доминирующее значение имеют: химический состав, структура, удельное электрическое сопротивление, характер поверхности контактирующих или механически действующих друг на друга частиц, температура, влажность и характеристика внешнего электромагнитного поля [17].



В проводимом исследовании изменение электрического заряда на поверхности зерен песка при перемешивании определялось по изменению электрического сопротивления водных суспензий формовочных смесей, а также их осветленной части. Пробы для водных суспензий отбирались одновременно с навесками для определения прочности смеси в зависимости от условий приготовления. В опытах применялась смесь состава (массовые части): Кичигинский песок – 100,0; Нижне-Увельская глина – 10,0; вода – 5,0.

Смеси готовились по четырем режимам (табл. 1).

Согласно принятой методике 600 г формовочной смеси перемешивали в течение 10 мин с 1000 мл дистиллированной воды. После 18 часового отстаивания определили электросопротивление осветленной части раствора, и после 5 минутного ее перемешивания с осадком – суспензии. Одновременно проводились замеры величины водородного показателя. Электросопротивление определялось на высокочувствительном приборе компенсационного типа конструкции Харьковского института инженеров железнодорожного транспорта им. С. М. Кирова, а концентрация водородных ионов – на приборе ЛПУ-01.

Таблица 1

Режим приготовления смеси	Продолжительность предварительного перемешивания сухих составляющих смеси, мин.			
	песок		песок + глина	
	с поднятыми катками	с опущенными катками	с поднятыми катками	с опущенными катками
А	–	–	2	–
Б	–	–	–	2
В	3	–	–	2
Г	–	3	–	2

Результаты экспериментальных данных по замеру электросопротивления и водородного показателя приведены в таблице 2.

Изменения электросопротивления, как и концентрации водородных ионов, являются лишь частью многочисленных факторов, отражающих влияние электризации на свойства формовочных смесей, что связано с наследственностью вновь приобретенных свойств смесей.

Таблица 2

Наименование измеряемой величины	Перемешивание по режиму			
	А	Б	В	Г
Электросопротивление осветленной части (относительные единицы)	29,0	34,0	52,0	74,5
Электросопротивление суспензии относительные единицы)	50,5	56,0	65,5	68,0
pH осветленной части раствора (ед.)	8,63	8,86	8,95	9,07
pH суспензии (ед.)	9,15	9,31	9,65	9,37

С некоторыми допущениями предполагаем, что изменение свойств формовочной смеси при перемешивании песка в бегунах с поднятыми катками происходит преимущественно в результате явлений трибоэлектрического эффекта, а при перемешивании с опущенными катками – в результате одновременного проявления пьезо- и трибоэффектов. Эксперименты (рис. 2) указывают на сложный характер формирования прочности формовочных смесей в связи с электризацией зерен песка в процессе перемешивания. Повышение прочности смеси связано с возникновением электрического заряда на поверхности кварцевых зерен, в результате чего усиливается взаимодействие между минеральными частицами смеси.

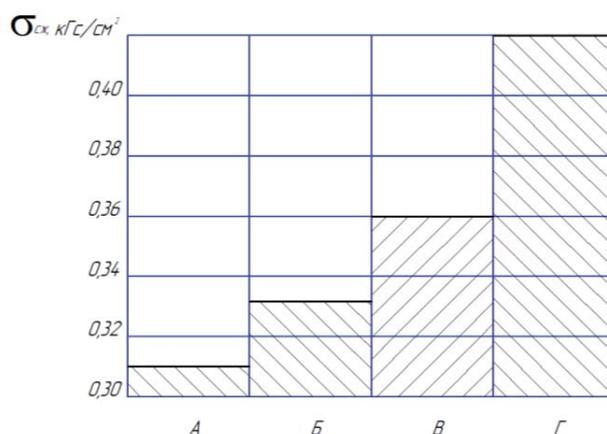


Рис.2. Зависимость прочности формовочной смеси от характера перемешивания формовочных материалов в бегунах (режимы перемешивания приведены в табл. 1)

Эффективность влияния электризации зерен кварцевого песка на прочность смесей определяли по прочностному эффекту

$$\eta = \frac{\sigma_1 - \sigma_0}{\sigma_0} 100 \%,$$

где η - коэффициент эффективности, σ_1 – прочность на сжатие с предварительным перемешиванием песка, σ_0 – прочность смеси без предварительного перемешивания.

Результаты проверки экспериментальных данных в производственных условиях (рис. 3) показывают, что эффективность предварительного перемешивания песка с опущенными катками возрастает до оптимальной величины при 5 мин ($\eta=26\%$). Дальнейшее увеличение времени перемешивания незначительно отражается на повышении прочности смеси. Установленный факт увеличения прочности смесей свидетельствует о возможности практического использования эффекта электризации поверхности зерен песка в технологических процессах.

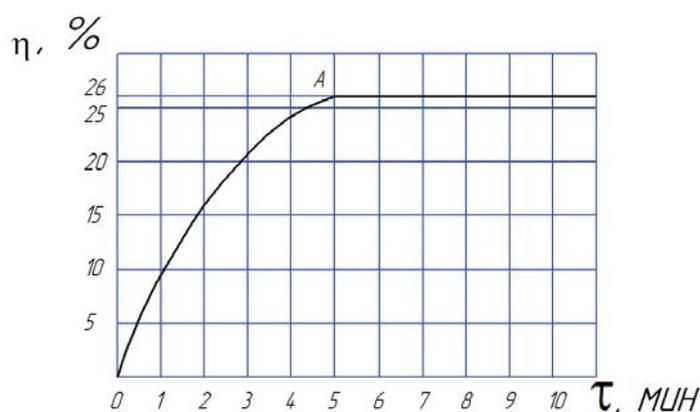


Рис. 3. Эффективность влияния сухого перемешивания песка на прочность формовочной смеси

На основании описанных исследований в фасонно-литейном цехе Челябинского металлургического завода были проведены опытно-промышленные испытания стержневых смесей, результаты которых приведены в таблице 3.

Таблица 3

Наименование стержневых смесей	Состав смеси в весовых частях				Физико-механические свойства смеси					
	Кичигинский песок	Лигносульфонат технический $\nu=1,27+1,30 \text{ г/см}^3$	Бускульская глина	древесные опилки	без предварительного перемешивания сухого песка			с предварительным перемешиванием сухого песка		
					прочность на сжатие, кГ/см^2	влажность, %	газопроницаемость, %	прочность на сжатие, кГ/см^2	влажность, %	газопроницаемость, %
№ 1	100,0	1,0	16	—	0,4-0,6	6,0-7,0	≥ 80	0,5-0,7	6,0-7,0	≥ 80
№ 2	100,0	1,0	16	2	0,55-0,65	6,5-7,5	≥ 100	0,65-0,75	6,5-7,5	≥ 100
№ 3	100,0	1,0	16	4	0,55-0,65	6,0-7,0	≥ 100	0,65-0,80	6,0-7,0	≥ 100

Как видно из табл. 3, предварительное перемешивание сухого песка в течение 3-х минут приводит к повышению прочности смеси на 15-20 %, что позволяет сократить расход огнеупорной глины на 10-15 % при сохранении исходной прочности смеси.

Приведенные теоретические соображения и результаты исследований показывают возможность практического использования явлений пьезо- и трибоэлектрического эффектов на различных стадиях технологического процесса приготовления формовочных песков и смесей.

Физико-механические и технологические свойства формовочных смесей во многом определяются электромагнитной природой поверхностных процессов [4]. Большое влияние на свойства формовочных смесей оказывает вода. Содержащиеся в ней минеральные частицы и ее магнитная обработка в значительной мере меняют свойства формовочных смесей [1-9]. С этой точки зрения представляет интерес изучение влияния электромагнитной природы песков и глин, а также их магнитной обработки на формирование свойств формовочных смесей.

Магнитные свойства песков и глин определяются наличием и составом ферромагнитных минералов, к которым относятся: магнетит, гематит, маггемит, лимонит и т.д.

Ниже представлены основные магнитные свойства некоторых минералов формовочной смеси [3]:

Минералы	Магнитная восприимчивость по системе СГС	Намагниченность, гс	Коэрцитивная сила, э	Остаточная намагниченность, гс	Точка Кюри, °С
Магнетит	0,3-2,0	490	10-150	4-20	578
Гематит	$1 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 10^{-4}$	1,5-2,5	7000-8000	0,03	675
Маггемит	0,3-2,0	435	10-130	1,0	300-325

Как видно из этих данных, магнетит и маггемит имеют близкие значения магнитной восприимчивости, намагниченности и коэрцитивной силы. Вместе с тем их магнитная восприимчивость несколько выше, чем у гематита, и значительно выше, чем у кварца ($-0,46 \cdot 10^{-6}$ СГС).

Природа магнитных свойств связана с доменной структурой минералов [4], характеризующейся образованием областей спонтанной намагниченности с упорядоченной ориентацией магнитных моментов атомов. Линейные размеры домена не превышают нескольких микрон, что значительно меньше предельного размера глинистой составляющей (22 мкм). Глина и глинистая составляющая песков содержат частицы с многодоменной и однодоменной структурой. Последние отличаются высокой намагниченностью и большой коэрцитивной силой [4].

Сила взаимодействия F между ферромагнитными частицами смеси определяется по формуле [4]:

$$F = \frac{m_1 m_2}{\mu_0 r^2} \cos \alpha,$$

где

m_1 и m_2 – магнитные массы взаимодействующих частиц;

r – расстояние между частицами;

μ_0 – магнитная проницаемость среды;

α – угол между вектором напряженности магнитного поля и линией взаимодействия частиц.

Магнитная масса может быть определена из уравнения:

$$m = \frac{\chi \Psi V H}{a} = \chi \Psi S H = \chi \dot{S} H.$$

Здесь χ – магнитная восприимчивость частицы;

H – напряженность магнитного поля в области частиц;

a , V , S – длина, объем и площадь поперечного сечения частицы;

Ψ – коэффициент заполнения частицы;

\dot{S} – эффективное сечение частицы.

При сушке, транспортировке песка и глины, размоле последней и перемешивании смеси в результате измельчения происходят изменения магнитных свойств ферромагнитных частиц. Например, с уменьшением размеров частиц магнетита возрастает коэрцитивная сила и уменьшается удельная магнитная восприимчивость. При этом, начиная с 40 мкм и ниже, наблюдается более интенсивный рост коэрцитивной силы.

В отмеченных технологических процессах происходит как объединение ферромагнитных частиц смеси в агрегаты, так и разрушение их. Ферромагнитные частицы и их агрегаты распределены в объеме смеси более и менее равномерно. Часть их находится в виде примазок к немагнитным материалам (например, к зернам кварца). Нижний предел крупности агрегатов составляет 3-6 мкм [4, 5].

Таким образом, между отдельными технологическими процессами и изменениями магнитных характеристик ферромагнитных частиц существует определенная взаимосвязь. Обработка песка и глины в знакопеременном магнитном поле приводит к разрушению образовавшихся агрегатов многодоменных частиц. Ферромагнитные частицы с меньшей остаточной намагниченностью и коэрцитивной силой разрушаются при меньших значениях магнитной индукции, поэтому эффект повышения прочности и изменения других свойств смеси будет возрастать.

Для исследования влияния магнитной обработки на свойства формовочных материалов смесь из кичигинского песка, нижнее-увельской глины и воды в количестве соответственно 100; 10 и 5 массовых частей обрабатывали на установке, описанной в работе [3], при величине магнитной индукции 2050-2150 Гс. Сухие формовочные материалы пропускали через рабочее окно аппарата в полихлорвиниловом шланге диаметром 20 и толщиной стенки 0,5 мм со скоростью 0,15-0,25 м/сек и выдерживали в таком состоянии 30-60 мин. Затем сухие составляющие смеси перемешивали в течение 2 мин, а после добавки воды – еще 5 мин.

Испытание сырых смесей на сжатие и газопроницаемость проводили по стандартной методике. Уплотняемость оценивали по высоте образца при постоянной навеске. Для выяснения роли глинистой составляющей в формировании свойств смеси магнитной обработке подвергались как отмытые, так и неотмытые пески. Ниже представлена характеристика исследуемых формовочных смесей:

Компоненты смеси	А	Б	В	Г	Д	Е	Ж
Песок отмытый	–	+	нет	нет	нет	нет	нет
Песок неотмытый	нет	нет	–	–	+	+	+
Глина	–	–	–	+	+	+	+
Вода	–	–	–	–	–	–	+

Примечание. «+» - магнитная обработка; «–» - без магнитной обработки.

Магнитная обработка отмытого и неотмытого песка увеличивает прочность и газопроницаемость формовочной смеси. При использовании неотмытого песка уплотняемость смеси возрастает. Магнитная обработка глины также увеличивает прочность смеси. При одновременной обработке песка и глины наблюдается дальнейшее увеличение прочности смеси и газопроницаемости. Дополнительная обработка воды еще более увеличивает прочность, но несколько снижает газопроницаемость.

ВЫВОДЫ

На основании результатов настоящего исследования можно полагать, что магнитная обработка песка и глины способствует росту коэрцитивной силы, уменьшению удельной магнитной восприимчивости и изменению других магнитных характеристик в связи с разрушением агрегатов из многодоменных частиц. Указанные изменения магнитных характеристик приводят к изменению свойств формовочной смеси и противопопригарных покрытий. С целью улучшения свойств формовочных смесей и снижения расхода связующих материалов рекомендуется проводить одновременную магнитную обработку песка, глины и воды.

Эффективность применения активированных кварцевых песков, глин, графитов и других материалов убедительно доказана многочисленными исследованиями авторов [19-22].

ЛИТЕРАТУРА

1. Васин Ю.П., Илларионов И.Е., Бортников М.М. К вопросу седиментационной устойчивости глинистых суспензий с омагниченной водой // Прогрессивная технология литых заготовок. Тула, 1972, 19 т 2. с. 6-9.
2. Васин Ю.П., Бортников М.М., Илларионов И.Е. К объяснению механизма влияния омагниченной воды на прочность песчано-глинистых смесей // Известия вузов. Машиностроение. М., 1973, № 2, с. 109-113.
3. Васин Ю.П., Илларионов И.Е., Бортников М.М. Применение омагниченных формовочных материалов // Технология, организация и механизация литейного производства, (НИИформтяжмаш 9-70-13). М.: 1971, с. 21-33.
4. Илларионов И.Е., Пашнин М.И., Кобзарь В.Е. О механизме формирования свойств формовочных смесей под действием электрических сил // Улучшение качества литья путем

- использования прогрессивных формовочных материалов механизации и автоматизации технологических процессов. Липецк, ЛПИ, 1977, НТО, МУМ, вып.2, с. 141-152.
5. Иванова Г.М., Махнев Ю.М. Изменение структуры воды растворов под воздействием магнитного поля // Вопросы теории и практики магнитной обработки воды и водных систем (ин-т «Цветметинформация»). М.: 1971. с. 45-51.
 6. Илларионов И.Е., Васин Ю.П., Бортников М.М. К вопросу влияния магнитной обработки воды на свойства песчано-глинистых формовочных смесей // Прогрессивная технология литых заготовок. Тула, 1972, с. 156-162.
 7. Илларионов И.Е., Васин Ю.П., Бортников М.М. Магнитная обработка песков и глин // Черная металлургия. 1972. № 8, с. 151-153.
 8. Илларионов И.Е. К вопросу формирования свойств формовочных и стержневых смесей, обработанных физико-химическими методами // Теория и технология литейных процессов, ЧГУ, Чебоксары, 1984, с. 27-39.
 9. Васин Ю.П., Бортников М.М., Илларионов И.Е. Исследование физико-механических свойств жидкостекольных смесей, обработанных различными способами // Вопросы теории и технологии литейных процессов. Челябинск, 1972, (ЧПИ) с. 62-69.
 10. Илларионов И.Е., Багрова Н.В. Исследование и разработка стержневых смесей на основе алюмохромфосфатного связующего, модифицированного органическими добавками // Прогрессивная технология изготовления форм и стержней для производства отливок из черных и цветных металлов. Охрана труда. Чебоксары, Чувашский ОК КПСС. ОП НТО Машпром, ЧГУ, 1986, с. 39-41.
 11. Использование трибо- пьезоэлектрического эффектов в приготовлении смесей // Васин Ю.П., Бортников М.М., Илларионов И.Е. и др. // Литейное производство, 1979. № 8. с. 25-26.
 12. К вопросу о влиянии постоянного электрического тока на физико-механические свойства формовочных смесей // Васин Ю.П., Пашнин М.И., Илларионов И.Е. и др. // Прогрессивные технологические процессы в литейном производстве. Хабаровск, 1972, с. 44-46.
 13. К вопросу о влиянии трибо- и пьезоэлектрических эффектов на прочность формовочных смесей // Бортников М.М., Васин Ю.П., Илларионов И.Е. и др. // Известия ВУЗов СССР. Машиностроение, 1971, № 2. С. 151-155.
 14. Берг. П.П., Формовочные материалы, Машгиз, М., 1963, с. 408.
 15. Шубников А.В., Пьезоэлектрические текстуры, Изд-во АН СССР, М.-Л., 1946.
 16. Гудков А.С., Кивленко Е.Я., Кондрашев С.Н., Основы поисков и разведки месторождений пьезооптических минералов, Госгеолтехиздат, М., 1963.
 17. Олофинский Н.Ф., Электрические методы обогащения, Госгеолтехиздат, М., 1962.
 18. Пархоменко Э.И. Электрические свойства горных пород. Наука, М., 1968.
 19. Илларионов И.Е. Применение технологии получения металлофосфатных связующих, стержневых и формовочных смесей на их основе * // Черные металлы. №4 (1036), 2018, с. 13-20.
 20. Илларионов И.Е., Кафтанников А.С., Нуралиев Ф.А., Гильманшина Т.Р. Оценка величины пригара на поверхности чугуновых отливок // Черные металлы. №8 (1040), 2018, с. 23-28.
 21. Илларионов И.Е., Богданова Т.А., Гильманшина Т.Р., Меркулова Г.А., Богданов А.Ю. Технология модифицирования алюминиевых сплавов ультрадисперсным кремнием // Металлург, №5 (1037), 2018, с. 67-70.
 22. Гильманшина Т.Р., Илларионов И.Е., Королева Г.А., Лыткина С.И. Исследование измельчаемости природных скрытокристаллических графитов. // Обогащение руд. №4 (1036). с. 6-10.

АВТОРЫ

Илларионов И.Е. – д.т.н., профессор. Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, г. Чебоксары.

Никитин В.И. – д.т.н., профессор. Самарский государственный университет, г. Самара.

Гильманшина Т.Р. – к.т.н., доцент. Сибирский федеральный университет, г. Красноярск.

Стрельников И.А. – к.т.н., доцент. Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, г. Чебоксары.

Шалунов Е.П. - к.т.н., профессор Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, г. Чебоксары.

Садетдинов Ш.В. – д.х.н., профессор. Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, г. Чебоксары.

Салов П. М. – д.т.н., профессор Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, г. Чебоксары.

Королев А.В. – к.т.н., доцент. Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, г. Чебоксары.

Моисеева О.В. – ассистент. Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, г. Чебоксары.

AUTHORS

Illarionov I.E. - Doctor of Technical Sciences, Professor. Chuvash State University named after I.N. Ulyanova, Cheboksary.

Nikitin V.I. - Doctor of Technical Sciences, Professor. Samara State University, Samara.

Gilmanshina T.R. - Ph.D., associate professor. Siberian Federal University, Krasnoyarsk.

Strelnikov I.A. - Ph.D., associate professor. Chuvash State University named after I.N. Ulyanova, Cheboksary.

Shalunov E.P. - Ph.D., Professor, Chuvash State University named after I.N. Ulyanova, Cheboksary.

Sadetdinov Sh.V. - Doctor of chemical sciences, professor. Chuvash State University named after I.N. Ulyanova, Cheboksary.

Salov P. M.- Doctor of Technical Sciences, Professor I.N. Chuvash State University Ulyanova, Cheboksary.

Korolev A.V. - Ph.D., associate professor. Chuvash State University named after I.N. Ulyanova, Cheboksary.

Moiseeva O.V. - assistant. Chuvash State University named after I.N. Ulyanova, Cheboksary.

**ВЛИЯНИЕ КОМПЛЕКСНОГО МОДИФИКАТОРА НА
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕКОВЫХ СМЕСЕЙ**

**EFFECT OF COMPLEX MODIFIER ON THE TECHNOLOGICAL
PROPERTIES OF LIQUID-GLASS MIXTURES**

ИВАНОВА Л.А.

*(Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова,
г. Чебоксары, Россия)*

ЧЕРНЫШОВ Е.А.

*(Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия)*

L.A. IVANOVA

(Chuvash State University n.a. I.N. Ulianov, Cheboksary, Russia)

E.A. CHERNISHOV

*(Nizhny Novgorod state technical university n.a. R. E. Alexeev, Nizhny Novgorod,
Russia)*

Аннотация. Выявлено влияние комплексного модификатора на технологические свойства жидкостекловых смесей. Приведен состав разработанного комплексного модификатора, позволяющего использовать жидкостекловую смесь для черного и цветного литья

Abstract. The influence of the complex modifier on the technological properties of liquid-glass mixtures is revealed. The composition of the developed complex modifier, which allows the use of liquid glass mixture for black and non-ferrous casting, is given.

Ключевые слова: жидкое стекло, жидкостекловый состав, комплексный модификатор, остаточная прочность, выбиваемость, живучесть.

Key words: liquid glass, liquid mixture, complex modifier, residual strength, knockout, survivability.

Жидкостекловый состав самовердеющие смеси (ЖСС) нетоксичны, недефицитны, имеют относительно низкую стоимость, экологически безопасны, обладают хорошими показателями по механической прочности, термостойкости, газотворной способности и могут использоваться как для изготовления стержней, так и форм в производстве черного и цветного литья. Однако, несмотря на целый ряд достоинств, они характеризуются высокой остаточной прочностью (σ^0) и плохой выбиваемостью из-за образования прочной стеклофазы [1]. Кроме этого, ЖСС имеют, как правило, малую живучесть, что существенно ограничивает их применение в производстве.

Из-за высокой остаточной прочности плохо выбиваются формы и особенно стержни из жидкостекольных смесей. Остаточная прочность стержней после нагрева и охлаждения характеризует ее выбиваемость, зависит от множества факторов. Полной характеристикой остаточной прочности смеси должна быть зависимость прочности от температуры в интервале 200–1000°C. На рис.1. приведены некоторые данные об остаточной прочности распространенных жидкостекольных смесей без специальных добавок (смеси 1-3) и разработанной авторами жидкостекольной смеси с комплексным модификатором (смесь 4). Хорошо известно, что температурная кривая σ^o имеет два максимума и два минимума. Однако их положение относительно оси температур и абсолютные значения σ^o меняются при изменении состава смесей. Так, продукты взаимодействия жидкого стекла с двухкальциевым силикатом — феррохромовым шлаком или нефелиновым шлаком — имеют меньшие значения прочности, чем силикагель и карбонаты или ацетаты, преобладающие в смесях со сложноэфирными отвердителями и продукты CO_2 . [2, 3].

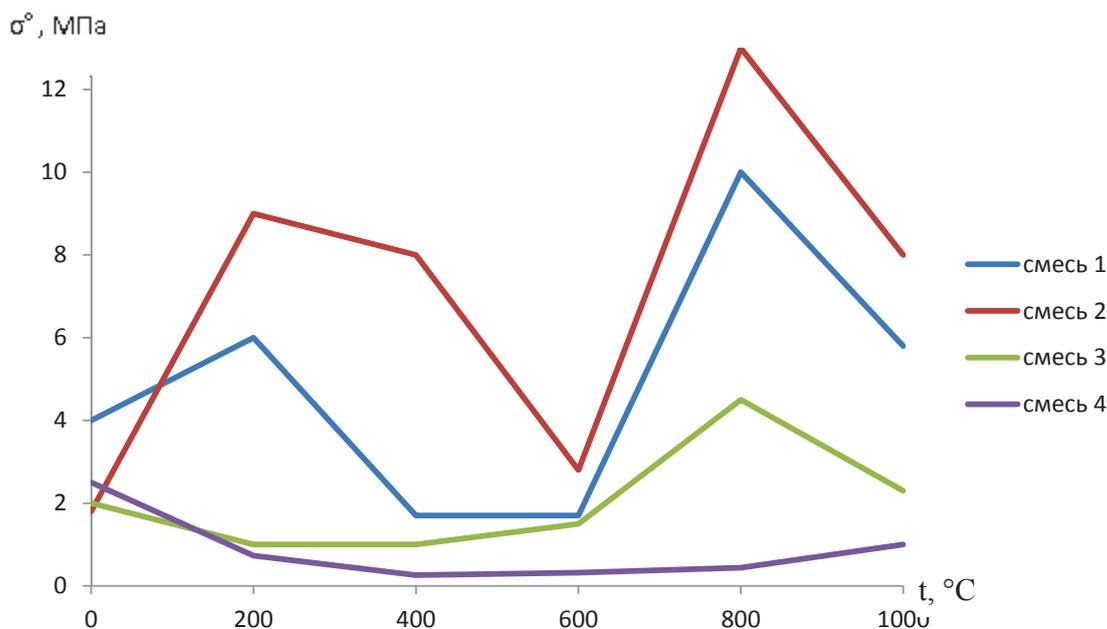


Рис. 1. Значения остаточной прочности (σ^o) различных смесей на жидком стекле: 1 – смесь с 4 мас. жидкого стекла ($m=2,4$), отвердитель – сложный эфир; 2 - смесь, продутая CO_2 с 6% жидкого стекла ($m=2,4$); 3 – смесь с 5% жидкого стекла ($m=2,6$), с 4 мас.ч. феррохромового шлака; 4 – смесь с 3,5 мас.ч. жидкого стекла ($m=2,1$) и 0,6 мас. ч. комплексного модификатора

Разрабатываемые в последние десятилетия способы улучшения выбиваемости направлены на снижение абсолютных значений σ^o смещение второго максимума в область более высоких температур. Органические добавки более эффективны, если смесь прогревается до температур, не превышающих 500-600°C, неорганические – при прогреве до 700-800° и выше. Поэтому первые используют преимущественно для получения чугунных отливок, вторые — для получения стальных отливок. Предлагаемая жидкостекольная смесь с

комплексным модификатором на основе лаурилсульфата натрия, полифосфата натрия и глицерина, взятых в соотношении 1:4:1 соответственно и в количестве 0,6 масс. ч., способного улучшить выбиваемость и снизить остаточную прочность в различных интервалах температур, что позволяет использовать ее при изготовлении отливок из дисперсионно-упрочняемых композиционных материалов на основе алюминия, а также цветных сплавов, стали и чугуна. За счет многофункционального действия модификатора данная смесь является холоднотвердеющей, быстро набирает необходимую прочность и не подвержена влиянию влажности окружающей среды [3, 4]. Так как смесь содержит уменьшенное количество жидкого стекла (3,5 мас.ч. на 100 мас.ч. кварцевого песка), смесь легко уплотняется как вручную, так и вибрационными способами, имеет хорошую живучесть.

Живучесть – это технологическое свойство – время, в течение которого смесь способна сохранять свои основные свойства. Особое значение проблема живучести имеет для самотвердеющих смесей. Предложенная авторами смесь имеет живучесть от 30 до 60 минут, в зависимости от температуры окружающей среды и песка, что позволяет ее использовать при изготовлении как средних, так и крупных стержней.

С точки зрения достижения необходимой производительности стержневого участка важно время достижения стержнем манипуляторной прочности, при котором можно будет освободить оснастку. Поэтому дополнительно определяют показатель соотношения живучести ($\tau_{ж}$) и времени достижения манипуляторной прочности ($\tau_{м}$). Этот показатель называют коэффициентом живучести [5]:

$$K_{ж} = \tau_{ж} / \tau_{м}.$$

У жидкостекольной смеси с комплексным модификатором коэффициент живучести составляет: $K_{ж} = 20 / 60 = 0,33$.

При нормальном цикле отверждения смесей (24 ч) коэффициент живучести обычно поддерживают в пределах 0,2-0,35.

Таким образом, модифицирование жидкостекольной смеси предложенной комплексной добавкой – модификатором, позволяет использовать ее для изготовления литейных форм и стержней, отверждаемых на воздухе и обладающих исключительными технологическими и служебными свойствами, экологической безопасностью, представляет собой приемлемую бюджетную замену применяемым в настоящее время в производстве формовочным и стержневым составам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Борсук П.А. Жидкие самотвердеющие смеси/ П.А. Борсук, А.М. Лясс. – М : Машиностроение. 1979.- 255 с.
2. Жуковский С.С. Прочность литейной формы. – М.: Машиностроение, 1989. – 288с.
3. Иванова Л.А. Влияние комплексного модификатора на остаточную прочность жидкостекольных смесей/ Л.А. Иванова, Е.А. Чернышов, С.А. Кузнецов// Литейное производство. – 2016. – №11. – С.16-18.

4. Иванова Л.А. Сравнительный анализ и оценка технологических и служебных свойств жидкостекольных смесей/ Л.А. Иванова, Е.А. Чернышов// Материалы III Международной научно-практической конференции «Современные технологии в машиностроении и литейном производстве». – Чебоксары. 2017. – С.86-91.
5. Евлампиев А.А. Анализ кинетики отверждения ХТС, приготовленных на различных связующих/ А.А. Евлампиев, Е.А. Чернышов// Литейщик России. – 2011. - №8. – С.38-40.

АВТОРЫ

Иванова Людмила Александровна – старший преподаватель кафедры «Материаловедение и металлургические процессы» Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова, г.Чебоксары

Чернышов Евгений Александрович – д.т.н., профессор кафедры «Металлургические технологии и оборудование» Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева, г. Нижний Новгород

THE AUTHORS

Lyudmila Alexandrovna Ivanova - Senior Lecturer, Department of Materials Science and Metallurgical Processes, I.N. Chuvash State University Ulyanova, Cheboksary

Evgeny Alexandrovich Chernyshov - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Metallurgical Technologies and Equipment Department of the Nizhny Novgorod State Technical University R.E. Alekseeva, Nizhny Novgorod

**ОЦЕНКА АКТИВНОСТИ НАПОЛНИТЕЛЕЙ
ПРОТИВОПРИГАРНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ГРАФИТА
ПО УСЛОВНОМУ КРИТЕРИЮ АКТИВАЦИИ**

**EVALUATION OF THE ACTIVITY OF FILLERS
NONSTICK COATINGS BASED ON GRAPHITE
CRITERION FOR CONDITIONAL ACTIVATION**

ЖЕРЕБ В.П.

(ФГБОУ ВО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия)

ИЛЛАРИОНОВ И.Е.

(ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова», Чебоксары, Россия),

ГИЛЬМАНШИНА Т.Р., КОВАЛЕВА А.А., ЛЫТКИНА С.И.

(ФГБОУ ВО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия)

ZHEREB V.P.

(Siberian federal university, Krasnoyarsk, Russia)

I.E. ILLARIONOV

(Chuvash state university, Cheboksary, Russia)

GILMANSHINA T.R., KOVALEVA A.A., LYTKINAS.I.

(Siberian federal university, Krasnoyarsk, Russia)

***Аннотация.** Предложен основанный на результатах дифференциальной сканирующей калориметрии эмпирический критерий для оценки энергонасыщенности наполнителя для противопригарных покрытий на основе активированного скрытокристаллического графита.*

***Annotation.** An empirical criterion based on the results of differential scanning calorimetry for estimating the energy saturation of the filler for anti-stick coatings based on activated cryptocrystalline graphite is proposed.*

***Ключевые слова:** графит, условный критерий активации, механоактивация, термический анализ, кажущаяся энергия активации, приведенная площадь пика теплового эффекта окисления, суммарный энергетический эффект.*

***Keywords:** Graphite, conditional activation criterion, mechanoactivation, thermal analysis, apparent activation energy, reduced peak area of the thermal oxidation effect, total energy effect.*

При современных требованиях к качеству формовочных материалов, смесей и покрытий необходим комплексный анализ свойств с привлечением совмещенных методов анализа, позволяющих количественно оценивать превращения, протекающие при активации на разных масштабных уровнях. Природный скрытокристаллический графит из месторождений

Красноярского края используется для приготовления формовочных смесей и противопожарных покрытий в литейных технологиях после механической [1–5] и химической [3, 6] активации.

Количество «запасенной» веществом энергии в процессе его активации, т.е. показатель активности частиц материала в химических и физико-механических реакциях при изготовлении изделий на его основе, зависит от природы и интенсивности внешних воздействий в процессе предварительной подготовки и активации [1, 2].

В настоящее время существует достаточно большое количество различных критериев [1, 5, 7–10].

Таким образом, существующие теории направлены на решение узких задач, связанных с активацией материалов. При таком подходе коэффициент активности материалов позволяет ориентировочно оценить, во сколько раз удалось улучшить активность материала [11, 12].

Комитетом по кинетике Международной конфедерации по термическому анализу и калориметрии (Kinetics Committee of the International Confederation for Thermal Analysis and Calorimetry – ICTAC) разработаны рекомендации по получению кинетических данных, которые соответствуют реальной кинетике различных процессов, включая термическое разложение неорганических твердых веществ; термическая и термоокислительная деградация полимеров и органических веществ; реакции твердых тел с газами; полимеризация и сшивание; кристаллизация полимеров и неорганических веществ; опасных процессов. Рекомендации сосредоточены на кинетических измерениях, проводимых с помощью методов термического анализа, таких как термогравиметрия (ТГ), дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК) и дифференциальный термический анализ (ДТА). Цель этих рекомендаций заключается в оказании помощи не эксперту в сборе адекватных кинетических данных путем правильного выбора образцов и условий измерения [13–20]. Как было показано в [21], термический анализ открывает большие возможности для оценки технологических свойств графита разной природы.

Поэтому для количественной оценки энгонасыщенности продукта, получаемого после механической активации природного скрытокристаллического графита использовали результаты дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). Термоокислительную деструкцию графита проводилина воздухе на термоанализаторе SDT Q600 в динамическом режиме в атмосфере воздуха со скоростью нагрева 10 °С/мин до 1000 °С.

Целью данной работы является разработка комплексного критерия, дающего возможность оценивать не только качество самих материалов, но и учитывать влияние способа подготовки материала на активность его частиц и свойства изготовленных из него изделий.

Для анализа кривых ДСК в работе использовали существующие на сегодняшний день подходы: по температуре начала плавления и по пересечению касательной к измеренной кривой и базовой линии.

Особенностью природного скрытокристаллического графита из месторождений Красноярского края [4, 5, 22–27] является присутствие в нем

минеральной составляющей, которая в процессах активации также претерпевает изменения и вносит свой вклад в энергонасыщение конечного продукта. Термический анализ, как показано в [28], может использоваться в качестве экспресс-метода количественной оценки состояния таких минеральных составляющих. Однако, для характеристики энергонасыщенности материала со сложным фазовым составом, активированным в процессах совместного химического и механического воздействия, как это имеет место в случае скрытокристаллического графита, получение надежных феноменологических моделей для реальных приложений представляет серьезную проблему [29, 30]. Поэтому в нашей работе предлагается условный комплексный эмпирический критерий, который формируется как не имеющего физического смысла сочетание термохимических и кинетических значений процесса окисления активированного скрытокристаллического графита.

Анализ кривых ДСК показал, что графит начинается окисляться при температуре 481 °С, а наиболее интенсивно – при температуре 569 °С. При этом в графите наблюдается два неявно выраженных пика, связанных с окислением графита. Исследование структурных параметров показало, что в графите присутствуют только одна модификация. Первый эффект объясняется горением «свободного» графита, т.е. тех частиц, которые не связаны с примесными фазами. Появление второго эффекта связано с разложением части примесей в процессе высокотемпературного обжига (пирит окисляется до оксида железа (III) в области 450–500 °С, кальцит разлагается до оксида кальция в области 800–1000 °С и т.п.), что приводит к разрушению сростков и высвобождению частиц графита и его последующего окисления. После 10 мин обработки графита в меньшей наблюдается разрушение частиц по дефектам, имеющимся в частицах, но активации не происходит.

Одной из основных количественной характеристик реакционной способности веществ, определяемых по результатам ДСК, является энергия активации, рассчитанная по уравнению Аррениуса. Поскольку, согласно уравнению Аррениуса, константа скорости химической реакции находится в экспоненциальной зависимости от величины энергии активации, уменьшение последней вызывает увеличение константы скорости процесса окисления графита.

Однако, для оценки комплексного состояния вещества необходимо критерий, который можно рассматривать как совокупную количественную термодинамическую характеристику.

За основу такого критерия можно взять условный критерий активации, учитывающий основные термодинамические характеристики: энергия активации процесса окисления графита, рассчитываемая по уравнению Аррениуса ($\Delta E_{\text{акт}}$); температура максимальной скорости реакции окисления, °С ($\Delta T_{\text{нач}}$); ν – площадь пика.

А также кинетический параметр – теплота процесса окисления графита, оцениваемая по площади пика кривой (ΔH).

Теплота окисления рассчитывается следующим образом:

$$\Delta H = \Delta H_{\text{окисл}} + \Delta H_{\text{выгор}} + \Delta H_{\text{акт}},$$

где $\Delta H_{\text{окисл}}$ – теплота окисления; $\Delta H_{\text{выгор}}$ – теплота сгорания графита; $\Delta H_{\text{акт}}$ – теплота активации.

Анализ полученных данных показал, что теплота активации мало влияет на теплоту процесса окисления в целом, т.е. по величине $\Delta H_{\text{акт}}$ значительно меньше, чем $\Delta H_{\text{окисл}}$ и $\Delta H_{\text{выгор}}$. И, следовательно, $\Delta H_{\text{акт}}$ данным способом не может быть зафиксирована.

Критерий можно рассчитать следующим образом:

$$K = \frac{\Delta E'_{\text{акт}}}{\Delta E_{\text{акт}}} \cdot \frac{\Delta H'}{\Delta H} \cdot \frac{\Delta T_{\text{ок}}}{\Delta T'_{\text{ок}}} \cdot \frac{\nu}{\nu'}$$

Данный показатель условный и не имеет под собой физического смысла, но учитывающий уменьшение энергических барьеров, т.е. скорость достижения состояния, и изменение термодинамических параметров вещества и кинетических характеристик в процессе активации.

Зависимость условного критерия активации от времени активации приведена в табл.

Таблица– Расчет условного критерия активации

Время активации, мин	Термодинамические параметры графита, оцениваемые по кривой ДСК				
	ΔH , кДж/г	ν , °С·мин/мг	$\Delta T_{\text{ок}}$, °С	Анализ по температуре начала окисления	
				$\Delta E_{\text{акт}}$, кДж/моль	K
ГЛС-2	15,14	12,1	566,11	48,09	1
10	14,45	11,5	558,75	45,59	1,17
20	14,48	11,5	556,85	34,53	1,56
30	14,90	11,9	557,81	44,78	1,12

Из представленных данных видно, что при увеличении времени активации до 20 мин условных критерий увеличивается, дальнейшее увеличение времени активации приводит к снижению условного критерия, что хорошо согласуется с ранее полученными данными.

Частицы, находящиеся в поверхностном слое твердого тела, обладают некоторой избыточной энергией и в результате поверхностный слой, находясь в упруго напряженном состоянии, обладает большим запасом потенциальной энергии, чем внутренние слои. Поверхностная энергия увеличивается с повышением дисперсности и твердости материала.

Таким образом, в ходе работы предложен основанный на результатах дифференциальной сканирующей калориметрии эмпирический критерий для оценки энергонасыщенности наполнителя для противопожарных покрытий на основе активированного скрытокристаллического графита.

ЛИТЕРАТУРА

1. Молчанов В.И., Селезнева О.Г., Жирнов Е.Н. Активация минералов в процессе измельчения. М.: Недра, 1988.
2. Shen T.D., Ge W.Q., Wang K.Y. et al. Structural disorder and phase transformation in graphite produced by ball milling // *Nanostructured Materials*. Vol. 1. No. 4. P. 393-399. 1996.
3. Илларионов, И. Е. Формовочные материалы и смеси : монография / И. Е. Илларионов, Ю. П. Васин. – Чебоксары : Изд-во Чуваш. гос. ун-та, 1992. – Ч. 1. – 223 с.
4. Исследование свойств противопожарных покрытий для чугунного литья на основе химически и механохимически активированных графитов / Т.Р. Гильманшина, В.Г. Бабкин, С.И. Лыткина, В.Н. Баранов, С.А. Худоногов // *Огнеупоры и техническая керамика*. – 2014. – № 9. – С. 7–10.
5. Свойства литейных суспензий на основе наноструктурированных графитов / Т.Р. Гильманшина, Л.И. Мамина, В.Н. Баранов, А.И. Безруких, С.А. Попов, С.И. Лыткина // *Литейное производство*. – 2011. – № 10. – С. 32–35.
6. Иванова А.А., Юдина Н.В., Савельева А.В. Оценка изменений в составе фульвокислот после механоактивации торфа с помощью методов ИК- и ПМР-спектроскопии // *Химия растительного сырья*. 2014. No1. С. 263–268.
7. Литвинцев В.С., Мельникова Т.Н., Ятлукова Н.Г., Литвинова Н.М. Механоактивация в процессах рудоподготовки // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2005. Т. 12. No 3. С. 306-311.
8. Буркова В.Н., Юдина Н.В., Мальцева Е.В., Савельева А.В. Влияние твердофазной механоактивации на функциональный состав гуминовых кислот из углей // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2015. No 9. С. 84–87.
9. Богатырева Е.В. Развитие теории и практики эффективного применения механоактивации в технологии гидрометаллургического вскрытия кислородсодержащего редкометалльного сырья: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М.: НИТУ "МИСИС". 2015.
10. Мамина Л.И. Теоретические основы механоактивации формовочных материалов и разработка ресурсосберегающих технологических материалов процессов в литейном производстве: Автореферат дис. ... д-ра техн. наук. Красноярск: КИЦМ. 1989.
11. Janot R., Guerard D. Ball-milling: the behavior of graphite as a function of the dispersal media // *Carbon*. 2002. V. 40. No 15. P. 2887–2896.
12. Guerard D., Janot R. The reactive ball-milling: a new ChimieDouce method. // *Journal of Metastable and Nanocrystalline Materials*. 2004. Vol. 20-21. P. 311-318
13. Юсупов Т.С., Шумская Л.Г. Изучение процесса термоокислительной деструкции механоактивированного бурого угля методом термического анализа // *Химия твердого топлива*. 2008. No 5. С. 47-52.
14. Brown M.E., Maciejewski M., Vyazovkin S. Computational aspects of kinetic analysis. Part A: The ICTAC kinetics project-data, methods and results // *ThermochimicaActa*. 2000. Vol. 355. P. 125-143.
15. Maciejewski M. Computational aspects of kinetic analysis. Part B: The ICTAC Kinetics Project - the decomposition kinetics of calcium carbonate revisited, or some tips on survival in the kinetic minefield // *ThermochimicaActa*. 2000. Vol. 355. P. 145-154.
16. Vyazovkin S. Computational aspects of kinetic analysis. Part C. The ICTAC Kinetics Project – the light at the end of the tunnel // *ThermochimicaActa*. 2000. Vol. 355. P. 155-163.
17. Burnham A.K. Computational aspects of kinetic analysis. Part D: The ICTAC kinetics project - multi-thermal-history model-fitting methods and their relation to isoconversional methods // *ThermochimicaActa*. 2000. Vol. 355. P. 165-170.
18. Roduit B. Computational aspects of kinetic analysis. Part E: The ICTAC Kinetics Project - numerical techniques and kinetics of solid state processes // *ThermochimicaActa*. 2000. Vol. 355. P. 171–180.

19. Vyazovkin S., Burnham A.K., Criado J.M., Perez-Maqueda L.A., Popescu C., Sbirrazzuoli N. ICTAC Kinetics Committee recommendations for performing kinetic computations on thermal analysis data // *ThermochimicaActa*. 2011. Vol. 520. P. 1–19.
20. Vyazovkin S. Chrissafis K., Di Lorenzo M.L., Koga N., Pijolat M., Roduit B., Sbirrazzuoli N., Sunol J.J.. ICTAC kinetics committee recommendations for collecting experimental thermal analysis data for kinetic computations // *ThermochimicaActa*. 2014. Vol. 590. P. 1-23.
21. Земляной К.Г., Кащеев И.Д., Устьянцев В.М. Исследование возможности оценки технологических свойств графита // *Новые огнеупоры*. 2015. No 3. С. 101-108.
22. Мамина Л.И., Королева Г.А., Гильманшина Т.Р. Перспективные способы обогащения графита // *Литейное производство*. 2003. № 2. С. 16-18.
23. Получение графитсодержащих наноструктурированных материалов и композиций для литейного производства / В.Н. Баранов, Т.Р. Гильманшина, А.И. Безруких [и др.] // *Литейщик России*. – 2011. – № 10. – С. 42–45.
24. Химико-механическая подготовка скрытокристаллического графита к дальнейшей переработке / Т.Р. Гильманшина, С.И. Лыткина, В.П. Жереб, Г.А. Королева // *Обогащение руд*. – 2016. – № 2 (362). – С. 14–19.
25. Исследование свойств противопригарных покрытий для чугунного литья на основе химически и механохимически активированных графитов / Т.Р. Гильманшина, В.Г. Бабкин, С.И. Лыткина, В.Н. Баранов, С.А. Худогонов // *Огнеупоры и техническая керамика*. – 2014. – № 9. – С. 7–10.
26. Оценка величины пригара на поверхности чугунных отливок / И.Е. Илларионов, Т.Р. Гильманшина, А.С. Кафтанников, Ф.А. Нуралиев // *Черные металлы*. – 2018. – № 8. – С. 23–28.
27. Формирование качества поверхности литейной формы и отливок / И. Е. Илларионов, Е. П. Шалунов, И. А. Стрельников [и др.] // *Проектирование и перспективные технологии в машиностроении и металлургии* : мат-лы II-ой Республиканской научно-практической конференции. – Чебоксары : ФГБОУ ВПО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова», 2016. – С. 44–51.
28. Боева Н.М., Бочарникова Ю.И., Наседкин В.В., Белоусов П.Е. Термический анализ – экспресс-метод оценки качественных и количественных характеристик природных и синтезированных органоглин // *Российские нанотехнологии*. 2013. Т. 8. No 3-4. С. 54-57.
29. Muravyeva N.V., Pivkina A.N. New concept of thermokinetic analysis with artificial neural networks // *ThermochimicaActa*. 2016. Vol. 37. No 6. P. 69–73.
30. Burnham A.K. Obtaining reliable phenomenological chemical kinetic models for real-world applications // *ThermochimicaActa*. 2014. Vol. 597. P. 35–40.

**ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ДОМ «РУДА И МЕТАЛЛЫ» ("ORE AND METALS")
И ЕГО РОЛЬ В ИНФОРМАЦИОННОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ, УНИВЕРСИТЕТОВ И
НАУЧНЫХ ЦЕНТРОВ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО
КОМПЛЕКСА РОССИИ И ДРУГИХ СТРАН**

**PUBLISHING HOUSE "ORE AND METALS" AND ITS ROLE IN THE
INFORMATION SUPPORT OF INDUSTRIAL ENTERPRISES,
UNIVERSITIES AND RESEARCH CENTERS OF THE MINING AND
METALLURGICAL COMPLEX OF RUSSIA AND OTHER COUNTRIES**

ЦИРУЛЬНИКОВ Е.В. - профессор, зам. главного редактора журнала «Черные Металлы» Издательского дома «Руда и Металлы»,
ВОРОБЬЕВ А.Г. - доктор экономических наук, профессор, шеф-редактор Издательского дома «Руда и Металлы» г.Москва

TSIRULNIKOV E.V. - deputy chief editor of the journal "Black Metals" of the Ore and Metals Publishing House,
VOROBIEV A.G., Doctor of Economics, professor, chief editor of the Ore and Metals Publishing House, Moscow

Аннотация. В работе представлены результаты работы Издательского дома «Руда и Металлы» по информационному обеспечению промышленных предприятий, университетов и научных центров горно-металлургического комплекса России, высших учебных заведений России и стран ближнего и дальнего зарубежья.

Annotation. The paper presents the results of the work of the Ore and Metals Publishing House on information support of industrial enterprises, universities and scientific centers of the mining and metallurgical complex of Russia, higher educational institutions of Russia and countries of the near and far abroad.

Ключевые слова: Издательский дом, руда и металлы, информационное обеспечение, промышленные предприятия, университеты, научные центры, горно-металлургический комплекс России, ближнее и дальнее зарубежье.

Keywords: Publishing house, ore and metals, information support, industrial enterprises, universities, research centers, mining and smelting complex of Russia, near and far abroad

В настоящее время Издательский дом «Руда и Металлы» выпускает ряд журналов и книг, которые представлены на следующем слайде

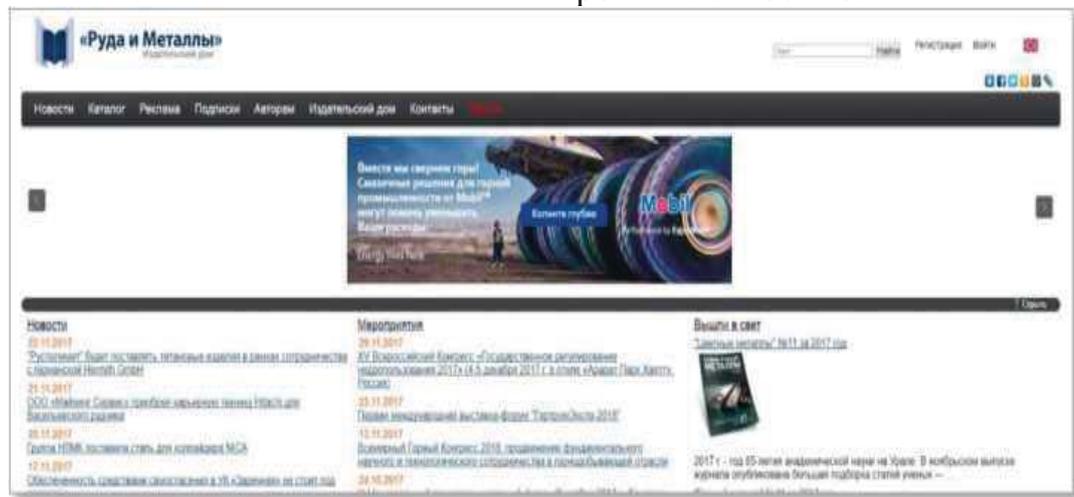


ЖУРНАЛЫ

- Горный журнал
- Обогащение руд
- Цветные металлы
- Черные металлы
- Eurasian mining
- Non-ferrous Metals
- CIS Iron and Steel Review
- МРТ (распространение)

КНИГИ

Издательский дом «Руда и Металлы» выпускает книжную продукцию широкого спектра: от научно-технической и экономической до художественной литературы, связанной с горно-металлургической промышленностью.



Обзор продукции ИД «Руда и Металлы»
Информационный портал www.rudmet.ru -
новости металлургии и горной
промышленности.

ORE & METALS WEEKLY

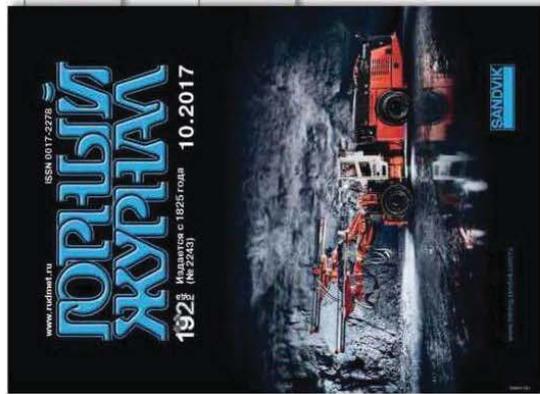
ГОРНОРУДНАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ ■ УГОЛЬНАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ ■ МЕТАЛЛУРГИЯ

Новости горной промышленности и металлургии, бесплатная рассылка интернет-издания Ore & Metals Weekly



«Руда и Металлы»
Издательский дом

ГОРНЫЙ ЖУРНАЛ



с 2013 г.



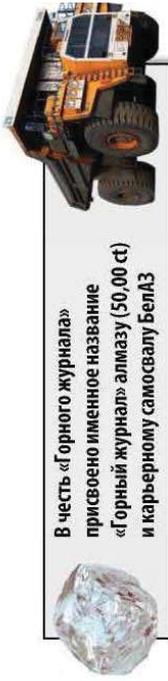
с 1925 г.



ВАК

Основан в 1825 году при Горном кадетском корпусе (ныне — Санкт-Петербургский горный университет).
Объем до 104 полос.
Тираж до 3500 экз.
ISSN 0017-2278

Место в рейтинге SCIENCE INDEX за 2017 год по тематике «Горное Дело» — 8



В честь «Горного журнала» присвоено именное название «Горный журнал» алмазу (50,00 ct) и карьерному самосвалу БелАЗ

ГОРНЫЙ ЖУРНАЛ

Старейший российский ежемесячный научно-технический и производственный журнал, отражающий все аспекты разработки месторождений добычи полезных ископаемых, в том числе руд черных и цветных металлов, угля, торфа, горючих сланцев и строительных горных пород. **Официальный информационный орган Федерального УМО «Прикладная геология, горное дело, нефтегазовое дело и геодезия».**

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:



Пучков
Лев Александрович
член-корреспондент РАН,
профессор, доктор
технических наук

УЧРЕДИТЕЛИ:

АО «Издательский дом «Руда и Металлы», ФГАОУ ВПО НИТУ «МИСиС», Автономная некоммерческая организация «Хибинский телерадиоиздательский центр»

Журнал выпускается при участии:

АК «АЛРОСА» (ПАО), АО «Апатит», ПАО «ГМК «Норильский никель», НПК «Механобр-техника» (АО)

При содействии:

Государственного предприятия «Навоийский ГМК», ФГБУН ИПКОН РАН, НП «Горнопромышленники России», Государственного Эрмитажа

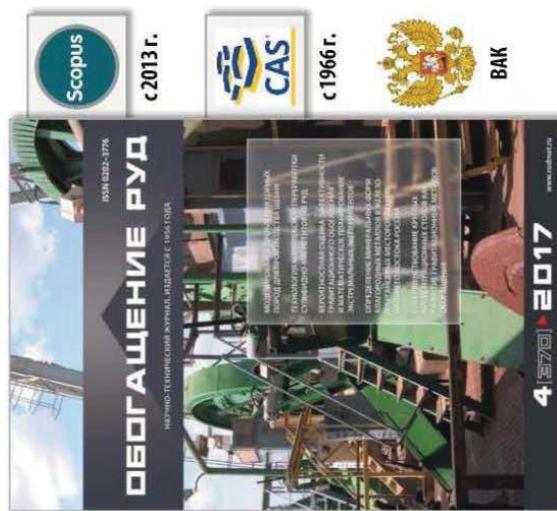
ТЕМАТИЧЕСКИЕ РАЗДЕЛЫ ЖУРНАЛА:

- Наука и промышленность
- Правовое регулирование в сфере недропользования
- Из опыта работы горных предприятий и организаций
- Международное сотрудничество
- Теория и практика производства
- Сырьевая база
- Физика и горных пород и процессов
- Проектирование и горно-строительные работы
- Экономика, организация и управление
- Разработка месторождений
- Переработка и комплексное использование минерального сырья
- Оборудование и материалы
- Маркшейдерское дело
- Энергетическое хозяйство. Автоматизация
- Промышленная безопасность и охрана труда
- Охрана окружающей среды
- Подготовка кадров
- За рубежом
- История горного дела. Культура.



«Руда и Металлы»
Издательский дом

ОБОГАЩЕНИЕ РУД



Основан в 1956 г.
Объем не менее 58 полос. Тираж до 1000 экз.
Периодичность выпуска — 6 раз в год.
ISSN 0202-3776
Место в рейтинге SCIENCE INDEX за 2017 год по тематике «Горное дело» — 3

ОБОГАЩЕНИЕ РУД

«Обогащение руд» — ведущий журнал в области техники и технологии обогащения полезных ископаемых.

Официальный информационный орган Федерального УМО «Прикладная геология, горное дело, нефтегазовое дело и геодезия».



ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

Арсентьев

Василий Александрович

*доктор технических наук,
старший научный сотрудник*

УЧРЕДИТЕЛИ:

АО «Механобр инжиниринг»,

АО «Научно-производственная корпорация

«Механобр-техника»,

ФГАОУ ВПО НИТУ «МИСиС»,

АО «Издательский дом «Руда и Металлы»

При участии:

ИПКОН РАН и Государственного Эрмитажа

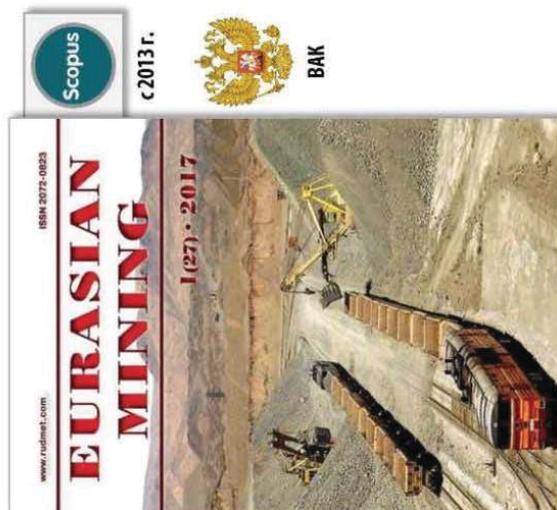
ТЕМАТИЧЕСКИЕ РАЗДЕЛЫ ЖУРНАЛА:

- Рудоподготовка
- Технология обогащения
- Обогащительные процессы
- Вторичного сырья
- Проектирование
- Автоматизированные Теория процессов
- Технологическая минералогия
- Методы анализа в процессах обогащения
- Оборудование
- Природоохранная техника и технология
- Комплексное использование сырья
- Переработка системы управления
- Из опыта предприятия
- Зарубежный опыт
- Хроника



«Руда и Металлы»
Издательский дом

EURASIAN MINING



Издается с 2003 г.
Объем до 88 стр. Тираж до 500 экз.
Периодичность выпуска — 2 раза в год
ISSN 2072-0823

EURASIAN MINING

«Eurasian Mining» — англоязычный научно-технический и производственный журнал, посвященный проблемам горной промышленности России и стран СНГ.

Официальный информационный орган Федерального УМО «Прикладная геология, горное дело, нефтегазовое дело и геодезия»

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Воробьев
Сергей Александрович
кандидат технических наук

УЧРЕДИТЕЛИ:

АО «Издательский дом «Руда и Металлы»

ТЕМАТИЧЕСКИЕ РАЗДЕЛЫ ЖУРНАЛА

Наука и промышленность
Международное сотрудничество
Теория и практика производства
Физика и механика горных пород
Проектирование и строительство предприятий
Экономика и организация производства
Переработка полезных ископаемых
Комплексное освоение недр
Оборудование и материалы
Энергомеханическое хозяйство
Автоматизация
Охрана и безопасность труда
Охрана окружающей среды
Подготовка кадров
Обмен опытом, краткие сообщения
За рубежом
Культура
История горного дела



«Руда и Металлы»
Издательский дом

ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ



Издается с 1926 г.

Объем до 96 полос, тираж до 1500 экз.

ISSN 0372-2929

Место в рейтинге SCIENCE INDEX за 2017 год по тематике «Металлургия» — 7

ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ

«Цветные металлы» — главный российский ежемесячный журнал, посвященный комплексу проблем цветной металлургии.

Официальный информационный орган Федерального УМО «Технологии материалов».



ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

Король

Юрий Александрович

*вице-президент Русской
медной компании*

ТЕМАТИЧЕСКИЕ РАЗДЕЛЫ ЖУРНАЛА:

- Экономика и управление производством
- Обогащение
- Тяжелые цветные металлы
- Благородные металлы и их сплавы
- Легкие металлы, углеродные материалы
- Редкие металлы, полупроводники
- Радиоактивные элементы
- Композиционные материалы и многофункциональные покрытия
- Наноструктурированные металлы и материалы
- Материаловедение
- Металлообработка
- Автоматизация
- Хроника.

УЧРЕДИТЕЛИ:

АО «Издательский дом «Руда и Металлы», ФГАОУ

ВПО НИТУ «МИСиС»

Журнал выпускается при участии:

ПАО «ГМК «Норильский никель»,

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский

Томский политехнический университет», ФГАОУ ВО

НИЯУ «МИФИ»,

ФГБУК «Государственный Эрмитаж»

При содействии:

ГП «Навоийский горно-металлургический

комбинат», Научно-технического союза по горному

делу, геологии и металлургии (Республика Болгария)



ЧЕРНЫЕ МЕТАЛЛЫ



Издается с 1961 г.

Объем до 80 полос, тираж до 1500 экз.

ISSN 0132-0890

Место в рейтинге SCIENCE INDEX за 2017 год по тематике «Металлургия» — 21

stahl eisen металлы

«Черные металлы» — единственный в России ежемесячный российско-немецкий металлургический журнал, издаваемый в сотрудничестве с немецким изданием «Stahl und Eisen». Журнал публикует материалы по всему спектру проблем зарубежной и национальной черной металлургии. **Официальный информационный орган Федерального УМО «Технологии материалов».**

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:



Колокольников
Валерий Михайлович
профессор, доктор
технических наук

ТЕМАТИЧЕСКИЕ РАЗДЕЛЫ ЖУРНАЛА:

- Новости металлургии по странам и регионам
- Что обсуждают металлурги?
- Научно-исследовательские и проектные разработки
- Строительство и развитие металлургических предприятий
- Производство чугуна и стали
- Непрерывная разливка
- Производство проката
- Термическая обработка и нанесение покрытий
- Энергетика и экология
- Контроль, организация и управление производством
- Металлургия и автомобилестроение
- Сталь как материал
- Экономика и финансы
- Подготовка и обучение специалистов
- Производство стали по странам и регионам
- Новости науки и техники за рубежом
- Из истории металлургии

УЧРЕДИТЕЛИ:

АО «Издательский дом «Руда и Металлы»,
ФГАОУ ВПО НИТУ «МИСиС»,
ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г. И. Носова»

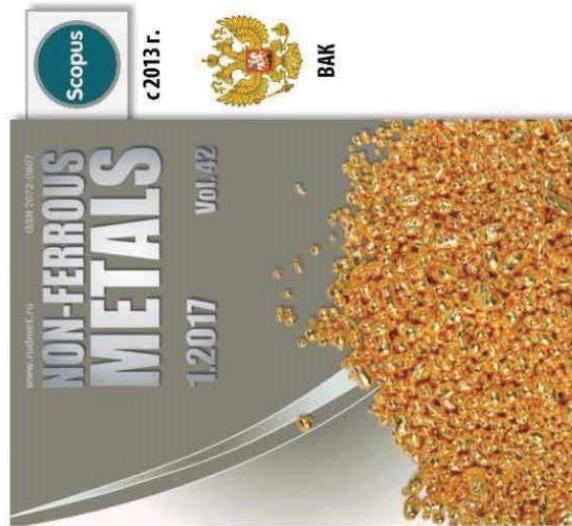
При участии:

ФГБУК «Государственный Эрмитаж»,
ОАО «Белорусский металлургический завод» -
управляющая компания холдинга «Белорусская
металлургическая компания»



«Руда и Металлы»
Издательский дом

NON-FERROUS METALS



Издается с 2001 г.
Объем до 80 стр., тираж до 500 экз. ISSN 2072-0807

NON-FERROUS METALS

«Non-ferrous Metals» — англоязычный научно-технический и производственный журнал, посвященный проблемам цветной металлургии России и стран СНГ.

Официальный информационный орган Федерального УМО «Технологии материалов».

ТЕМАТИЧЕСКИЕ РАЗДЕЛЫ ЖУРНАЛА:

- Экономика цветной металлургии
- Обогащение
- Тяжелые цветные металлы
- Благородные металлы и сплавы
- Легкие металлы, углеродные материалы
- Радиоактивные элементы
- Редкие металлы, полупроводники
- Композиционные материалы и многофункциональные покрытия
- Наноструктурированные металлы и материалы
- Материаловедение
- Металлообработка
- Автоматизация

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

Воробьев

Александр Григорьевич
*профессор, доктор
экономических наук*



УЧРЕДИТЕЛИ:

АО «Издательский дом «Руда и Металлы»

«CIS Iron & Steel Review» — англоязычный научно-технический и производственный журнал, посвященный проблемам черной металлургии России и стран СНГ.
Официальный информационный орган Федерального УМО «Технологии материалов».



Издается с 2006 г.
Объем до 100 стр., тираж до 1000 экз.
ISSN 2072-0815



ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

ЦИРУЛЬНИКОВ
Евгений Владимирович

УЧРЕДИТЕЛИ:

АО «Издательский дом
«Руда и Металлы»

ТЕМАТИЧЕСКИЕ РАЗДЕЛЫ ЖУРНАЛА:

- Новости металлургии по странам и регионам
- Что обсуждают зарубежные металлурги?
- Новейшие металлургические технологии
- Производство чугуна и стали
- Литейное производство
- Прокатное производство
- Нанесение покрытий и поверхностная обработка
- Термическая обработка
- Энергетика и экология
- Металловедение и химический анализ
- Металлургия и автомобилестроение
- Экономика и финансы
- Производство стали по странам и регионам
- Перспективы фирм
- Из истории металлургии
- Металлургия и искусство



«Руда и Металлы» Издательский дом

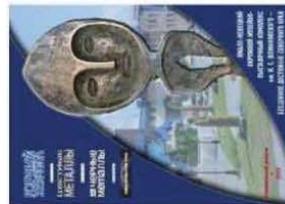
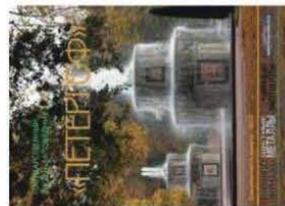
Музейные выпуски

Начиная с 2004 г. в рамках "музейного" проекта Издательский дом "Руда и Металлы" выпустил 13 журналов, рассказывающих об экспозициях крупных центральных и региональных, технических и художественных музеев под "горно-металлургическим углом зрения". В числе этих музеев – Эрмитаж и Петергоф, Исторический и Политехнический музеи, Музей искусства народов Востока и Дарвиновский музей, а также музеи в Норильске, Кировске (Мурманской области), Салехарде и Новгороде.

2015



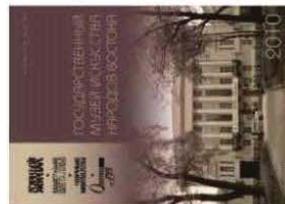
2013



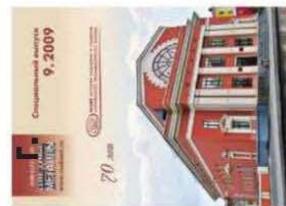
2012



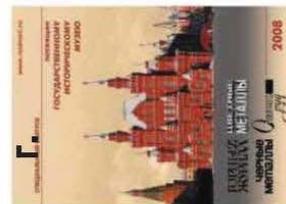
2010



2009



2008



2007 г.



2004 г.





Издательский дом «Руда и Металлы» выпускает книжную продукцию широкого спектра: от научно-технической и экономической до художественной литературы, связанной с горно-металлургической промышленностью.



**АГЕНТСКОЕ
РАСПРОСТРАНЕНИЕ
КНИГ:**

МИСИС



	Показатель SiteScore (соотношение цитирования в текущем году к общему количеству публикаций 3 предыдущих лет – эти показатели приведены в скобках)				Индекс Хирша, h	Импакт-фактор SJR- Scimago (учет тематики и авторитетности ссылающихся изданий)	Квартиль SJR	Показатель SNIP (фактическое / ожидаемое цитирование)
	2014	2015	2016	2017				
Горный журнал	0,06 (18/290)	0,06 (34/562)	0,19 (147/783)	0,39 (281/717)	7	0,304	Q3 (76 место)	0,681
Обогащение руд	0,06 (4/63)	0,18 (23/126)	0,37 (70/187)	0,55 (103/186)	5	0,466	Q2 (19 место)	0,825
Цветные металлы	0,13 (27/213)	0,12 (48/410)	0,16 (97/605)	0,32 (176/554)	7	0,309	Q2 (73 место)	0,642
Черные металлы	-	-	-	0,06 (9/145)	2	0,129	Q4 (259 место)	0,316



«Руда и Металлы»
Издательский дом

Офис Издательского дома
«Руда и Металлы»:
Москва, Ленинский проспект, д.б.,
стр. 2, офис 622

Администрация: (495)638-45-18,
rim@rudmet.ru

Горный журнал: (499) 230-27-48
gomjournal@rudmet.ru

Обогащение руд: (812) 324-89-45
obrud@mekhanobr.spb.ru

Цветные металлы: (495)955-01-75
svetmet@rudmet.ru

Черные металлы: (495) 955-01-75

БЛАГОДАРИМ ВАС ЗА ВНИМАНИЕ



СЕКЦИЯ

«ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ»

**ОЦЕНКА ТРУДОЕМКОСТИ ДЕТАЛИ НА ЭТАПЕ
КОНСТРУКТОРСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

**EVALUATE OF THE MANUFACTURABILITY PARAMETER
AT EARLY DESIGN STAGE**

АБРАЖЕНИН А.А. (ТулГУ, Тула, Россия),
ТРУШИН Н.Н. (ТулГУ, Тула, Россия)

ABRAZHENIN A.A. (TSU, Tula, Russian Federation),
TRUSHIN N.N. (TSU, Tula, Russian Federation)

***Аннотация.** Рассмотрена задача определения технологичности детали на ранних этапах конструкторского проектирования на основе количественной оценки технологичности изготовления с помощью анализа модели проектного решения.*

***Annotation.** As the title implies the paper describes the problem of evaluate of the manufacturability parameter at early design stage. The qualitative evaluation of the labor intensity based on analyzing the information contained in the extended design decision model is proposed.*

***Ключевые слова:** модель проектного решения, технологичность, проектная трудоемкость, токарная обработка, конструкторское проектирование.*

***Key words:** design decision model; manufacturability; labor intensity; turning; design.*

Технологичность конструкции является одним из базовых научных понятий технологии машиностроения и служит основой обеспечения использования конструкторско-технологических резервов подготовки производства для решения задач, связанных с повышением технико-экономических показателей изготовления изделий [6, 13]. Кроме того, в период быстро развивающихся технологий, спроса и предложения на различную продукцию, главным являются: минимизация временных затрат на изготовление, рациональное управление производственными процессами.

Сложность оценки технологичности во многом связана с субъективностью оценки, зависящей от опыта и знаний отдельных конструкторов и технологов, что не учитывает существенно расширяющиеся возможности современных производственных систем и не позволяет обеспечить высокую эффективность их эксплуатации. Для поддержания успешной деятельности предприятия необходимо обеспечить его на всем протяжении жизненного цикла изделия проектной документацией высокого качества и в минимально возможные сроки. Качественная проработка технических решений на этапе разработки конструкторско-технологической документации существенно влияет на

снижение затрат в процессе производства из-за конструкторских и технологических ошибок [1, 2].

Задача заключается в повышении качества конструкторских проектных решений на основе оперативной оценки их параметров непосредственно в ходе проектирования и создания обратной связи, позволяющей конструктору принимать оптимальные решения. В качестве основного параметра качества рассматривается технологичность изготовления.

Процесс обеспечения технологичности изделия, отражающий связь между конструктивными особенностями изделия и уровнем затрат при его производстве, является противоречивым и не имеет полного описания его проведения [3].

Основной тенденцией развития современных систем автоматизированного проектирования является повышение информационного насыщения моделей проектного решения добавлением к геометрическому представлению изделия дополнительной информации – сведений о качестве поверхности, размерной точности, свойствах материалов и пр. Наличие такой информации позволяет решить ряд задач. Во-первых, уйти от идеализированной «абсолютно точной» геометрической модели и учитывать реально существующий разброс размеров и отклонения формы. Во-вторых, значительно уменьшить потребность в оформлении чертежей, так как модель проектного решения уже содержит всю информацию, необходимую для выполнения последующих этапов подготовки производства [7, 12].

Обеспечение технологичности конструкции изделия на этапе проектирования является важной задачей конструктора. Если соответствие проекта машины заданному функциональному назначению легко оценить объективными численными показателями, то такое сложное и многофакторное понятие, как «технологичность», весьма затруднительно оценить количественно [11]. Отсутствие общепринятых методик численной оценки технологичности не позволяет объективно разрешать неизбежные конфликты профессиональных интересов между конструктором как поставщиком конструкторской документации и технологом как ее потребителем.

Согласно ГОСТ 14.201–83 Обеспечение технологичности конструкции изделий, основными показателями технологичности детали являются трудоемкость, себестоимость и унификация. Так как трудоемкость имеет прямое денежное выражение, она обычно включается в себестоимость [14].

Очевидно, что наиболее значимым параметром технологической сложности детали является трудоёмкость её изготовления (ГОСТ 14.201–83). Проведённые исследования в работах [7, 9, 10] показали, что наличие модели проектного решения позволяет уже на стадии конструкторского проектирования выполнить анализ трудоёмкости изготовления предлагаемой конструкции детали, что позволяет конструктору иметь обратную связь по этому важнейшему параметру качества проектного решения.

Рассмотрим определение трудоемкости на примере детали «Крышка». Геометрические размеры и требования по качеству поверхности указаны на рисунке 1.

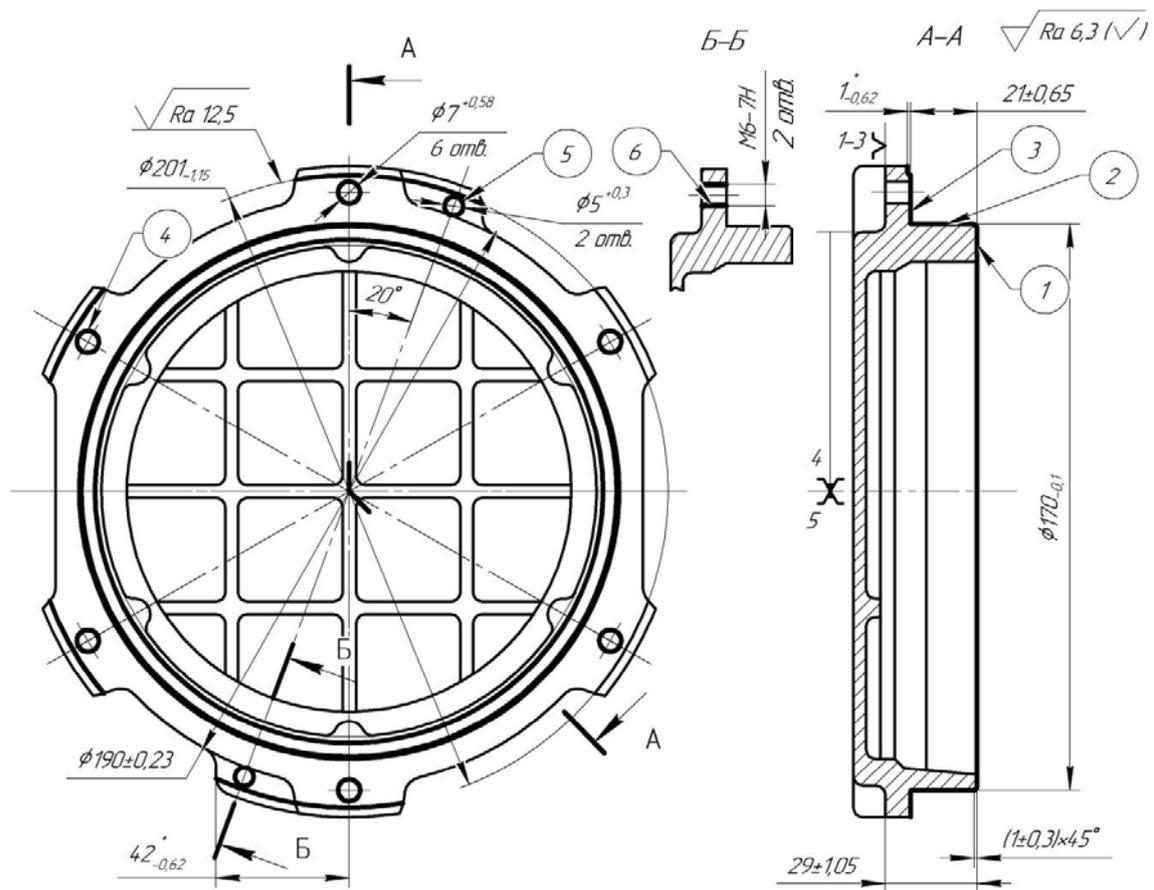


Рисунок 1. Геометрические размеры детали «Крышка»

Дадим оценку операционного времени механической обработки детали. Приведённый пример ориентирован на токарную обработку.

Согласно методу регрессионного анализа, корреляционную связь [15] между выходным параметром проектной трудоёмкости и входными параметрами конструкторской модели (масса изделия, шероховатость, допуск и площадь обрабатываемой поверхности) можно представить в виде уравнения множественной регрессии [5]:

$$T = f \left(M, \sum_{i=1}^n F(S_i, Ra_i, t_i) \right) \cdot k_{mat} \quad (1)$$

где M – масса детали; S_i – площадь обрабатываемой i -ой поверхности; Ra_i – требуемая шероховатость i -ой поверхности; t_i – допуск (калитет точности) i -ой поверхности; k_{mat} – коэффициент, учитывающий обрабатываемость материала; n – число поверхностей модели (конструктивных элементов).

После решения уравнения (1) методом регрессионного анализа можно представить трудоёмкость T в следующем виде:

$$K = a_0 \cdot S^{x_1} \cdot Ra^{x_2} \cdot t^{x_3} \quad (2)$$

$$T = b_0 \cdot M^{y_1} \cdot K^{y_2} \quad (3)$$

где a_0 , b_0 , x_1 , x_2 , x_3 , y_1 , y_2 – коэффициенты уравнения регрессии, которые определяются экспериментально.

Выполнив необходимые преобразования, полученные выше уравнения (2) и (3) можно представить в виде уравнений регрессии для конструктивных элементов T_i , для токарной обработки (таблица 1).

Таблица 1

Уравнения регрессии для определения трудоемкости токарной обработки основных конструктивных элементов

Конструктивный элемент		Уравнение регрессии
1	Плоскость	$T = 10^{3,07} \cdot S^{-0,6} \cdot Ra^{-0,25} \cdot t^{-1,07}$
2	Цилиндрическая поверхность	$T = 10^{3,03} \cdot S^{-0,68} \cdot Ra^{-0,34} \cdot t^{-0,72}$
3	Фаска	$T = 10^3 \cdot S^{-0,77} \cdot Ra^{-0,31} \cdot t^{-0,14}$
4	Отверстие сквозное	$T = 10^{3,03} \cdot S^{-0,68} \cdot Ra^{-0,34} \cdot t^{-0,72}$
5	Скругление	$T = 10^{3,03} \cdot S^{-0,68} \cdot Ra^{-0,34} \cdot t^{-1,07}$
6	Резьба	$T = 10^{3,03} \cdot S^{-0,68} \cdot Ra^{-0,34} \cdot t^{-0,72}$

Таким образом, с помощью приведенных формул в таблице 1, можно рассчитать общую трудоемкость обработки детали, по известным параметрам обработки.

$$Y = \sum_{i=1}^n T_i \quad (5)$$

$$T_{\partial} = 10^{-1,27} \cdot M^{-0,46} \cdot Y^{2,36} \cdot k_{mat} \quad (6)$$

где Y – суммарная трудоемкость изготовления отдельных конструктивных элементов, мин; T_{∂} – общая трудоемкость изготовления детали, мин.

Далее проведем анализ поверхностей и параметров обработки. Для этого проектную модель детали «Крышка» необходимо разбить на элементарные поверхности и конструктивные элементы, подлежащие механической обработке.

Сведем результаты анализа поверхностей в таблицу 2. Обработка поверхностей ведется по 7...15-му качеству, в зависимости от поверхности. Материал детали: АК12 (АЛ2) ГОСТ 1583–93. Масса детали и коэффициент обрабатываемости соответственно равны $M = 0,85$ кг и $k_{mat} = 0,5$.

Таблица 2

Характеристики конструктивных элементов детали

№	Тип поверхности	Площадь, $мм^2$	Параметр Ra	Квалитет	Трудоемкость T_i , мин
1	Плоскость	2590,5	6,3	9	0,63
2	Цилиндрическая	9231,6	6,3	16	0,16
3	Плоскость	9028,3	12,5	14	0,16
4	Отв. сквозное	1055,04	6,3	15	0,72
5	Отв. сквозное	251,2	6,3	14	2,00
6	Резьба	301,4	6,3	7	2,91

По таблице 2 определяем значение суммарной трудоемкости обработки конструктивных элементов Y по формуле (5).

$$Y = \sum_{i=1}^n T_i = 0,63 + 0,16 + 0,16 + 0,72 + 2,0 + 2,91 = 6,58 \text{ мин.}$$

Тогда общая трудоемкость обработки детали T_{∂} определится по формуле (6):

$$T_{\partial} = 10^{-1,27} \cdot 0,85^{-0,46} \cdot 6,57^{2,36} \cdot 0,5 = 2,46 \text{ мин}$$

Проектная трудоемкость, подсчитанная по таблицам норм времени [8] составляет 2,82 мин. Таким образом, расхождение результатов составило 12,8%, что является допустимым отклонением при расчете проектной трудоемкости, согласно работам [4], и не превышает значения в $\pm 15\%$. Из этого следует, что результат исследований демонстрируют адекватность и пригодность рассматриваемой методики для определения проектной трудоемкости токарной механической обработки резанием для всех типов производств, за исключением массового.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абраженин, А.А. Автоматизированная оценка конструктивной сложности электронной модели детали машиностроительного изделия / А.А. Абраженин, А.В. Лобанов // Вестник Тульского государственного университета. Автоматизация: проблемы, идеи, решения: Сб. научных трудов Междунар. заочной научно-техн. конф. «АПИР-22», 9-10 Ноября 2017 года; под ред. В.В. Прейса, Д.А. Провоторова. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. С. 187-190.
2. Абраженин, А.А. Поиск области разрешения конфликтов, интересов конструкторов и технологов при конструкторско-технологической подготовке производства / А.А. Абраженин, А.В. Лобанов // Молодежный вестник Политехнического института: Сб. статей. В 2-х частях. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. Ч. 1. с. 130-134.
3. Аверченков В.И. Формализация построения и выбора прогрессивных технологий, обеспечивающих требуемое качество изделий: Авто-реф. дис ... д-ра. техн. наук: 05.02.08. - Брянск, 1990.
4. Аверченков, В.И. Автоматизация проектирования технологических процессов : учеб. пособие для вузов / В. И. Аверченков, Ю. М. Казаков. – М. : ФЛИНТА, 2011. – 229 с.
5. Иноземцев, А.Н. Троицкий, Д.И. Прогнозирование параметров качества конструкторского проектного решения // Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. №12 ч.1. с. 178-186.
6. Ковешников В.А., Трушин Н.Н. Оценка трудоёмкости обработки деталей на металлорежущих станках // Автоматизация и современные технологии, 2003, №10. С.36-40.
7. Новикова, Н.В. Оценка уровня технологичности машиностроительной детали на ранних этапах подготовки производства 05.02.08: дис. ... канд. техн. наук / Н.В. Новикова. – Тула, 2006. – 127 с.
8. Общемашиностроительные нормативы времени и режимов резания для нормирования работ, выполняемых на универсальных и многоцелевых станках с числовым программным управлением. М.: Экономика, 1990. 472с.
9. Попов А.М. моделирование сборочной технологичности конструкции изделий в интегрированных САПР / А.М. Попов // Вестник ДГТУ №1(62), вып. 1, 2012. С 99-108.
10. Попов М.Е. Методы автоматизированного совершенствования технологичности конструкций изделий в интегрированных САПР / М.Е. Попов, А.М. Попов // Вестник машиностроения №10, 2003. С. 48-53.
11. Современная концепция проектирования технологии обработки резанием: учеб. пособие / Маликов А.А. [и д.р.]. – Тула. Изд-вр Иуо. гос. ун-та, 2012. – 318 с.

12. Троицкий, Д. И. Оценка конструктивной сложности детали по 3D-модели / Д. И. Троицкий, А. А. Еремин // Вестник Тульского государственного университета. Автоматизация : проблемы, идеи, решения : материалы Междунар. науч.-техн. конф. "АПИР -16", 9-12 ноября 2011 г. : в 2 ч. Ч. 1 / изд-во ТулГУ ; под ред. В. В. Прейса, Д. А. Провоторова . Тула, 2011. С. 216-219. Библиогр.: с. 219 (2 назв.).
13. Трушин, Н.Н. Организационно-технологическая структура производственного процесса на машиностроительном предприятии: монография / Н.Н. Трушин. - Тул. гос. ун-т. – Тула, 2003. – 230 с.
14. Французова, Ю.В. Комплексная оценка технологичности деталей типа "тела вращения" // Известия ТулГУ. Технические науки. 2015. №9. С. 266-271.
15. Дрейпер, Н. Прикладной регрессионный анализ / Н. Дрейпер, Г. Смит; пер. с англ. Ю. П. Адлера, В. Г. Горского - 2-е изд., перераб. и доп. М.: Финансы и статистика, 1986. 366 с.

АВТОРЫ

Абраженин Александр Александрович, аспирант ТулГУ, Тула, Россия.

Трушин Николай Николаевич, д-р техн. наук, профессор ТулГУ, Тула, Россия.

THE AUTHORS

Abrazhenin Alexander Alexandrovich, graduate student of the TSU, Tula, Russia.

Trushin Nikolay Nikolayevich, Dr. Tech. Sciences, Professor TSU, Tula, Russia.

**ЛАЗЕРНОЕ УПРОЧНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ ДЛЯ
СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА КРЕПЕЖНЫХ ИЗДЕЛИЙ**

**LASER HARDENING OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT FOR SERIAL
PRODUCTION OF FASTENERS**

БРАТУХИН А.В. (ПАО «Нормаль», Н. Новгород, РФ),
ГАВРИЛОВ Г.Н. (НГТУ им. Р.Е. Алексеева, Н. Новгород, РФ)

BRATUKHIN A.V. (PJSC «Normal», N. Novgorod, Russia),
GAVRILOV G.N. (NNSTU, N. Novgorod, Russia)

Аннотация. Работа посвящена исследованиям износостойкости инструментальных сталей после лазерной термической обработки. Приведены режимы лазерной термической обработки и результаты испытаний исследуемых материалов. Выявлены закономерности повышения износостойкости технологической оснастки.

Abstract . The paper is devoted to the study of the wear resistance of tool steel after laser heat treatment. The modes of laser heat treatment and the test results of the studied materials are presented. The regularities of increase of wear resistance of technological equipment are revealed

Ключевые слова: Лазерная термическая обработка, износостойкость, крепеж, оснастка, микротвердость.

Keywords: Laser heat treatment, wear resistance, fasteners, tooling, microhardness.

В авиационной технике XXI века, несмотря на постоянно увеличивающийся объем интегральных конструкций из полимерных композиционных материалов, сварных конструкций, основным видом соединений остаются соединения на основе крепежных изделий.

Так, в конструкции Российского конкурентоспособного гражданского самолета SSJ-100, созданного в Авиационной Компании «Сухой», используются крепежные системы для крепления деталей обшивки, внутреннего набора и каркаса планера, крыльев, оперения, для декоративного оформления салона [7].

При производстве крепежа основой технологических процессов до недавнего времени оставалась горячая высадка, резание. В объединении «Нормаль» впервые в мировой практике разработан и внедрен в серийное производство принципиально новый способ изготовления высокоресурсных деформационно-упрочненных крепежных деталей массового применения для летательных аппаратов различного назначения.

Большая номенклатура крепежных систем включает:

- деформационно-упрочняемые крепежные детали из титанового сплава BT-16;
- болт-защелки из алюминиевых сплавов, коррозионноустойчивых сталей, титановых сплавов;
- защелки с сердечником из алюминиевых сплавов, коррозионноустойчивых сталей, титановых сплавов;
- крепежные изделия для выполнения неразъемных соединений в конструкциях из металлических и полимерных композиционных материалов безударным методом, в т.ч. при одностороннем доступе к соединяемым деталям;
- крепежные системы с тарированной затяжкой (аналог применяемого крепежа типа Hi-Lock) и др.

Одним из наиболее трудоемких этапов организации производства деталей крепежных систем является технологическая подготовка производства. Освоение процессов пластического деформирования титановых сплавов, высокопрочных коррозионноустойчивых сталей, жаропрочных никелевых сплавов связано, прежде всего, с преодолением технологических трудностей, вызванных их высокими прочностными характеристиками, ограниченной пластичностью, значительной адгезионной способностью, приводящей к схватыванию металла изделия и инструмента, образованию задиrow, повышенному износу технологической оснастки (матрицы, пуансоны и т.п.) [6,11]

Проводимое в нашей стране техническое перевооружение промышленного производства возможно лишь при условии внедрения новых технологических процессов. Одно из ведущих мест среди новых быстроразвивающихся технологических процессов занимают лазерные технологии.

Лазерное термическое упрочнение заключается в быстром нагреве локального участка поверхности под воздействием излучения и последующем охлаждении этого поверхностного участка со сверхкритической скоростью после прекращения воздействия излучения за счет теплоотвода в окружающий металл.

Характерной особенностью лазерной закалки является высокоскоростной нагрев и, вследствие этого, сдвиг критической точки A_{c1} , определяющей нижнюю границу упрочненной зоны, в область высоких температур [10,12].

В высоколегированных сталях типа X12, P6M5, P18 и других диффузионная подвижность углерода понижена. В связи с этим при недостаточной энергии лазерного излучения может не произойти полностью гомогенизация аустенита, и в результате закалки образуется низкоуглеродистый мартенсит и остаточный аустенит. При большой энергии лазерного излучения возможно пересыщение аустенита углеродом вследствие растворения карбидов, и в результате закалки образуется большое количество остаточного аустенита. Поэтому лазерную обработку высоколегированных сталей следует выполнять в узком интервале режимов, обеспечивающих в результате закалки достаточное количество углерода в мартенсите при отсутствии растворения карбидов и пересыщения аустенита углеродом. Причем для каждой марки высоколегированных сталей имеется свой оптимальный

диапазон режимов лазерной обработки, определяемый экспериментально и обеспечивающий эффект заковки [5,8].

Спектр оборудования, используемого для лазерной обработки материалов, чрезвычайно широк. Большинство производителей поставляют на рынок не отдельные технологические лазеры, а лазерные технологические комплексы, в которых имеются устройства внешней оптики, управляемые столы, манипуляторы, роботы для перемещения изделия во время обработки, а также программное обеспечение, необходимое для реализации конкретной технологии.

Среди лазерных источников, используемых для обработки материалов, наиболее широкое распространение получили высокоомощные CO₂-лазеры.

С целью увеличения износостойкости холодновысадочного инструмента проводились исследования на инструментальной быстрорежущей стали Р6М5[9]. Обработывалась рабочая часть накатных роликов для накатывания резьбы крепежных изделий. Лазерная обработка проводилась на технологическом газовом CO₂-лазере с длиной волны излучения 10,6 мкм с точностью измерения мощности излучения лазера ± 10 Вт. Варьировались такие технологические параметры лазерного излучения, как мощность и скорость перемещения сфокусированного лазерного луча.

Структурные и фазовые превращения, происходящие в сталях под воздействием лазерного излучения, определяются с одной стороны, энергетическими параметрами излучения, с другой стороны, характеристиками и свойствами обрабатываемого материала. Для разработки технологии лазерного упрочнения необходимы данные, позволяющие выяснить закономерности изменений в облученном материале при воздействии на них излучения с различной мощностью, диаметром пятна излучения и скоростью перемещения [2].

В связи с этим представляет интерес оценить влияние этих параметров излучения, а также химического состава обрабатываемых сталей на распределение микротвердости, изменение структуры в зоне термического влияния, и на этой основе определить область значений мощности, диаметра пятна излучения, скорости перемещения изделия, при которых наблюдается гарантированное упрочнение [13,14].

После лазерной обработки проводились металлографические исследования на шлифах, которые изготавливались на образцах с последующим травлением для выявления зонального строения микроструктуры после лазерной термообработки. Измерение микротвердости проводилось на микротвердомере ПМТЗ, фотографирование и оценка микроструктуры проводилось на оптическом микроскопе KEVENCE-1000.

После проведения лазерной обработки на поверхности стали Р6М5 образуется упрочненная зона. Глубже упрочненного слоя формируется переходная зона и далее расположен основной металл [4].

Исследования микроструктуры и микротвердости стали Р6М5 в состоянии после заковки и отпуска дали следующие результаты: структура зоны упрочнения представляет собой мартенсит и карбиды, то есть практически такую же, как и после обычной объемной заковки. Однако после лазерной

обработки дисперсность мартенсита выше, чем после объемной термической обработки. От основного металла, зону упрочнения отделяет узкая переходная зона. Повышенная травимость переходной зоны обусловлена диффузионным концентрационным расслоением микроструктуры, с повышением карбидообразующих элементов в приграничных областях зерен [3].

Повышение микротвердости упрочненного слоя, по сравнению с основой, объясняется тем, что дисперсность мартенсита выше; вследствие обработки лазером повышаются микронапряжения; структура мартенсита неоднородна.

Исследования показали, что микротвердость и глубина упрочненного слоя зависит от энергетических параметров (таблица 1).

Для инструментальных сталей лазерную закалку следует проводить в узком интервале режимов обработки, обеспечивающих образование мартенсита с достаточным количеством углерода, когда растворение карбидов находится на начальной стадии, и как следствие – высокая микротвердость. Рассмотренные условия могут быть обеспечены при лазерной закалке без оплавления либо с минимальным оплавлением поверхности.

Таблица 1.

№ режима	Диаметр пятна, мм	Скорость обработки, мм/с	Мощность излучения, Вт	Максимальная микротвердость, МПа	Глубина упрочненного слоя, мм
1	3	6	300	7832	0,43
2	3	8	300	7516	0,4
3	3	12	300	6209	0,2
4	3	6	600	9356	0,6
5	3	8	600	9094	0,5
6	3	12	600	6315	0,2
7	3	6	800	6645	0,52
8	3	8	800	6435	0,45
9	3	12	800	5379	0,25
10	3	6	900	5676	0,4
11	3	8	900	5381	0,35
12	3	12	900	4640	0,15

Приведенные результаты показывают, что оптимальный режим лазерной обработки для стали Р6М5, обеспечивающий достижение максимального упрочненного слоя, состоит:

- мощность излучения – $P=600$ Вт;
- скорость обработки – $V=6$ мм/с;
- диаметр пятна - $d_n=3$ мм.

В качестве демонстрации возможности применения лазерной обработки для повышения эксплуатационных характеристик и ресурса промышленных изделий производили обработку опытных партий роликов для накатывания резьбы из стали Р6М5 по режиму лазерной обработки, указанному выше, коэффициент перекрытия лазерных дорожек составлял 10-15% [15].

В ходе исследований сравнивалась стойкость роликов после обычной термической обработки и после лазерной обработки по заявленному режиму. В качестве критерия, определяющего ресурс работы инструмента, использовали максимально возможное число кондиционных изготовленных серийных деталей, до выхода из строя ролика.

На первом этапе исследовалась зависимость стойкости роликов от диаметра резьбы накатываемых болтов (шифр изделия ОСТ1 31504-80). Данные приведены в таблице 2.

Таблица 2

Диаметр резьбы гаек, мм	Условия обработки роликов	
	Объемная термообраб., тыс. шт.	Лазерная обработка, тыс. шт.
М4	45,2	58,2
М6	33,4	37,4
М8	31,0	35,6

На втором этапе исследовалась зависимость стойкости роликов от вида материалов, из которого были изготовлены изделия. Исходный материал имел следующие прочностные характеристики: титановый сплав ВТ16 - $\sigma_{\text{в}}=810-930$ МПа, титановый сплав ВТ1-00 - $\sigma_{\text{в}}=290-480$ МПа, сталь 14Х17Н2 – $\sigma_{\text{в}}=720-740$ МПа. Данные приведены в таблице 3.

Таблица 3

Материал	Условия обработки роликов	
	Объемная термообраб., тыс. шт.	Лазерная обработка, тыс. шт.
ВТ16	33,1	41,1
ВТ1-00	54,4	61,2
14Х17Н2	38,0	47,5

На третьем этапе производилось исследование зависимости стойкости роликов от степени конечной деформации металла при изготовлении болтов из стали 20Г2Р с пределом прочности 550-600 МПа. Данные приведены в таблице 4.

Таблица 4

Изделие(степень деформации, в %)	Условия обработки роликов	
	Объемная термообраб., тыс. шт.	Лазерная обработка, тыс. шт.
704.00.1293 (52)	39,2	46,1
704.00.1715 (57)	35,9	41,2
704.00.904 (63)	33,4	39,5

Из приведенных данных следует, что использование предлагаемого способа лазерной позволяет, по сравнению с обычной объемной термообработкой, повысить стойкость накатных роликов до 28%.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.Г. Петриков, А.П. Власов. Прогрессивные крепежные изделия. – М.: Машиностроение, 1991. – 256 с.
2. Андрияхин, В.М. Процессы лазерной сварки и термообработки / В.М. Андрияхин-М.: Наука, 1988. - 176с.
3. Григорьянц, А.Г. Основы лазерной обработки материалов / А.Г. Григорьянц. - М.: Машиностроение, 1989. - 304с.
4. Г.Н. Гаврилов, А.В. Братухин. Значимость лазерного упрочнения конструкционных и инструментальных сталей при создании высокоэффективных изделий машиностроения. Журнал «Наука и технологии в промышленности» №4, 2012 г.
5. Теоретическое исследование кинетики аустенитизации в сталях при нагреве непрерывным лазерным излучением [Текст] / Е.И. Ким, А.Г. Григорьянц, А.Н. Сафонов и др. // Инженерно-физический журнал. - 1987. - Т.52, №3. - С. 444-492.
6. Арзамасов, Б.Н. Материаловедение: учебник для вузов [Текст] / Б.Н. Арзамасов, В.И. Макарова – М.: Изд – во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2002.– 648 с.
7. Братухин, А.Г. Современные авиационные материалы: технологические и функциональные особенности: учебное пособие для авиационных и технических направлений и специальностей / А.Г. Братухин – М.: АвиаТехИнформ XXI век, 2001. – 420 с.
8. С.А. Котречко // Металловедение и термическая обработка металлов. - 2006. - № 9. - С. 28-34.
9. Банных, О.А. Машиностроение: энциклопедия Т.2. Стали, чугуны / О.А. Банных. М.: Машиностроение, 2000. – 780 с.
10. Головин, Г.Ф. Высокочастотная термическая обработка: Вопросы металловедения и технологии. - 3-е изд., перераб. и доп / Г.Ф. Головин, М.М. Замятнин. – Л.: Машиностроение, 1990. – 239 с.
11. Крылова, С.Е. Условия формирования структуры экономнолегированных сталей, предназначенных для работы при повышенном износе / С.Е. Крылова, В.И. Грызунов // Металловедение и термическая обработка металлов. - 2011. - № 5. - С. 38-46.
12. Лахтин, Ю.М. Поверхностное легирование металлов и сплавов при лазерном нагреве / Ю.М. Лахтин. –М.: Машиностроение, 1990. - 54 с.
13. Колесов, Н.С. Материаловедение технология конструкционных материалов: учеб. для вузов / Н.С. Колесов, И.С. Колесов. - 2-е изд, перераб. – М.: Высш. Шк., 2007. – 535с.
14. Скуднов, В.А. Синергетика явлений и процессов в металловедении, упрочняющих технологиях и разрушении: учеб. пособие / В.А. Скуднов; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Н. Новгород, 2011. – 198 с.
15. Коваленко В.С, Головки Л.Ф., Меркулов Г.В., Стрижак А.И. Упрочнение деталей лучом лазера. - Киев : Техника, 1981. - 131 с

АВТОРЫ

Братухин Анатолий Владиславович, ПАО «Нормаль» Начальник Управления Качеством, г.Нижний Новгород, normal-nn@mail.ru, +79103901027.

Гаврилов Геннадий Николаевич, профессор кафедры МТМ и ТОМ ФГБОУ ВО НГТУ им. Р.Е.Алексеева, д.т.н., г. Нижний Новгород, gavrilov1109@mail.ru, +79036577981.

THE AUTHORS

Anatoly Bratukhin, PJSC «Normal», 74, Litvinovastreet, NizhnyNovgorod, 603950, Russian Federation

Gennady Gavrilov, R.Y. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, 24 Minina Street, Nizhny Novgorod 603950, Russian Federation

МЕХАНИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ

ELECTRO-DEFORMATION HARDENING MECHANIZATION

БУГЛАЕВ А.М.

(Россия, Брянск, ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», БГТУ)

BUGLAEV A.M.

(Russia, Bryansk, FSBEI HPE Bryansk state technical University, BSTU)

***Аннотация.** В работе представлены данные по электродеформационному упрочнению, приведена конструкция установки для механизации этого процесса, установлены режимы упрочнения, позволяющие управлять толщиной наносимого слоя, микротвердостью и шероховатостью поверхности с целью обеспечения необходимой стойкости ножей рейсмусового станка. Механизация электродеформационного упрочнения позволяет улучшить характеристики качества упрочненных поверхностей и существенно снизить трудоемкость процесса упрочнения.*

***Annotation.** The paper presents data on hardening, shows the installation design for mechanizing this process, sets the modes of hardening, allowing to control the thickness of the applied layer, microhardness and the surface roughness in order to provide the necessary resistance of the planer knives. Electro-deformation hardening mechanization allows to improve the quality characteristics of the hardened surfaces and to significantly reduce the complexity of the hardening process.*

***Ключевые слова:** электродеформационное упрочнение, механизация, стойкость инструмента.*

***Keywords:** electro-deformation hardening, mechanization, tool life.*

Нами был разработан метод электродеформационного упрочнения, позволяющий управлять характеристиками качества поверхности в широких пределах.

Сущность метода состоит в том, что при нанесении износостойкого покрытия электрофизическими способами, предлагается целенаправленно формировать параметры качества поверхности и, воздействием механическими методами, обеспечивать отделочно-упрочняющую обработку при еще незастывшем легирующем материале, затем в процессе охлаждения и после окончательного затвердевания поверхностного слоя.

Для реализации предложенного метода электродеформационного упрочнения была разработана механизированная установка (рис. 1).

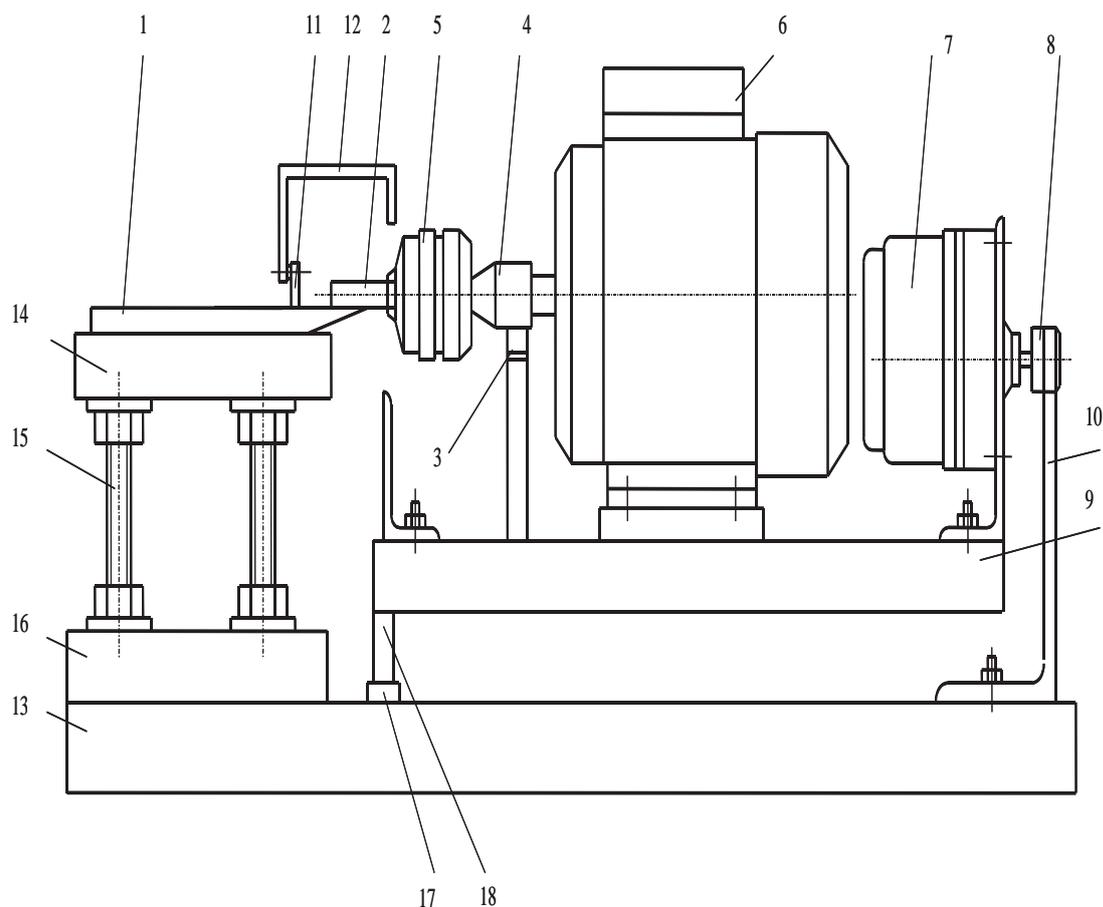


Рис.1. Схема установки
для электродеформационного упрочнения

Механизированная установка действует следующим образом: напряжение с анода блока питания (на рис. не показан) подается через щетку 3, втулку 4, патрон 5 на электрод-инструмент 2. Упрочнение происходит при периодическом контактировании вращающегося электрода-инструмента 2 с поверхностью ножа 1. Движение подачи осуществляется от двух реверсивных электродвигателей 7, изготовленных совместно с редукторами. На валах электродвигателей 7 закреплены приводные ролики 8, обеспечивающие при их вращении перемещение подвижной плиты 9 с установленными на ней электродвигателями 6 и 7 вдоль направляющей 10, а электрода-инструмента 2 – вдоль лезвия ножа 1. Сторона подвижной плиты 9, обращенная к ножу 1, перемещается с помощью роликов 11, закрепленных в стойке 12 на плите 9. Положение ножа 1, закрепленного на опоре 14, регулируется с помощью винтовых пар 15 и прокладок 16, смонтированных на неподвижной плите 13. На последней установлены также конечные выключатели 17 и упоры 18. В момент, когда электрод доходит до границы упрочняемой зоны по длине ножа 1, выключатель касается упора 18, закрепленного на подвижной плите 9, электродвигатели 7 переключаются на противоположное вращение, и электрод-инструмент 2 перемещается в обратную сторону.

Аналогичным способом происходит реверс электродвигателя при подходе электрода-инструмента 2 к противоположному краю ножа 1.

Вращение электрода-инструмента 2 обеспечивается с помощью электродвигателя 6, на валу которого он закреплен. Наибольшее влияние на толщину покрытия, микротвердость и шероховатость оказывает величина рабочего тока.

Результаты исследования влияния величины рабочего тока электродеформационного упрочнения на толщину покрытия (рис.2) показывают, что с увеличением тока от 0,5 до 5 А толщина покрытия увеличивается с 5 до 48 мкм.

Микротвердость также увеличивается с 6,3 до 8,2 Гпа с возрастанием силы рабочего тока от 0,5 до 5 А (рис. 3).

Сила рабочего тока оказывает значительное влияние и на шероховатость. С повышением силы рабочего тока от 0,5 до 5 А шероховатость R_a упрочненной поверхности возрастает от 0,5 до 5 мкм (рис. 4).

Толщина покрытия, микротвердость и шероховатость также возрастают с увеличением напряжения и емкости конденсаторов.

Исследование стойкости ножей проводилось при обработке дубовых заготовок на рейсмусовом станке СР6-7. Ножи были изготовлены из стали 8Х6НФТ, твердостью HRC 56-58.

В результате исследований установлено (рис. 5), что увеличение рабочего тока от 0,5 до 1 А приводит к увеличению стойкости ножей с 24 до 25 ч. Дальнейшее увеличение рабочего тока от 1 до 5 А способствует снижению стойкости с 25 до 11 ч.

Полученные результаты можно объяснить тем, что при упрочнении с силой рабочего тока около 1 А формируется наиболее благоприятное сочетание микротвердости и шероховатости. В том случае, если упрочнение производится с силой тока менее 1 А при небольшой шероховатости снижается микротвердость упрочненной поверхности, что отрицательно сказывается на стойкости ножей. Если же величина рабочего тока более 1 А, существенно возрастает шероховатость упрочненной поверхности, что способствует снижению стойкости ножей. Увеличение напряжения и емкости конденсаторов при электродеформационном упрочнении однозначно способствует снижению стойкости ножей рейсмусового станка в связи с образованием белого слоя. Из испытанных электродов наибольшая стойкость наблюдается при упрочнении электродами из твердых сплавов ВК6ОМ, ВК6М.

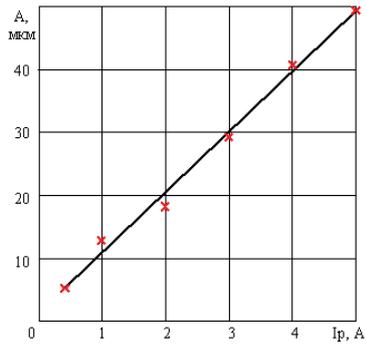


Рис. 2. Влияние силы рабочего тока электродеформационного упрочнения на толщину упрочненного слоя

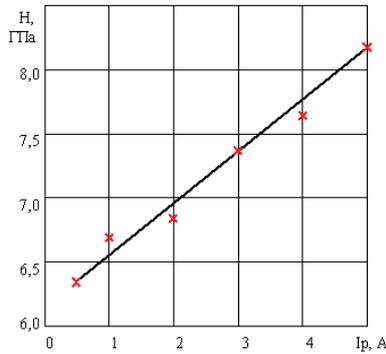


Рис.3. Влияние силы рабочего тока электродеформационного упрочнения на микротвердость упрочненных поверхностей

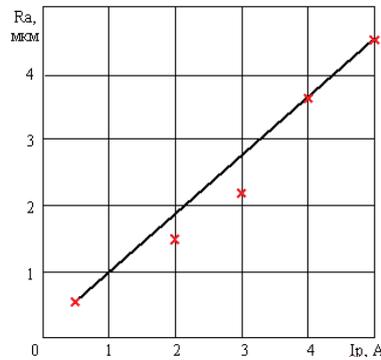


Рис.4. Влияние силы рабочего тока электродеформационного упрочнения на шероховатость Ra упрочненных поверхностей

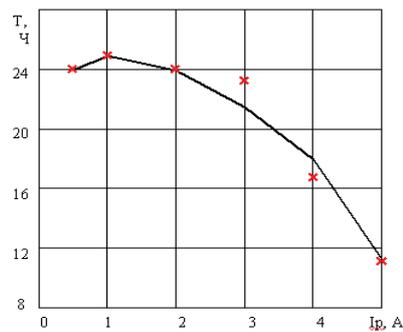


Рис.5. Влияние силы рабочего тока электродеформационного упрочнения на стойкость ножей рейсмусового станка

Стойкость ножей несколько возрастает при увеличении скорости вращения электрода от 0,2 до 5 м/с и повышении числа проходов от 1 до 6. Однако дальнейшее увеличение скорости электрода приводит к его поломке, а повышение числа проходов увеличивает время упрочнения.

Анализ результатов исследований позволил установить режимы электродеформационного упрочнения ножей рейсмусового станка:

- напряжение, В -	28-32
- рабочий ток, А -	1
- скорость вращения электрода, м/с -	0,2-5
- число проходов электрода -	4-6
- материал электрода -	ВК60М, ВК6М

ЛИТЕРАТУРА

1. Должиков В.П. Разработка технологических процессов механообработки в мелкосерийном производстве: Учебное пособие.- 2-е изд. стер. - СПб.: Издательство «Лань», 2016,- 328 с.
2. Буглаев А.М. Повышение стойкости разделительных штампов с твердосплавными режущими элементами алмазным выглаживанием. Упрочняющие технологии и покрытия. 2014. № 11 (119). С. 13-16.

АВТОР

Буглаев Анатолий Михайлович - доктор технических наук, профессор кафедры «Триботехническое материаловедение и технологии материалов» Брянского государственного технического университета.

AUTHOR

Anatoly Mikhailovich Buglaev - Doctor of Technical Sciences, Professor of the “Tribological Engineering Materials and Materials Technology” Department of Bryansk State Technical University.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ОПЛАВЛЕНИЯ
ПЛАЗМЕННЫХ НИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЙ
ТОКАМИ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ**

**DETERMINATION OF TECHNOLOGICAL MODES OF PLASMA NICKEL
COATINGS MELTING BY HIGH FREQUENCY CURRENTS**

**ЗВЕРЕВ Е.А., СКИБА В.Ю., ВАХРУШЕВ Н.В., ТИТОВА К.А.,
ЦЫПЛУХИНА Д.Р.** (НГТУ, г. Новосибирск, Российская Федерация)

**ZVEREV E.A., SKEEBAV.YU., VAKHRUSHV N.V., TITOVA K.A.,
CIPLUKHINAD.R.** (NSTU, Novosibirsk, Russian Federation)

***Аннотация.** В работе представлены исследования по оплавлению плазменных никелевых покрытий токами высокой частоты. Выявлено формирование различных модификаций структуры, и определены рациональные режимы поверхностного высокоэнергетического воздействия.*

***Annotation.** Researches on the melting of nickel plasma coatings by high-frequency currents are presented in the paper. The formation of various structure modifications is revealed, and rational modes of surface high-energy impact are determined.*

***Ключевые слова:** плазменное покрытие, никелевый порошок, поверхностное оплавление.*

***Keywords:** plasma coating, nickel powder, surface melting.*

Введение

Высокоэнергетическое воздействие на плазменные напыленные покрытия производится с целью повышения их качественных показателей: адгезионной прочности, пористости, ликвидации нерасплавленных порошковых частиц в структуре покрытий.

Проведенный ранее сравнительный анализ методов нагрева концентрированными источниками энергии позволил выявить наиболее предпочтительный способ дополнительного температурного воздействия на плазменные покрытия. В условиях комбинированной обработки таким способом является индукционный нагрев [1-10]. Современные индукционные установки имеют высокий коэффициент полезного действия, а так же способны обеспечивать высокую скорость нагрева и возможность варьирования глубиной температурного воздействия.

В настоящее время широкое распространение получил метод высокоэнергетического воздействия токами высокой частоты (частота тока свыше 400 кГц), представляющий собой модифицированный вариант индукционного нагрева.

Обработка поверхности детали осуществляется индуктором, оснащенным ферритовым магнитопроводом, при небольших зазорах (порядка 0,1...0,8 мм) путем относительного перемещения. Основными технологическими параметрами при обработке являются удельная мощность, зазор и относительная скорость перемещения между деталью и индуктором.

Метод имеет характерную особенность перераспределения тепловой энергии по глубине детали, при которой разогрев поверхности детали до максимальной температуры происходит за несколько долей секунд. На начальной стадии вихревые токи циркулируют в тонком приповерхностном слое, плотность тока по сечению распределена равномерно. Дальнейший нагрев, при постоянстве магнитного потока, приводит к уменьшению магнитной проницаемости и росту удельного электрического сопротивления, что влечет за собой увеличение глубины проникновения тока.

Данная технология была успешно апробирована для износостойких покрытий из порошкового материала марки ПГ-С27 [11]. В результате проведенных исследований было установлено, что после повторного индукционного нагрева структуры плазменных слоев обладают более качественными показателями.

Поскольку существует большое многообразие порошковых материалов для нанесения износостойких покрытий, то закономерно возникает необходимость в проведении дальнейших исследований. Также необходимо, чтобы результаты по оплавлению плазменных покрытий обладали общностью. Поэтому большой исследовательский интерес представляет изучение влияния высокоэнергетического воздействия токами высокой частоты на структуру плазменных покрытий из никелевых самофлюсующихся материалов.

Целью настоящей работы является определение технологических режимов процесса оплавления никелевых плазменных покрытий с учетом специфики формирования структуры.

Методика проведения экспериментов

В качестве материала покрытий использовался никелевый самофлюсующийся порошок марки ПГ-12Н-01 с фракционным размером частиц 50...100 мкм. Напыление производилось на образцы из стали 20 плазматроном ПУН-3 мощностью 40 кВт. Режимы плазменного напыления и толщина слоя покрытия были приняты на основании проведенных ранее исследований [12, 13].

Оплавление покрытий осуществлялось на индукционной установке, оснащенной генератором модели ВЧГ 6-60/0,44 с рабочей частотой тока 440 кГц. Нагрев осуществлялся непрерывно-последовательным способом с помощью индуктора петлевого типа, оснащенного магнитопроводом марки N87. Глубина выделения энергии составила порядка 0,6...0,8 мм.

Металлографические исследования структуры выполнялись на оптическом микроскопе марки *NIKONEclipseMA100*.

Результаты и обсуждения

Структура никелевого плазменного покрытия представлена на рисунке 1. Данная структура характеризуется значительной пористостью, содержит нерасплавленные частицы и несплошности разнообразной конфигурации и размеров, что в целом отрицательно сказывается на качестве покрытия.

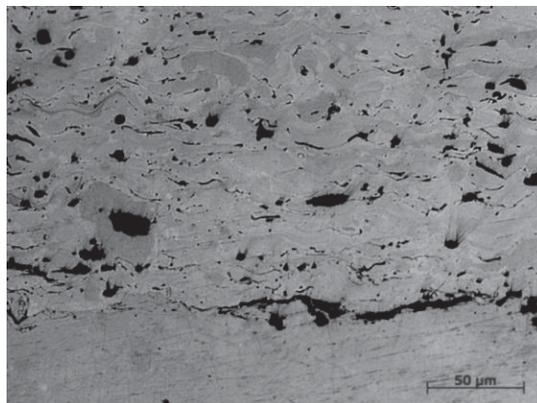


Рисунок 1 – Структура никелевого плазменного покрытия

С учетом экспериментального опыта и методики математического моделирования нагрева токами высокой частоты [14, 15] была установлена область режимов для проведения исследований по оплавлению никелевых плазменных покрытий – диапазон удельной мощности от $3,0 \cdot 10^8$ Вт/м² до $3,2 \cdot 10^8$ Вт/м² при относительной скорости перемещения от 40 мм/с до 100 мм/с.

Результаты исследований показали, что при значениях удельной мощности $3,0 \cdot 10^8 \dots 3,1 \cdot 10^8$ Вт/м² и скорости перемещения образцов относительно индуктора 80...100 мм/с наблюдается формирование структуры которая практически не отличается от исходной (рисунок 1).

Оплавление никелевых плазменных покрытий при удельной мощности $3,1 \cdot 10^8 \dots 3,2 \cdot 10^8$ Вт/м² и скорости перемещения образцов 40...60 мм/с приводит к формированию структуры с излишней степенью оплавления, фрагмент которой представлен на рисунке 2.

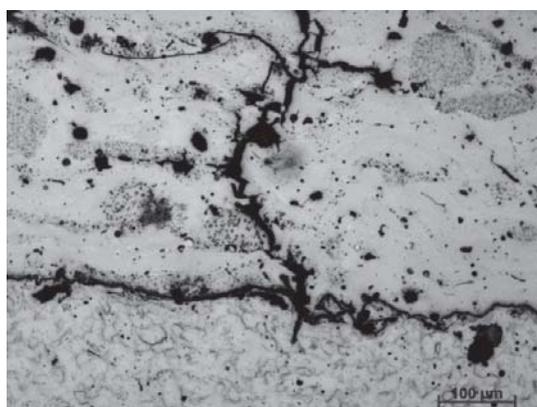


Рисунок 2 – Структура никелевого покрытия с чрезмерной степенью оплавления

Данная структура характеризуется наличием явно выраженных дефектов: термических трещин, участков вскипания на поверхности и на переходной границе. Так же важно отметить, что чрезмерное температурное воздействие приводит к выгоранию элементов и соответственно изменению химического состава и свойств покрытия, что в свою очередь неблагоприятно скажется на эксплуатационных характеристиках.

Проведенные исследования позволили определить область рациональных режимов высокоэнергетического индукционного оплавления плазменных никелевых покрытий – диапазон удельной мощности $3,1 \cdot 10^8 \dots 3,2 \cdot 10^8$ Вт/м² при относительной скорости перемещения 70...75 мм/с. При обработке покрытий в установленном режиме в диапазоне формируется равномерно проплавленная структура, вариант которой представлен на рисунке 3.

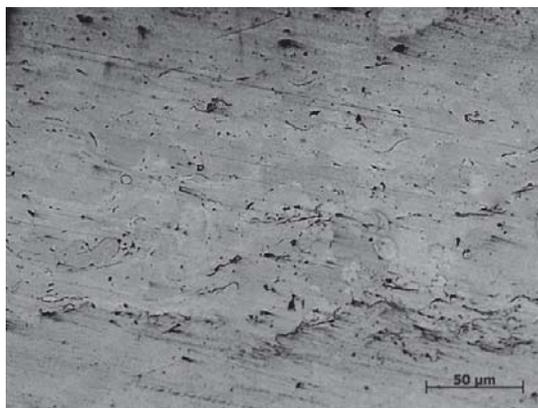


Рисунок 3 – Равномерно проплавленная структура

В структуре наблюдается существенное сокращение пористости и отсутствие нерасплавленных частиц порошка. На переходной границе между покрытием и основой практически отсутствуют дефекты, и наблюдается значительное повышение ее равномерности, что, безусловно, положительно отразится на адгезионной прочности и эксплуатационных показателях.

ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований определен диапазон рациональных технологических режимов высокоэнергетического воздействия токами высокой частоты (удельная мощность – $3,1 \cdot 10^8 \dots 3,2 \cdot 10^8$ Вт/м², относительная скорость перемещения – 70...75 мм/с) на плазменные покрытия из самофлюсующегося никелевого порошка марки ПГ-12Н-01.

Оплавление покрытий при данных режимах приводит к формированию равномерно проплавленной структуры, характеризующейся существенным улучшением качественных показателей, а, следовательно, и эксплуатационных характеристик.

Важно отметить, что при оплавлении покрытий необходимо исключать формирование структур с недостаточным или излишним температурным воздействием, а так же не допускать образование переходных структур, которые частично содержат дефекты непроплавленных или перегретых покрытий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Поверхностное упрочнение сплава ВТ1-0 с использованием технологии вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковых смесей / О.Г. Ленивцева, А.О. Токарев, И.К. Чакин, С.В. Буров, Ю.В. Худорожкова // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2018. – Т. 20, № 2. – С. 116-129. – doi: 10.17212/1994-6309-2018-20.2-116-129.
2. Ion J.C. *Laser processing of engineering materials: principles, procedure and industrial application*. – Burlington: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005. – 576 p.
3. Multipass surface hardening of steel samples with inclined surfaces by concentrated electron beam in the air of atmosphere pressure / V.V. Abashkin, O.A. Gorshkov, A.A. Ilyin, A.S. Lovtsov, R.N. Rizakhanov // *High Temperature Material Processes: an International Quarterly of High-Technology Plasma Processes*. – 2004. – Vol. 8, N 3. – P. 427-432. – doi: 10.1615/HighTempMatProc.v8.i3.80.
4. Béjar M.A., Henríquez R. Surface hardening of steel by plasma-electrolysis boronizing // *Materials and Design*. – 2009. – Vol. 30, N 5. – P. 1726-1728. – doi: 10.1016/j.matdes.2008.07.006.
5. *Advanced Tribology: proceedings of CIST2008 & ITS-IFTtoMM2008* / JianbinLuo, YonggangMeng, Tianmin Shao, Qian Zhao, eds. – Beijing: Tsinghua University Press; Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. – 1056 p.
6. Davis J.R. *Surface hardening of steels: understanding the basics*. – Ohio: Materials Park: ASM International, 2002. – 364 p.
7. Songa R.G., Zhanga K., Chena G.N. Electron beam surface treatment. Pt. 1. Surface hardening of AISI D3 tool steel // *Vacuum*. – 2003. – Vol. 69, N 4. – P. 513-516. – doi: 10.1016/S0042-207X(02)00583-3.
8. Мишигдоржийн У.Л., Сизов И.Г., Полянский И.П. Формирование покрытий на основе бора и алюминия на поверхности углеродистых сталей электронно-лучевым легированием // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2018. – Т. 20, № 2. – С. 87-99. – doi: 10.17212/1994-6309-2018-20.2-87-99.
9. Surface hardening of steels with carbon by non-vacuum electron-beam processing / I.A. Bataev, M.G. Golkovskii, A.A. Bataev, A.A. Losinskaya, A.I. Popelyukh, E.A. Drobyaz // *Surface and Coatings Technology*. – 2014. – Vol. 242. – P. 164-169. – doi: 10.1016/j.surfcoat.2014.01.038.
10. Pulsed electron beam facility (GESA) for surface treatment of materials / V. Engelko, B. Yatsenko, G. Mueller, H. Bluhm // *Vacuum*. – 2001. – Vol. 62, N 2-3. – P. 211-216. – doi: 10.1016/S0042-207X(00)00446-2.
11. Оценка работоспособности износостойких плазменных покрытий после высокотемпературного воздействия токами высокой частоты / Е.А. Зверев, В.Ю. Скиба, П.В. Трегубчак, Н.В. Вахрушев, К.А. Парц, А.К. Жигулев // *Актуальные проблемы в машиностроении*. – 2016. – № 3. – С. 65-70.
12. Fauchais P.L., Heberlein J.V.R., Boulos M.I. *Thermal spray fundamentals*. – New York: Springer US Publ., 2014. – 1566 p. – doi: 10.1007/978-0-387-68991-3.
13. Структура износостойких плазменных покрытий из никель-керамической смеси / Ю.С. Чёсов, Е.А. Зверев, Н.В. Плотникова, Н.В. Вахрушев, А.С. Ваганов, И.В. Бандюров // *Актуальные проблемы в машиностроении*. – 2015. – № 2. – С. 405-409.
14. Образование жидкой фазы в поверхностном слое стальных деталей в условиях закалки высокоэнергетическим нагревом токами высокой частоты / В.В. Иванцовский, И.А. Батаев, Т.Г. Мартынова, Н.В. Вахрушев, Г.О. Ча // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2016. – № 3 (72). – С. 41-51.
15. Комбинированное повышение износостойкости никелевых плазменных покрытий / В.В. Иванцовский, Е.А. Зверев, Н.В. Вахрушев, К.А. Парц // *Актуальные проблемы в машиностроении*. – 2018. – Т. 5. – № 3-4. – С. 24-29.

АВТОРЫ

Зверев Е.А. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, НГТУ, к.т.н., доцент, egor_z@ngs.ru

Скиба В.Ю.– 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, НГТУ, к.т.н., доцент, skeeba_vadim@mail.ru

Вахрушев Н.В.– 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, НГТУ, ассистент, vah_nikit@mail.ru

Титова К.А.– 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, НГТУ, ассистент, krispars@yandex.ru

Цыплухина Д.Р.– 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, НГТУ, студент, cyplukhinadaria@mail.ru

AUTHORS

Zverev E.A. – 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, Novosibirsk State Technical University, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: egor_z@ngs.ru

Skeeba V.Yu. – 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, Novosibirsk State Technical University, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: skeeba_vadim@mail.ru

Vakhrushev N.V. – 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, Novosibirsk State Technical University, Assistant, e-mail: vah_nikit@mail.ru

Titova K.A. – 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, Novosibirsk State Technical University, Assistant, e-mail: krispars@yandex.ru

Cyplukhina D.R. – 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, Novosibirsk State Technical University, Student, e-mail: cyplukhinadaria@mail.ru

**УЧЕТ ТОЧНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ПОДШИПНИКОВЫХ
УЗЛОВ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ ПРИ НАЗНАЧЕНИИ
ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫХ НАТЯГОВ**

**ACCOUNTING OF ACCURACY OF MANUFACTURING DETAILS
OF BEARING NODES OF METAL CUTTING MACHINES
WHEN ASSIGNING PRELOADS**

ДЕНИСЕНКО А.Ф.
(СамГТУ, Самара, Россия)

DENISENKO A.F.
(Samara State Technical University, Samara, Russia)

***Аннотация.** Приведены результаты экспериментальных исследований влияния погрешностей формы контактирующих деталей подшипниковой опоры на их пространственное положение при осевом сжатии. Разработана методика назначения предварительных натягов в подшипниковых узлах*

***Annotation.** The results of experimental studies of the influence of the errors of the shape of the contacting parts of the bearing support on their spatial position under axial compression are given. A technique for assigning preloads in bearing units has been developed.*

***Ключевые слова:** подшипниковая опора, погрешности формы, предварительный натяг.*

***Key words:** bearing support, shape errors, preload.*

Создание металлорежущих станков с высокими эксплуатационными характеристиками является насущной необходимостью обеспечить запросы современного машиностроительного комплекса. Одной из таких характеристик является жесткость [1-3]. Роль обеспечения жесткости в конструкции любого технологического оборудования весьма высока, так как обеспечивает не только сохранение геометрической точности при силовых воздействиях, то и существенно влияет на динамические процессы, протекающие при выполнении оборудованием служебных функций [4-7]. Для подшипниковых узлов шпиндельных узлов и опор ходовых винтов приводов подач станков с ЧПУ должны быть обеспечены не только высокие показатели по радиальной жесткости, но и по осевой [8-10].

Осевая жесткость этих узлов непосредственно сказывается на точности обработки.

Эффективным средством повышения осевой жесткости подшипниковых узлов является создание предварительного натяга [11-12]. Основным условием

при выборе предварительного натяга в подшипниковом узле, фиксирующем положение вала в осевом направлении, является условие не раскрытия стыков.

В зависимости от того, какие элементы входят в цепь силового замыкания, рекомендуются следующие значения предварительного нагружения P_H : для шариковых подшипников $P_H = 0,354P_{\max}$; для плоских и цилиндрических стыков $P_H = 0,25P_{\max}$, где P_{\max} - максимально возможная нагрузка. Но так как в цепь силового замыкания могут входить одновременно различные звенья, то чаще всего используют соотношение $P_H \cong 0,5P_{\max}$ [1]. Однако, рекомендуемое значение является весьма приближенным, так как не учитывает конструкцию и компоновку подшипникового узла, а также точность изготовления входящих в него деталей (подшипников, втулок, колец, гаек, корпусов и др.).

Как показано в [13], погрешности изготовления деталей и взаимная ориентация погрешностей при сборке приводят к существенному изменению пространственного положения деталей, что естественно сказывается на характере изменения контактной жесткости стыков.

Так как основная цель создания предварительного натяга - увеличение осевой жесткости за счет работы подшипникового узла в области линейного изменения жесткости, и так как линейный участок контактной жесткости предполагает контакт его деталей по всей номинальной поверхности, то величина требуемой предварительной нагрузки может быть определена из условия отсутствия клиновых зазоров в торцовых стыках деталей подшипникового узла.

Учитывая технологию изготовления контактных поверхностей элементов опоры, обеспечивающую высокие показатели по плоскостности [14], подшипниковый узел можно представить в виде комплекта колец, имеющих отклонения от перпендикулярности торцов относительно оси опоры. Наличие указанных отклонений даже в пределах допуска в процессе сборки может вызвать поворот одного из элементов опоры, что ведет к изменению положения опорных поверхностей для соседних элементов [13]. Кроме предельного случая, когда нормали к торцовым опорным поверхностям лежат в одной плоскости, необходимо учесть случайный характер их ориентации в пространстве при сборке.

Гипотеза о влиянии погрешности формы контактирующих деталей на их пространственное положение была проверена экспериментально на специальном стенде, представляющем сварную конструкцию из трех швеллеров и опорной плиты (рис. 1). Нагружение стыков производилось через динамометр 1, который располагался между нагружающим винтом 2 и стаканом 3. Для уменьшения влияния возможных отклонений от соосности нагрузка от винта на динамометр и от него на стакан передавалась через шарики 4 и 5. Соединение стойки 7 и стакана 3 было выполнено по скользящей посадке.

В качестве образцов были взяты ступенчатые кольца 6, имеющие два рабочих торца и два вспомогательных, в которых выполнено восемь отверстий (через 45°) для крепления индикаторов 9, по показаниям которых можно делать выводы о пространственном положении кольца при нагружении (рис. 2). Поверхность опорной плиты 8 закалена и шлифована.

Предварительно была оценено отклонение от параллельности рабочих торцов колец (16 штук), которые были получены чистовым точением резцом, и помечены диаметрально расположенные места максимальной и минимальной толщины колец. Значения отклонения от параллельности для указанного комплекта колец лежали в пределах 0,006...0,033 мм.

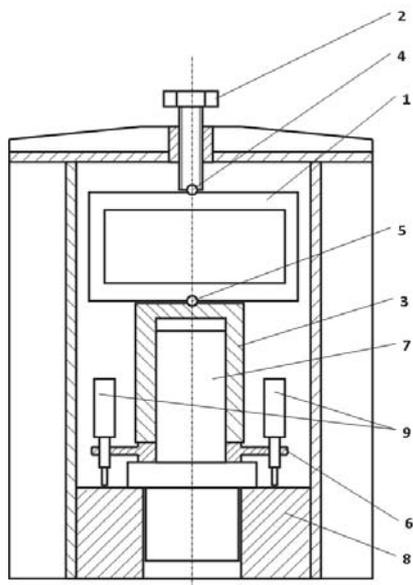


Рис. 1. Стенд для оценки влияния погрешности формы контактирующих деталей на их пространственное положение

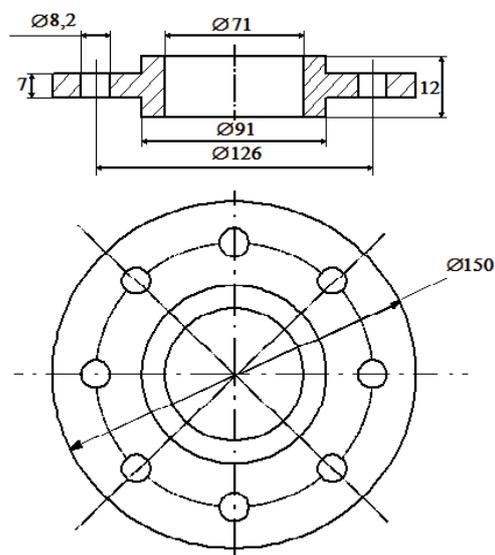
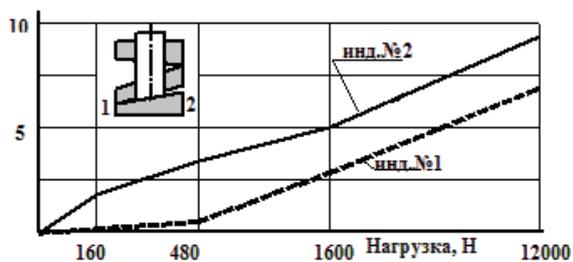
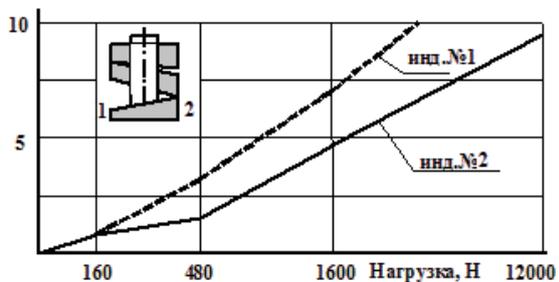


Рис.2. Образцы для исследования влияния погрешности формы контактирующих деталей на их пространственное положение

Показания индикатора, мкм

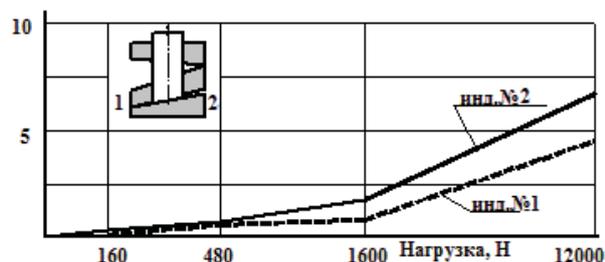


Показания индикатора, мкм

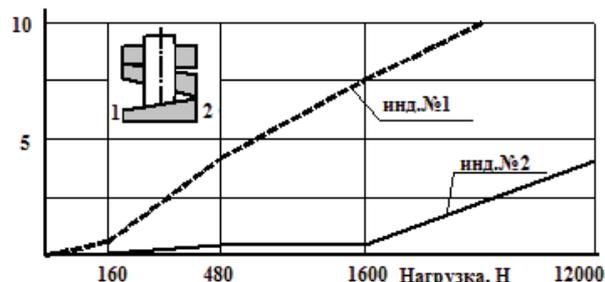


а)

Показания индикатора, мкм



Показания индикатора, мкм



б)

Рис. 3. Пространственное положение кольца № 7 (а) и №12 (б) при нагружении на экспериментальном стенде

Предварительная оценка отклонения от перпендикулярности рабочего торца (контактирующего с кольцом) стакана 3 и ее ориентации давала возможность во время экспериментов определить влияние величины и ориентации погрешностей расположения опорных поверхностей, а также посадки по цилиндрической поверхности на пространственное положение кольца при нагружении.

Как показали эксперименты, это влияние весьма существенно для колец, имеющих скользящую посадку по цилиндрической поверхности (рис. 3).

Полученные экспериментальные результаты подтвердили необходимость учета пространственного положения деталей подшипникового узла при их осевом сжатии силами предварительного нагружения. Это необходимо для определения наихудшего случая контакта, требующего наибольших осевых сил для обеспечения контакта по всей номинальной поверхности.

Рассмотрим элемент подшипникового узла в виде втулки с типичными допусками на расположение торцовых поверхностей: δ_0 - отклонение от перпендикулярности, δ_H - отклонение от параллельности.

По указанным отклонениям возможно получить следующие формы детали (рис. 4).

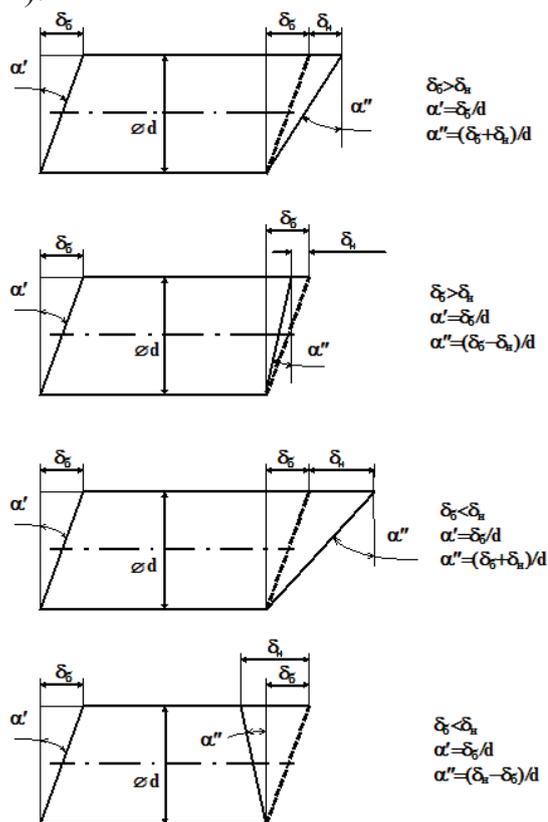


Рис.4. Возможные формы детали в зависимости от соотношения погрешностей расположения поверхностей

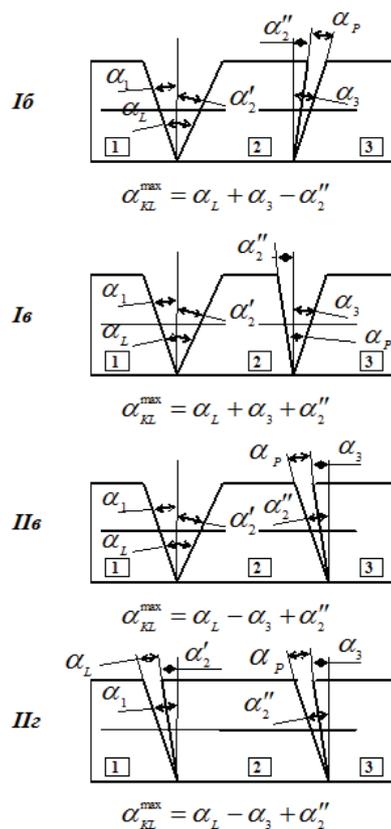


Рис.5. Формирование углов α_L и α_P

За счет различной ориентации рассматриваемых погрешностей и соотношения их величин при монтаже детали могут иметь место несколько вариантов контакта (таблица).

Взаимное положение опорных поверхностей стыков деталей 1-2 и 2-3 в начальный момент контакта определяется углами α_L и α_P соответственно, формирование которых для ряда вариантов показано на рис. 5.

Таблица

Варианты контакта деталей, имеющих погрешности расположения поверхностей

Схема соединения деталей	Расположение торцов сопрягаемых деталей	
	<i>I</i>	<i>II</i>
а	 $\alpha_{KL} = \alpha_1 + \alpha'_2 - \alpha''_2 + \alpha_3$	 $\alpha_{KL} = \alpha_1 + \alpha'_2 + \alpha''_2 - \alpha_3$
б	 $\alpha_{KL} = \alpha_1 + \alpha'_2 - \alpha''_2 + \alpha_3$	 $\alpha_{KL} = \alpha_1 - \alpha'_2 + \alpha''_2 - \alpha_3$ или $\alpha_{KL} = -\alpha_1 + \alpha'_2 - \alpha''_2 + \alpha_3$
в	 $\alpha_{KL} = \alpha_1 + \alpha'_2 + \alpha''_2 + \alpha_3$	 $\alpha_{KL} = \alpha_1 + \alpha'_2 + \alpha''_2 - \alpha_3$
г	 $\alpha_{KL} = -\alpha_1 + \alpha'_2 + \alpha''_2 - \alpha_3$ или $\alpha_{KL} = \alpha_1 - \alpha'_2 - \alpha''_2 + \alpha_3$	 $\alpha_{KL} = \alpha_1 - \alpha'_2 + \alpha''_2 - \alpha_3$

Если деталь 2 (таблица) имеет радиальные зазоры, позволяющие беспрепятственно повернуться ей на угол $\alpha_B = (\Delta_I + \Delta_{II})/L$ (где Δ_I и Δ_{II} - допуск на диаметр вала и отверстия соответственно; L - длина сопряжения) больший α_L и α_P , то при сжатии пакета деталей за счет поворота детали 2 в одном из стыков (1-2 или 2-3) образуется клиновидный зазор с углом α_{KL} , наибольшее значение которого получается при схеме *Iв*, так как в этом случае происходит суммирование всех погрешностей контактирующих деталей.

Если же угол α_D соизмерим с углами α_L и α_P , то при диагональном контакте (схемы *Ia*, *Iz*, *IIa*, *IIб*) углы α_L и α_P уменьшаются на величину α_D и тогда α_{KL} выбирается как максимальное значение двух разностей: $\alpha_L - \alpha_D$ и $\alpha_P - \alpha_D$. Во всех других схемах возможны значения $\alpha_L \pm \alpha_D$ и $\alpha_P \pm \alpha_D$, максимальное из которых принимается в качестве α_{KL} .

Знание клинового зазора α_{KL} позволяет воспользоваться номограммами, приведенными в работе [15], учитывающими случайный характер величин погрешностей и их взаимного расположения в узле, для назначения рационального предварительного натяга, при котором полностью ликвидируется клиновой зазор α_{KL} за счет упругой контактной деформации.

Так, например, рассмотрим создание предварительного натяга в опоре ходового винта привода продольных подач станка мод. 1П426Ф3 (рис. 6).

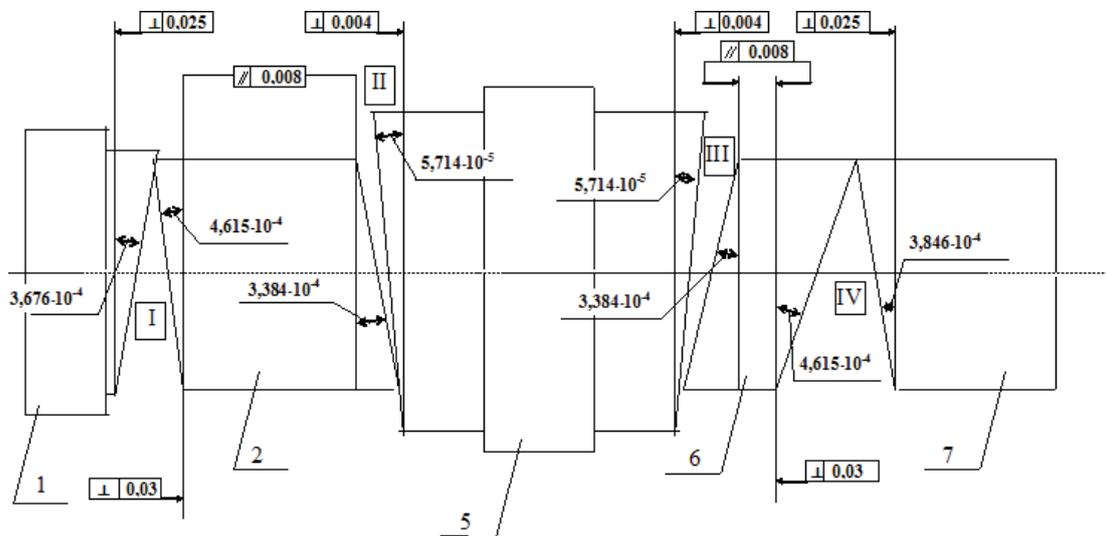


Рис.6. Параметры соединений деталей правой опоры ходового винта привода продольных подач станка мод. 1П426Ф3

Принимая во внимание, что детали 2 и 6 имеют радиальный зазор, при котором $\alpha_D \gg \alpha_i$, для определения α_{KL} получим схему, приведенную на рис. 6. Расчеты по приведенной выше методике показали, что наибольший угол α_{KL} получается в стыке IV (рис. 6). Используя полученное значение $\alpha_{KL} = 5,648 \cdot 10^{-4}$ рад, по номограмме, приведенной в работе [15], при $R = 32,5$ мм получаем для сплошного диска $P_{Hs}^{\max} = 5800$ Н. Учитывая наличие отверстия радиусом $r = 22,5$ мм коэффициентом $k = (R^2 - r^2) / R^2$, окончательно получим $P_H^{\max} = k P_{Hs}^{\max} = 3020$ Н.

Таким образом, методика определения предварительного натяга в подшипниковых опорах валов включает следующие этапы.

1. По рабочим чертежам деталей узла определяем допустимые отклонения торцов деталей от перпендикулярности.

2. По компоновке узла определяем для каждой детали схему, дающую максимальный угол клина в соединении и находим стык узла с максимальным углом клина.

3. По номограммам с учетом размеров кольца определяем величину максимального предварительного натяга для найденного стыка.

Предложенная методика определения предварительного натяга может быть использована на стадии проектирования подшипниковых узлов для назначения допустимых отклонений формы и расположения поверхностей деталей, исходя из заданного по условиям требуемой жесткости предварительного натяга.

ЛИТЕРАТУРА

1. Станки с числовым программным управлением (специализированные) / В. А. Лещенко, Н. А. Богданов, И. В. Вайнштейн и др. М.: Машиностроение, 1988, 568 с.
2. Бушуев В.В. Практика конструирования машин: справочник. М.: Машиностроение, 2006, 448 с.
3. Агафонов В.В. Обеспечение жесткости станка при проектировании/ Вестник Брянского государственного технического университета, № 2 (10), 2006., с. 97-101.
4. Mihai Simon. Method for testing the rigidity of large mechanical parts / Procedia Technology, №12, 2014, pp. 334-338.
5. Tri Prakosa, Agung Wibowo and Rizky Ilhamsyah. Optimizing static and dynamic stiffness of machine tools spindle shaft, for improving machining product quality/ Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol. 20, No. 4, 2013, pp. 363-370.
6. Brandon C. Gegg, C. Steve Suh, Albert C.J. Luo. Machine Tool Vibrations and Cutting Dynamics. Springer New York Dordrecht Heidelberg London, 2011. DOI 10.1007/978-1-4419-9801-9.
7. Максаров В.В., Ольт Ю. Теория и практика моделирования и управления в области прогнозирования динамических свойств технологических систем / Металлообработка, №2, 2012, с.7-13.
8. Бушуев В.В. Моделирование механической части привода подач станков с ЧПУ / Материалы XVII международной научно-практической конференции "Теория и практика современной науки", Научно-информационный издательский центр "Институт стратегических исследований", 2015, с.35-39.
9. Мисюкевич С. Д., Мазеин П. Г. Моделирование привода подачи металлорежущего станка, оснащенного шариковинтовой передачей/ Известия Челябинского научного центра, вып. 1 (39), 2008, с.55-60.
10. Зубенко В.Л., Емельянов Н.В. Исследование жесткости привода подачи станка с ЧПУ с учетом сил трения / Известия Самарского научного центра РАН, т.18, № 4-2, 2016, с.267-272.
11. Гаспаров Э.С., Денисенко А.Ф., Гаспарова Л.Б. Определение усилия предварительного натяга подшипниковых опор шлифовального шпинделя/ Сборка в машиностроении, приборостроении, №9, 2015, с.26-29.
12. Гаспаров Э.С., Денисенко А.Ф., Гаспарова Л.Б. Определение усилия предварительного натяга подшипниковых опор шпиндельного узла методом виброакустической диагностики/ Вестник машиностроения, №12, 2015, с.43-47.
13. Решетов Д.Н., Портман В.Т. Точность металлорежущих станков. М.: Машиностроение, 1986, 336 с.
14. Салов П.М., Вячеславов Д.А., Афанасьева М.Л. и др. Повышение эффективности процесса и качества обработанной поверхности при силовом шлифовании торцом круга / Матер. Всероссийск. н.-т. конф. "Высокие технологии в машиностроении", Самара: СамГТУ, 2015, с.28-29.

15. Денисенко А.Ф. Прогнозирование критериев работоспособности станков на основе конструкторско-технологического обеспечения эксплуатационных свойств соединений: диссертация ... доктора технических наук: 05.02.08, 05.03.01. Самара, 2000, 457 с.

АВТОРЫ

Денисенко Александр Федорович, доктор технических наук, профессор; профессор кафедры "Технология машиностроения, станки и инструменты", Самарский государственный технический университет.

AUTHOR

Denisenko Alexander Fedorovich, doctor of technical sciences, professor; Professor of the Department "Engineering Technology, Machine Tools and Tools", Samara State Technical University.

ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ГОРЯЧЕКАТАНОГО СТАЛЬНОГО РУЛОНА

HYDRAULIC FORMING ROLL HOT-ROLLED STEEL

ЕЛЕМЕСОВ К.К. (КазННТУ им. К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан)

АБСАДЫКОВ Б.Н. (ИХН им. А.Б. Бектурова, Алматы, Казахстан)

БЕКМУХАНБЕТОВА Ш.А.

(КазАДИ им. Л.Б. Гончарова, Алматы, Казахстан)

МУРЗАХМЕТОВА У.А.

(КазАДИ им. Л.Б. Гончарова, Алматы, Казахстан)

САПАРБАЕВ Е.Т. (КазНАУ, Алматы, Казахстан)

СМАЙЛОВА Г.А. (КазНАУ, Алматы, Казахстан)

ELEMESOV K.K. (K. I. Satpayev KazNRTU, Almaty, Kazakhstan)

ABSADYKOV B.N. (A. B. Bekturov ICS, Almaty, Kazakhstan)

BEKMUKHANBETOVA SH.A.

(L. B. Goncharov KARA, Almaty, Kazakhstan)

MURZAKHMETOVA U.A. (L. B. Goncharov KARA, Almaty, Kazakhstan)

SAPARBAEV E.T. (KazNAU, Almaty, Kazakhstan)

SMAILOVA G.A. (KazNAU, Almaty, Kazakhstan)

***Аннотация.** В статье рассматриваются вопросы работы линии стана НШПС-1700, а именно процесс смотки горячекатаных полос. Приведен существующий метод смотки полос, который не обеспечивает необходимое качество поверхности стальных полос. Анализ надежности работы моталок на основании статистических данных подтвердил их весьма малую работоспособность. Достоверно подтверждено, что самыми ненадежными узлами моталок являются формирующие устройства, на которые приходится 57% аварийных остановок. В результате изучения работы моталок на действующем стане сделан вывод о необходимости коренного изменения конструкции формирующего устройства.*

Предложено заменить традиционную систему роликового формирования рулонов гидравлическим формированием. Для проверки идеи гидравлического формирования рулонов изготовлена модель моталки. Исследования подтвердили работоспособность данного предложения и позволили сделать ряд наработок и рекомендаций для создания промышленной моталки.

***Abstract.** This article discusses the work of the mill line broadband continuous mill in 1700, namely, the process of winding the hot-rolled strips. An existing method of winding lanes, which does not provide the required quality of the surface of the steel strip. Analysis of the reliability of the reels on the basis of statistical data confirmed their very low efficiency. It is authentically confirmed that the most unreliable nodes*

reels are forming devices, which account for 57% of emergency stops. As a result of studying the work of reels on the existing camp we came to the conclusion that a complete change in the structure of the forming unit.

It is proposed to replace the traditional system of roll forming rolls hydraulic formation. To test the idea of hydraulic baling made model winder. Researches have confirmed operability of this offer and have allowed to make a number of developments and recommendations for creation of an industrial winder.

Ключевые слова: Прокатный широкополосный стан, моталка, формирующие ролики, гидравлическое формирование, качество, горячекатаная полоса.

Keywords: Broadband rolling mill, winder, forming rollers, hydraulic forming, quality, hot-rolled strip.

На современных листовых станах холодной и горячей прокатки металл прокатывают в рулонах. Для получения рулонов применяют агрегаты, объединенные в класс намоточно-свертывающих машин [1-3], к которым относятся моталки и свертывающие машины для сматывания широких полос, узких лент, штрипсов, катанки и мелкосортного проката в бунты.

Анализ работы существующих моталок показал, что одним из основных факторов, влияющих на качество смотки полос в рулон, является правильная настройка скоростей вращения формирующих роликов и их расположения относительно барабана. В результате был сделан вывод о необходимости принципиального изменения конструкции формирующего устройства.

За основу разработки был принят патент Великобритании [4], предлагающий устройство для смотки тонких металлических полос (фольги) путем поджатия переднего конца полосы к барабану струей сжатого воздуха. Коллектор подачи воздуха огибает барабан моталки по окружности и, после захвата полосы, может отводиться от поверхности сматываемого рулона. Было предложено формирование рулонов стальной горячекатаной полосы проводить подобным образом, используя в качестве рабочего тела воду [5-8].

Разработка устройства гидравлического формирования рулона была начата с расчета лабораторной модели моталки. В качестве прокатываемого материала взят свинец как модельный материал горячей прокатки. Основные параметры лабораторной модели моталки приняты конструктивно из соображений совместной установки модели с лабораторным прокатным станом «Дуо –100».

Необходимое усилие складывается из двух величин – из изгиба полосы в упруго-пластической области и из преодоления центробежной силы [3]. На рисунке 1 показано направление сил, действующих на полосу для поджатия ее к поверхности барабана.

Полное усилие, действующее на передний конец полосы, будет складываться из статического и динамического усилий:

$$P_{пол.} = P_{ст} + P_{дин} . \quad (1)$$

Из условия изгиба полосы статическое усилие прижима при формировании первого витка на барабане равно

$$P_{cm} = \frac{M_{cm}}{R_{\sigma} \sin \alpha}, \quad (2)$$

где M_{cm} - статический момент, Нм;

R_{σ} - радиус барабана, м;

α - угол между формирующими роликами или соплами (в нашем случае $\alpha = 36^{\circ}$).

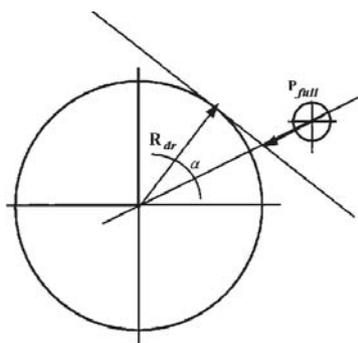


Рисунок 1- Действие сил формирующих рулон

Статический момент равен

$$M_{cm} = \sigma_t \frac{bh^2}{6}, \quad (3)$$

где σ_t - предел текучести, МПа;

b – ширина полосы, м;

h – толщина полосы, м.

Динамическое усилие:

$$P_{дин} = \frac{C}{\eta}, \quad (4)$$

где C – центробежное усилие, Н;

η - количество коллекторов.

Полоса, огибая барабан, меняет направление движения с прямолинейного на криволинейное. При этом возникают центробежные силы, которые уменьшают давление полосы на барабан. Для преодоления этих сил, давление со стороны формирующего устройства должно быть увеличено на величину центробежной силы.

Принимаем, что необходимо преодолеть центробежную силу от одного витка полосы. Центробежная сила от одного витка полосы будет равна:

$$C = \frac{Pv^2}{gR_{\sigma}}, \quad (5)$$

где V – вес одного витка, Н;

v – скорость сматывания полосы,

R_{σ} – радиус барабана моталки;

g – ускорение силы тяжести.

Вес одного витка определим через объем одного витка полосы. Объем витка:

$$V = b \cdot l \cdot h, \quad (6)$$

где b – ширина полосы, м;
 l – длина одного витка полосы, м;
 h – толщина полосы, м.

Исходя из размеров барабана, количество линий подачи воды (коллекторов) первоначально принято равным десяти с расстановкой равномерно по диаметру через 36° . Расстановка и количество сопел на каждом коллекторе определены из условия смотки полос различной ширины. В смотке рулонов шириной до 50 мм будут работать все десять линий подачи воды.

Требуемое усилие действия струи воды на полосу:

$$P_c = Q_m \cdot v, \quad (7)$$

$$Q_m = \rho \cdot v \cdot S, \quad (8)$$

где ρ – плотность воды, $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$;
 S – сечение сопла, м^2 .

Получим выражение усилия струи воды:

$$P_c = \rho \cdot S \cdot v^2, \quad (9)$$

откуда
$$v = \sqrt{\frac{P_c}{\rho \cdot S}}. \quad (10)$$

Сечение сопла определим из выражения:

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4}, \quad (10)$$

где d – диаметр сопла, м.

Для определения количества коллекторов (точек приложения нагрузки к полосе) исходим из следующих условий:

1. Подаваемая на смотку полоса имеет одну ширину и толщину, является плоской или близкой к плоской. Это соответствует требованиям, предъявляемым к прокатываемой полосе.

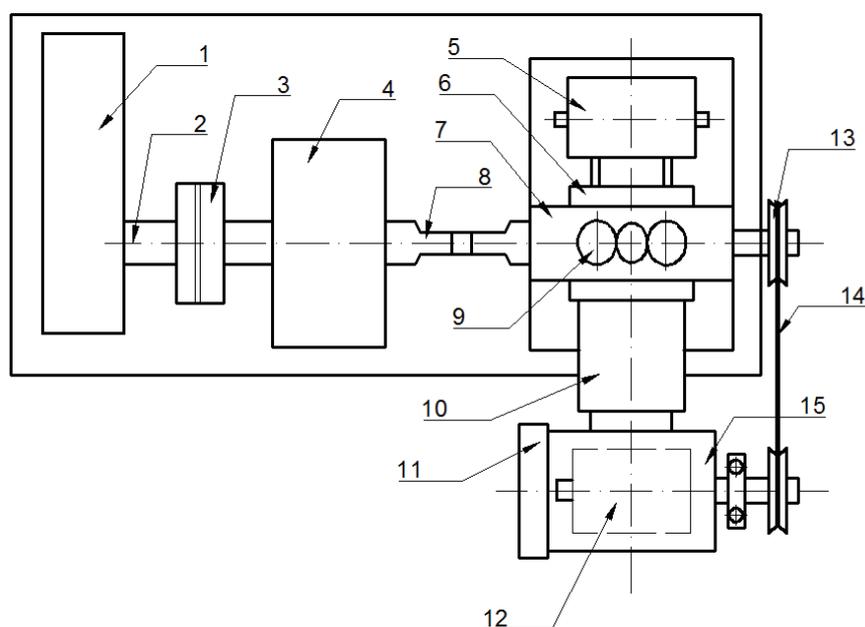
2. Задача формирующего устройства – обеспечить поджатие полосы к поверхности барабана по всей его образующей (по всей длине окружности). Для лабораторной конструкции моталки было принято решение об испытании формирующего устройства без применения дополнительных механических направляющих (проводок).

3. Деформация поверхности полосы в промышленной моталке определяется как соотношение:

$$h/R = 6/425 = 0,0141,$$

где h – толщина полосы, мм;
 R – радиус барабана, мм.

В лаборатории КазНИТУ им К.И. Сатпаева изготовлена и испытана модель моталки, которая конструктивно привязана к действующей лабораторной модели прокатного стана «Дуо – 100» (рисунок 2). Основным узлом лабораторной моталки является барабан диаметром 300 мм, изготовленный из трубы. Длина барабана 200 мм, что соответствует длине бочки валка прокатного стана. Барабан через цапфы соединен с приводным валом, установленным в роликовых подшипниках качения. С целью упрощения конструкции и одновременно для расширения возможности регулировки относительных скоростей рабочих валков стана и барабана была использована клиноременная передача. Гидравлическое формирующее устройство смонтировано независимо от барабана с неприводной стороны.



1 - редуктор; 2 - шпindelь; 3 - муфта; 4 - шестеренная клетка; 5 - разматыватель; 6 - рабочий стол с входной стороны; 7 - станина; 8 - универсальный шпindelь; 9 - нажимные винты; 10 - рабочий стол с выходной стороны; 11 - бак с водой модели моталки; 12 - барабан моталки; 13 - шкив-вариатор; 14 - ремень привода моталки; 15 - защитный кожух.
Рисунок 2 - Расположение модели моталки относительно прокатного стана «Дуо-100»

Эксперименты проводились на трех размерах сопел: 0,7 мм; 0,9 мм; 1,1 мм. С помощью секундомера и мерной посуды определено, что при давлении в сети подачи воды 0,38 МПа расход воды через сопло диаметром 0,7 мм составляет 1 л/мин. Увеличение диаметра до 0,9 мм и 1,1 мм приводит к пропорциональному росту площади сопел и увеличению расхода воды до 1,6 л/мин. Проведенные испытания смотки на лабораторной модели моталки с гидравлическим формированием рулонов полностью подтвердили наши предположения, изложенные в [8].

Ниже приведены рассчитанные значения наиболее важных характеристик.

Определенные значения усилия поджатия полосы со стороны роликодержателя (кассеты), необходимого для преодоления упруго-пластического сопротивления сматываемого листа, приведены в таблице 1.

Далее были определены все параметры подачи воды для гидравлического формирования рулона (рисунок 3). В расчетах исходили из того, что для смотки узких полос шириной 0,8 м используются три коллекторных линии, при ширине 1,2 м – пять, а при 1,5 м – семь линий. Исходя из расстановки сопел по окружности моталки, путем деления суммарных усилий в одной линии расстановки сопел на их количество, определили расчетное усилие струи, выходящей из одного сопла (таблица 2).

Таблица 1 - Суммарное усилие на один коллектор, Н

Толщина, м \ Ширина, м	0,0018	0,003	0,006
0,8	1258,9	2301,6	6633,9
1,2	1888,3	3461,6	9583,9
1,5	2243,4	4490,6	12350,8

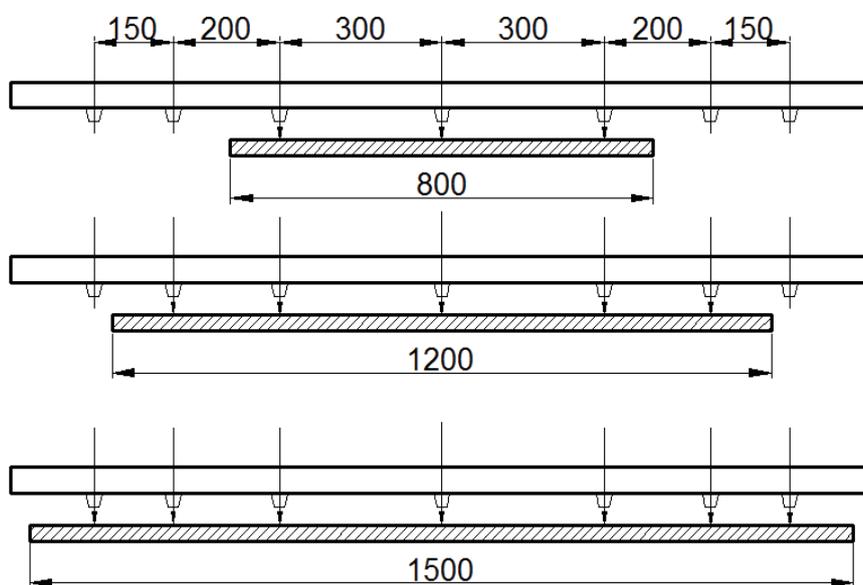


Рисунок 3 - Расположение сопел по ширине полос

Таблица 2 - Усилие струи, выходящей из одного сопла, Н

Толщина, м \ Ширина, м	0,0018	0,003	0,006
0,8	162,4	429,2	1654,3
1,2	146	386,6	1488,8
1,5	130,4	345,2	1329,3

Для проведения дальнейших расчетов произвольно задались параметрами щелей: ширина щелей $h = 10$ мм и 5 мм, длина $b = 100$ мм. Величины давления в системе, необходимые для создания рассчитанного значения усилия, приведены в таблице 3.

Таблица 3 - Результаты расчета давления воды, Па

Толщина, м \ Ширина, м	0,0018	0,003	0,006
0,8	$0,3 \cdot 10^6$	$0,7 \cdot 10^6$	$2,7 \cdot 10^6$
1,2	$0,24 \cdot 10^6$	$0,6 \cdot 10^6$	$2,4 \cdot 10^6$
1,5	$0,22 \cdot 10^6$	$0,56 \cdot 10^6$	$2,2 \cdot 10^6$

Для определения среднесуточного расхода воды учитывались следующие параметры. При максимальной производительности прокатного стана обрабатывается 330 полос в смену. Смотка в период захвата полосы барабаном моталки и на конечной стадии, когда работают формирующие ролики, составляет около 20 с. В сутки это составит $330 \times 3 \times 20 = 19800$ с = 5,5 часов. Расход воды при максимальном давлении воды в коллекторе $2,7 \cdot 10^6$ Па и $4,3 \cdot 10^6$ Па, при смотке полос толщиной 6 мм (0,006 м) и шириной 0,8; 1,2 и 1,5 м приведен в таблице 4.

Таблица 4 - Расход воды на формирование рулонов горячекатаной стали различной ширины

Ширина полос, м	Вид определения	Расход воды
0,8	Моментальный, кг/с	687
0,8	Среднесуточный, м ³ /ч	569,6
1,2	Моментальный, кг/с	652,5
1,2	Среднесуточный, м ³ /ч	540,5
1,5	Моментальный, кг/с	616,6
1,5	Среднесуточный, м ³ /ч	510,8

Приведенные выше результаты расчетов необходимого давления и расхода воды дают значения этих характеристик вполне достижимые для технических устройств, используемых в прокатных цехах. Максимальное необходимое давление воды, согласно расчетам, равно $2,7 \cdot 10^6$ Па.

Внедрение данного предложения, оформленного в виде патента Республики Казахстан [8], как ожидается, даст предприятию значительную экономию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Паршин В.С., Костров В.П. и др. Машины и агрегаты для обработки цветных металлов и сплавов. – Москва: Металлургия, 1988. - 400 с.
2. Целиков А.И., Смирнов В.В. Прокатные станы. – Москва: Металлургия, 1960. 432 с.
3. Макагон В.Г., Фомин Г.Г., Гринчук П.С., Глазков В.С. Механическое оборудование широкополосных станов горячей прокатки. М.: Металлургия, 1969. -240с.
4. Заявка № 2096973 Великобритания. Устройство заправки металлической полосы в моталку. Оpubл. 27. 10. 82.
5. Давильбеков Н.Х., Клементьев В.А., Курапов Г.Г. Особенности работы моталок стана 1700 горячей прокатки Карметкомбината. Металлургические машины и оборудование. Алматы, КазНТУ, 1997

6. Давильбеков Н.Х., Курапов Г.Г., Ескулов С.С., Елемесов К.К. Устройство моталок для смотки полос. Технология производства и обработки черных металлов, Алматы, Изд. Методич. литературы, 1997
7. Давильбеков Н.Х., Курапов Г.Г., Елемесов К.К. Совершенствование работы моталок широкополосных станов. Труды международного симпозиума, посв. 100 летию К.И. Сатпаева. Алматы, КазНТУ, 1999. С.268-270.
8. Патент РК №6363. Давильбеков Н.Х., Курапов Г.Г., Пепеляев И.В., Ескулов С.С., Клементьев В.А., Мизюрин В.В., Колынюк Е.П., Елемесов К.К. Способ смотки на барабан моталки полосового стана.

АВТОРЫ

Елемесов К.К. кандидат технических наук, профессор. Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева.

Абсадыков Б.Н. доктор технических наук, профессор, Институт химических наук имени А.Б. Бектурова.

Бекмуханбетова Ш.А. доктор PhD, Казахская автомобильно-дорожная академия имени Л.Б. Гончарова.
А. кандидат технических наук. Казахская автомобильно-дорожная академия имени Л.Б. Гончарова.

Сапарбаев Е.Т. Казахский национальный аграрный университет.

Смаилова Г.А. кандидат технических наук. Казахский национальный аграрный университет.

AUTHORS

K.K. Elemesov K. I. Satpayev Kazakh National Research Technical University

B.N. Absadykov A. A. B. Bekturov Institute of Chemical Sciences

Sh.A. Bekmukhanbetova L. B. Goncharov Kazakh Automobile Road Academy

U.A. Murzakhmetova L. B. Goncharov Kazakh Automobile Road Academy

E.T. Saparbaev Kazakh National Agrarian University

G.A. Smailova Kazakh National Agrarian University

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ВАЛА
ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА ДЛЯ ПЕРЕКАЧКИ
АГРЕССИВНЫХ СРЕД**

**FORECASTING OF DURABILITY THE SHAFT OF
THE CENTRIFUGAL PUMP FOR TRANSFER OF HOSTILE LIQUID**

**ИСАМЕТОВА М.Е., МАШЕКОВ С.А., АБСАДЫКОВ Б.Н.,
БОРОВИК И.И., НУСИПАЛИ Р.К.**

*(КазННТУ имени К.И. Сатпаева, г. Алматы, Казахстан,
АО «ИХН имени А.Б. Бектурова» г. Алматы, Казахстан,
Машиностроительный завод KARLSKRONA LC AB, г. Шымкент, Казахстан)*

**ISAMETOVA M.E., MASHEKOV S.A., ABSADYKOV B.N.,
BOROVIC I.I., NUSIPALI R.K.**

*(K.I. Satpayev KazNRTU, Almaty, Kazakhstan,
«A.B. Bekurov ICS» JSC, Almaty, Kazakhstan,
KARLSKRONA LC AB machine-building plant, Shymkent, Kazakhstan)*

***Аннотация.** В статье рассмотрен автоматизированный расчет одной из ответственных частей центробежного насоса – вала ротора. Для анализа использована САПР высшего уровня NASTRAN модуль PATRAN. Составлена расчетная механическая схема, определены осевая и радиальная силы, действующие на рабочее колесо и вал насоса. Определены напряжения для случаев нулевой и максимальной подачи. Результаты автоматизированного прочностного расчета использовались для дальнейшего анализа долговечности вала ротора центробежного насоса.*

Приведена методика определения долговечности вала с проектируемым сроком службы, равным сроку наработки урановой скважины. Определен коэффициент запаса долговечности, который показал работоспособность насоса на всем периоде наработки урановой скважины.

***Abstract.** In article are considered the automated calculation of one of responsible parts of the centrifugal pump – a rotor shaft. For the analysis the CAD of the highest level of NASTRAN the PATRAN module has been used. The settlement mechanical scheme is made, are defined axial and radial force acting on the driving wheel and a shaft of the pump. Tension for cases of zero and maximum giving is determined. Results of the automated strength calculation were used for the further analysis of durability of a shaft of a rotor of the centrifugal pump.*

The technique of determination of durability of a shaft with the projected service life of an operating time of the uranium well equal to term is given. The durability stock coefficient which has shown operability of the pump on the entire period of an operating time of the uranium well is defined.

***Ключевые слова:** погружной центробежный насос, ротор, вал, прочность, долговечность, NASTRAN.*

***Keywords:** submersible centrifugal pump, rotor, shaft, durability, longevity, NASTRAN.*

Способ подземного выщелачивания

Способ прямого подземного выщелачивания (СПВ) обычно используют при добыче урана. Раствор серной кислоты низкой концентрации, либо другой окисляющий агент (например, насыщенная кислородом воздуха пластовая вода) закачивается через нагнетательную скважину в пласт и фильтруется сквозь ураносодержащую породу, растворяя её поэтапно. Затем обогащенный металлом раствор откачивается на поверхность через откачную скважину, оставляя, в основном, нетронутым подземную горную систему, т.е. добыча металла ведется на месте залегания руд. Впоследствии уран извлекается на специальном технологическом оборудовании (сорбция на ионообменную смолу), а выщелачивающий раствор рециркулируется. Прежде чем повторно подать выщелачивающий раствор в пласт, его обогащают выщелачивающими реагентами.

На долю скважинного подземного выщелачивания приходится около 20% всего мирового уранового промысла. Лидерство удерживают подземные рудники (40%) и открытые карьеры (30%). Однако о многом говорит тот факт, что методу СПВ отдают предпочтение такие уранодобывающие страны, как США, Узбекистан и безусловный лидер отрасли – Казахстан [1].

Насосы – один из ключевых элементов технологии подземного выщелачивания: они задействованы на всех стадиях добычи. Именно поэтому на первое место при подборе оборудования выходят его качество и долговечность – перерывы в работе недопустимы, так же, как и слишком малое количество часов наработки. Ведь в последнем случае насосы придётся часто менять, а это дополнительные финансовые и временные затраты [2].

Электро-центробежные насосы обладают большей экономичностью и наименее трудоемки при техническом обслуживании в сравнении с добычей с использованием компрессора и подъемом жидкости насосами других типов. При существенных подачах затраты на электроэнергию и на установку относительно невелики.

В практике проектирования насосов размеры центробежных чаще всего задают не из условия прочности, а из конструктивных соображений и в зависимости от технологических возможностей. Кроме того, новые насосы обычно проектируют на базе апробированных прототипов. Поэтому при проектировании основное значение имеет проверочный расчет на прочность основных элементов конструкции насоса: вала, рабочего колеса, корпуса, шпоночного или штифтового соединения, муфты [3].

Задача проверочного расчета заключается в определении значений параметров, с которыми в каждом конкретном случае связана потеря прочности (разрушение) того или иного элемента (нормальных или касательных напряжений, деформаций, частоты вращения и т.п.) с последующим сравнением их с некоторыми предельными допустимыми значениями.

Автоматизированный расчет на прочность роторного вала насоса был проведен в программном приложении NASTRAN / PATRAN.

Для расчета была смоделирована расчетная механическая схема согласно нижеследующей методике.

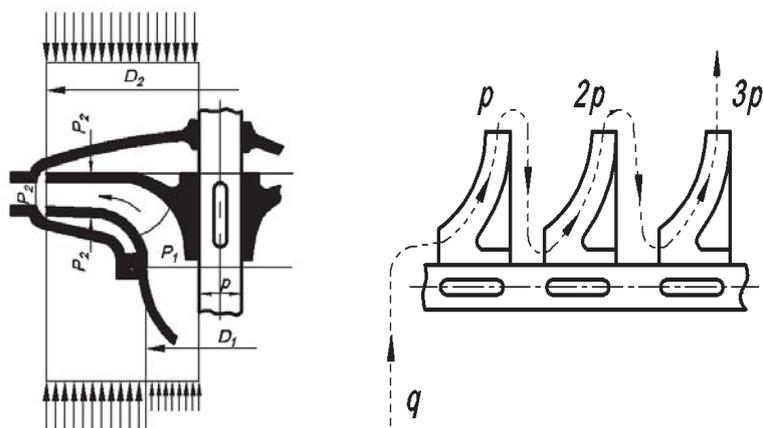


Рисунок 1. Расчетная схема:
 а) ступени насоса б) распределение давлений в ступенях насоса

На ступень насоса действуют осевая и радиальная силы. Осевая сила, действующая на рабочее колесо насоса, представляет собой равнодействующую сил, оказывающих влияние на колесо, и направлена в сторону, соответствующую направлению действия большей из этих сил.

Расчет сил, действующих на рабочие колеса

Проверка на статическую прочность вала проводится по наибольшим нагрузкам, которые могут возникнуть на различных режимах работы насоса, – это режим с нулевой подачей (или близкой к нулевой) и режим с максимальной подачей, допускаемой при эксплуатации.

Силы давления на рабочее колесо, вращающееся в корпусе насоса, заполненном жидкостью, могут быть найдены из следующих соображений.

Осевое усилие приближенно можно определить как разность сил давления справа и слева в пределах от R_1 до R_b [4]:

$$P_{\text{осевая}} = \frac{\pi}{4(R_1^2 - R_b^2)} H \cdot \gamma$$

где $P_{\text{осевая}}$ – осевое усилие в Н; R_1 – наружный радиус входного отверстия рабочего колеса в м; R_b – радиус вала в м; H – напор насоса в м, γ – объемный вес жидкости в кг/м^3 .

Учитывая, что центробежный насос предназначен для закачивания серной кислоты, плотность которой 1050 кг/м^3 , найдено значение осевой силы.

Таким образом, осевая сила определяется произведением разности между конечным давлением, которое создает насос (p_2), и начальным давлением на всасывании (p_1), умноженной на площадь живого сечения потока при входе в рабочее колесо.

Согласно вышеприведенной методике были просчитаны два варианта осевой силы, наиболее нагруженные режимы, для случая нулевой подачи – период пуска машины и период максимальной подачи.

Нулевой режим является критическим по причине особенности крепления нижнего конца вала. До заполнения полости насоса систему можно рассматривать как консольную систему, что видно на схеме, приведенной ниже. После заполнения полости насоса жидкостью свободный конец становится закрепленным в гидродинамический подшипник, в котором непосредственную нагрузку от вала воспринимает тонкий слой перегоняемой среды.

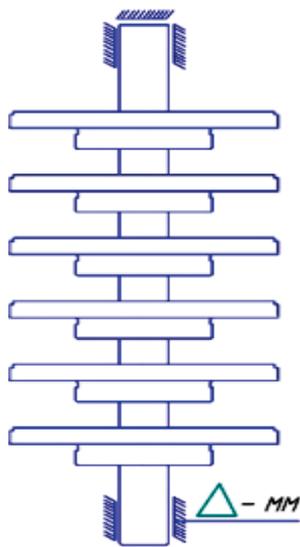


Рисунок 2. Схема центробежного насоса

Определение радиальной силы

Основной причиной прогиба вала является радиальная сила. Для центробежных насосов без спирального отвода и при соединении секций стяжками радиальная сила возникает от динамической неуравновешенности ротора.

Динамическая неуравновешенность ротора является следствием неточности изготовления деталей ротора (в первую очередь, имеющих большие радиальные размеры, например, рабочих колес). Наличие дисбаланса деталей ротора при его вращении приводит к появлению динамических нагрузок.

Определить силу при известном остаточном дисбалансе колеса можно по следующей формуле:

$$R_{\text{д}} = m\epsilon\omega^2$$

где mR_2 – допускаемый достаточный дисбаланс колеса, кг·м (например, выражение «допускаемый остаточный дисбаланс 100 г·мм» означает, что для колеса радиусом 100 мм балансировку по внешнему радиусу следует проводить с точностью до 1 г, что технологически достижимо); ω – угловая скорость вращения ротора насоса, 1/с [5].

Эксцентриситет при различных диаметрах рабочего колеса

Наружный диаметр рабочего колеса, мм / Impeller outer diameter, mm	< 300	300-500	500-1000	1000-2000
Эксцентриситет, мм / Eccentricity, mm	0,075	0,100	0,150	0,200

Для расчета радиальной силы от дисбаланса использованы возможности SolidWorks по определению массы 3D модели. В нашем случае – для семи секций $m = 5,43$ кг.

Учитывая принцип суперпозиций сил, радиальную силу рассчитали как сумму сил от дисбаланса на каждой ступени ротора.

Принимая во внимание схему распределения давления по ступеням центробежного насоса (рисунок 3), и, используя вышеприведенную методику расчета радиальных и осевых нагрузок, определили граничные условия. Входные данные для моделирования прочности роторного вала и колес приведены ниже:

№	Параметр	Значение
1	Материал	Сталь
2	Модуль упругости, E	$2 \cdot 10^{11}$ Па
3	Коэффициент Пуассона	0,3
4	Опора 1	Шарнир с поворотом вокруг оси модели
5	Опора 2	Шарнир с поворотом вокруг оси модели
6	$P_{осевая} = 232\text{Н}$ $P_2_{осевая} = 464\text{Н}$ $P_3_{осевая} = 696\text{Н}$ $P_4_{осевая} = 928\text{Н}$ $P_5_{осевая} = 1160\text{Н}$ $P_6_{осевая} = 1392\text{Н}$ $P_7_{осевая} = 1624\text{Н}$	
7	Сила радиальная	744 Н
8	Тип расчета	Статический

Результаты проверочного расчета

Геометрическая модель создавалась непосредственно в PATRAN. Сетка была сгенерирована из ТЕТ-элементов, силы прикладывались в радиальном и осевом направлении.

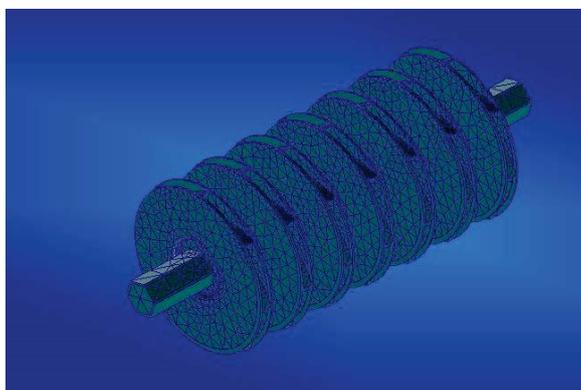


Рисунок 3. Конечно-элементная модель вала насоса

В модели создавались два случая загрузки LOADCASE, первый, включающий суммарную нагрузку от осевой и радиальной составляющих, второй – только от силы, вызванной дисбалансом системы. Разбиение загрузки на два случая необходимо для оценки вклада каждой из сил в напряженно-деформированное состояние ротора вала центробежного насоса [6].

Результаты расчета эквивалентных напряжений показаны на рисунке 4.

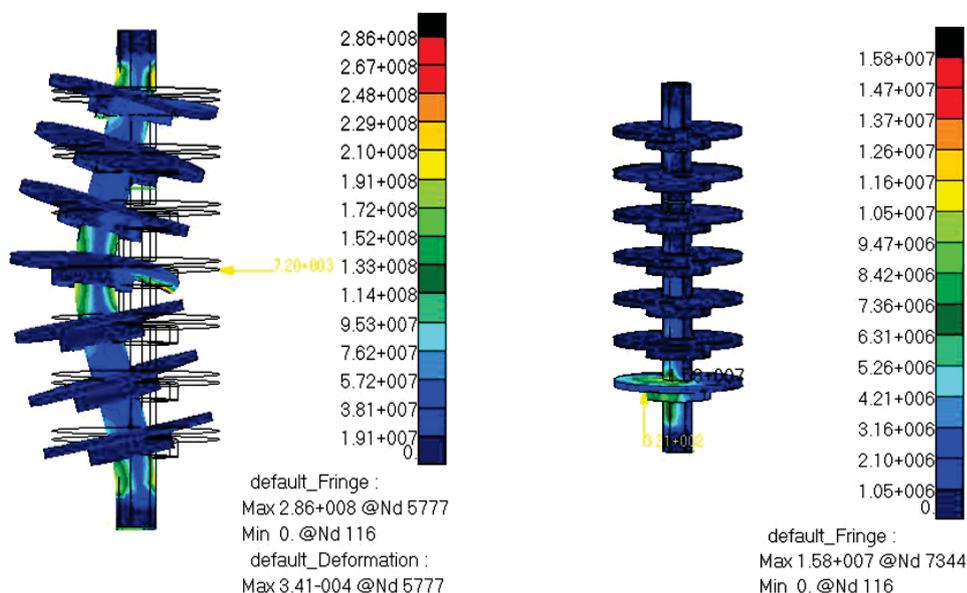


Рисунок 4. Карта напряжений для нулевой и максимальной подачи

Анализ результатов показал достаточный коэффициент запаса прочности при максимальной подаче, согласно диаграмме $\sigma_{\max} = 286$ МПа, допустимое напряжение для стали 40Х $[\sigma] = 680$ МПа, коэффициент запаса прочности составил 2,37.

Расчет долговечности вала ротора центробежного насоса

При длительной эксплуатации, кроме расчетных, возможно появление и дополнительных нагрузок, которые снижают усталостную прочность деталей.

При накоплении усталостных повреждений на поверхности валов ротора могут начаться процессы разрушения. При эксплуатации центробежного насоса знакопеременный цикл нагружения дает нагрузка от остаточного дисбаланса, которая в расчетной схеме была учтена как радиальная сила, действующая на ротор.

Срок службы ротора вала определяется износом; после шести тысяч часов работы производится захоронение насосов в скважине.

Расчет долговечности производился по методике [6], в результате выполнения которой должны быть определены коэффициент запаса по усталостной долговечности деталей по отношению к проектному (нормативному) сроку службы, за этот параметр принимается наработка урановой скважины в объеме 6000 часов.

Исходные данные для расчета на долговечность

Материал вала ротора – сталь 40X, $\sigma_B = 680$ МПа - временное сопротивление, $\sigma_{0,2} = 520$ МПа - условный предел текучести, $\sigma_{-1} = 460$ МПа - предел выносливости, $m = 4$ - характеризует угол наклона кривой Веллера, $N_G = 10^7$ циклов.

Коэффициент комплексного учета конструкторско-технологических факторов определен предварительно: $K_{\sigma D} = 2,1$. Коэффициент влияния асимметрии $\psi_\sigma = 0,2$.

Цикл напряжений – период и размах – показан на рисунке 5.

Коэффициент запаса по статической прочности равен:

$$n = \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_{\max}} = \frac{680}{286} = 2,37$$

Число циклов, которое деталь нарабатывает в течение проектного срока:

$$N_p = \frac{3600}{0,12} \cdot 6000 = 1,6 \cdot 10^7$$

Поскольку базовое число циклов кривой усталости для стали 40X значительно превосходит проектную долговечность ($N_G \gg N_p$), то с точки зрения усталости целесообразно допустить работу детали в области ограниченной долговечности, когда $(\sigma_{1aЭ})_D > \sigma_{-1}$.

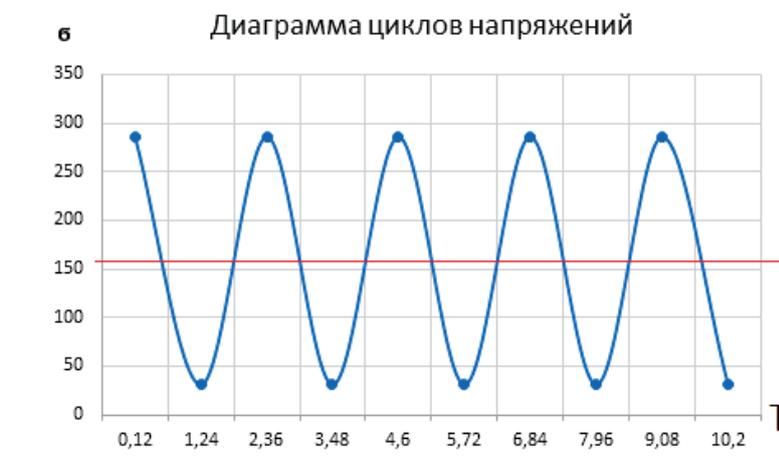


Рисунок 5. Цикл напряжений

Определение параметров цикла и приведение к эквивалентной амплитуде напряжений МПа

Значения максимальных и минимальных напряжений были выбраны из диаграммы статического расчета.

$$\sigma_a = \sigma_m = \frac{\sigma_{\max} \pm \sigma_{\min}}{2} = \frac{286 + 31}{2} = 158 \text{ МПа}$$

Амплитуда эквивалентного цикла:

$$(\sigma_{\text{экв}})_{\text{Д}} = + \psi_{\sigma} \cdot \sigma_m = 2,1 \cdot 158 + 0,2 \cdot 158 = 347 \text{ МПа} .$$

Полученное значение показывает, что условие, необходимое для работы деталей в области ограниченной долговечности, выполняется.

Определение коэффициента запаса по усталостной долговечности

Расчетная долговечность детали по усталостной прочности составляет:

.

Коэффициент запаса усталостной долговечности детали по отношению к проектной равен:

.

Коэффициент запаса долговечности указывает на то, что насос может эксплуатироваться до полной наработки скважины.

ВЫВОДЫ

1. Составлены расчетные механические схемы для определения напряженно-деформируемого состояния вала ротора центробежного насоса.

2. Построена 3D модель ротора семиступенчатого центробежного насоса.

3. Определены уровни напряжений для нулевой и максимальной подачи: $\sigma_{\text{max}} = 286 \text{ МПа}$ для максимальной подачи, $\sigma_{\text{min}} = 158 \text{ МПа}$ – для минимальной подачи.

4. Оценены долговечность вала ротора насоса для проектируемого срока службы 6000 часов, коэффициент запаса долговечности составил: $n_{\sigma} = 1,6$, что удовлетворяет условию полной наработки скважины.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бобровский А.О. Добыча урана методом скважинного подземного выщелачивания. www.geokniga.org
- [2] Добыча урана методом скважинного подземного выщелачивания: технологии и используемое оборудование. www.i-mash.ru
- [3] Кельзон А.С., Журавлев Ю.Н., Январев Н.В. Расчет и конструирование роторных машин. Л.: «Машиностроение» (Ленинград, отд-ние) - 1977, - 288 с.
- [4] Кузнецов А.В., Панайотти С.С., Савельев А.И. Автоматизированное проектирование многоступенчатого центробежного насоса. Калуга, 2017.
- [5] Основы балансировки роторов. Электронный учебник. www.baltech.ru
- [6] Жилкин В.А. Азбука инженерных расчетов в MSC Patran-Nastran-Marc. Учебное пособие. С-Пб.: Проспект науки - 2013, - 572 с.
- [7] Березин И.Я., Чернявский О.Ф. Усталостное разрушение металлов и расчеты на прочность и долговечность при переменных напряжениях. Учебное пособие. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2002, с. 47.

АВТОРЫ

Исаметова Мадина Есдаuletовна – кандидат технических наук, ассоциированный профессор; Казахстан, г. Алматы, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева»

Машеков Серик Акимович - доктор технических наук, профессор Казахстан, г. Алматы, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева»

Абсадыков Бахыт Нарикбаевич - доктор технических наук, профессор, Член-корреспондент Национальной Академии Наук Республики Казахстан Казахстан, г. Алматы, АО «Институт химических наук имени А.Б. Бектурова»

Боровик Иван Игоревич - главный конструктор, Казахстан, г. Шымкент мкр. Тассай, 119 квартал, 105 участок, машиностроительный завод KARLSKRONA

Нусипали Роллан Карсонович - магистр техники и технологии, Казахстан, г. Алматы, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева»

AUTHORS

Isametova Madina Esdauletovna - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; Kazakhstan, Almaty, Kazakh National Research Technical University named after KI Satpayev

Mashekov Serik Akimovich - Doctor of Technical Sciences, Professor Kazakhstan, Almaty, Kazakh National Research Technical University named after KI Satpayev

Absadykov Bakhyt Narikbayevich - Doctor of Technical Sciences, Professor, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan Kazakhstan, Almaty, JSC "Institute of Chemical Sciences named after AB. Bekturov"

Borovik Ivan Igorevich - Chief Designer, Kazakhstan, Shymkent md. Tassay, 119 quarter, 105 section, engineering plant KARLSKRONA

Nusipali Rolland Karsonovich - Master of Engineering and Technology, Kazakhstan, Almaty, Kazakh National Research Technical University named after KI Satpayev

**МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВЫБОРА КОНСТРУКЦИОННОГО
МАТЕРИАЛА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СТАЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ**

**METHODOLOGICAL ASPECTS OF STRUCTURAL MATERIAL
SELECTION IN THE PRODUCTION OF STEEL PARTS**

КАРТОНОВА Л.В.

*(Владимирский государственный университет
им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, г. Владимир, Российская Федерация),*

KARTONOVA L.V.

*(Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs,
Vladimir, Russia)*

Аннотация. Обсуждается проблема выбора материала для стальных деталей. Даны практические рекомендации по выбору материала для изготовления стальных деталей.

Abstract. The problem of material selection for steel parts is discussed. Practical recommendations on material selection for the manufacture of steel parts are given.

Ключевые слова: выбор материалов, методология выбора марки стали.
Keywords: materials selection, the methodology for selecting steel grades.

Проблема выбора оптимального материала при производстве различных по своему назначению деталей не теряет своей актуальности. До их пор нет единой методики выбора такого материала, существуют общие требования и рекомендации. Одним из таких требований, которое обеспечивает работоспособность материала, является эксплуатационная надежность деталей. При выборе материала некоторые общие положения могут быть сформулированы следующим образом – материал можно считать выбранным правильно, если он наилучшим образом отвечает трем основным требованиям: эксплуатационной надежности, технологичности и экономичности [1].

Для рационального выбора материала при изготовлении стальных деталей рекомендуется следующая последовательность [2]:

- определение характера и условий нагружения, возможных причин выхода из строя, т.е. анализ условий работы детали;
- установление эксплуатационных требований, предъявляемых к детали;
- определение группы сталей, отвечающей этим требованиям;
- установление в выбранной группе конкретной марки стали, которая после соответствующей термообработки будет удовлетворять заданным свойствам и требованиям;

- назначение оптимального вида упрочняющей термической и химико-термической обработки для обеспечения необходимых требований.

Прежде всего следует установить, какой вид нагрузки испытывает деталь. При этом возникает сложность определения количественного значения ведущей характеристики.

При равномерном воздействии по всему сечению растягивающих и сжимающих напряжений целесообразно использование упрочняющей термической обработки. С увеличением сечения детали необходимо учитывать степень легирования стали для обеспечения сквозной прокаливаемости.

В случае, если деталь работает в условиях крутящей или изгибающей нагрузки, то, как правило, сердцевина детали в меньшей степени или совсем не подвергается воздействию напряжений. Поэтому целесообразно применять следующие стали:

- цементованные или нитроцементованные стали, содержащие до 0,3% углерода;

- азотированные стали, содержащие углерода около 0,4%;
- стали пониженной прокаливаемости – 0,5-0,6% углерода;
- стали, используемые для поверхностного упрочнения.

Однако в современном машиностроении сердцевина детали может находиться в сложнапряженном состоянии, то есть испытывать значительные напряжения. Поэтому в этом случае необходимо обеспечить и прочность сердцевины. Например, в качестве цементуемой стали можно использовать цементуемые стали с сильно упрочняемой сердцевиной – 18ХГТ, 12Х2Н4А.

Не исключены ситуации, когда конструктор сомневается в правильности установленных предельных значений напряжений. В следствии этого возникает соблазн увеличения запаса прочности. Опыт термической обработки показывает, что увеличение запаса прочности более, чем в 1,5-2 нецелесообразно.

При выборе сталей, разрушающихся вязко, как правило ведется расчет на соответствие рассчитанных напряжений и условного предела текучести при условии обеспечения приемлемого запаса вязкости, что гарантирует малую вероятность хрупкого разрушения. В случае выбора стали со смешанным или хрупким разрушением основным критерием является K_{1c} . Однако значение K_{1c} справочно приводится не для всех сталей.

Увеличение прокаливаемости в стали достигается за счет легирования [3, 4, 5], поэтому для деталей крупных сечений обосновано использование легированных сталей, но это повлечет удорожание изделия. Наиболее важными для теории легирования являются вопросы о механизме упрочнения и целенаправленного выбора легирующих элементов [6].

Как известно, повышение прочности металлических сплавов в сравнении с чистыми металлами достигается увеличением сил трения при движении дислокаций, образованием примесных атмосфер и изменением дислокационной структуры легирования [6]. Это вызвано в основном упругим взаимодействием скользящих дислокаций с растворенными атомами.

При выборе стали, подвергающейся упрочняющей термической обработке, следует иметь в виду, что образование избыточных карбидов снижает прокаливаемость. По возрастанию сродства к углероду и устойчивости карбидных фаз карбидообразующие элементы располагаются в следующей последовательности [7]: *Fe, Mn, Cr, Mo, W, Nb, V, Zr, Ti*.

Способность к карбидообразованию представлена в таб.1.

Таблица 1. Способность к карбидообразованию

Легирующий элемент	Способность к карбидообразованию	Примечание
Mn, Al, Si, Ni, Co, Cu	Некарбидообразующие элемент	Марганец не образует в сталях самостоятельных карбидов
Mo, W	Карбидообразующие элементы	Уменьшение склонности к отпускной хрупкости
Nb, V, Ti	Сильные карбидообразователи	В сталях, содержащих марганец, никель, хром, применяют для измельчения зерна Необий повышает коррозионную стойкость

Степень влияния карбидов на рост зерна аустенита принято считать пропорциональной устойчивости этих карбидов. При небольшом содержании алюминий, образующий труднорастворимые оксиды и нитриды, также препятствует росту зерна.

Следует понимать, что с увеличением содержания карбидообразующих элементов, которые не смогут раствориться в цементите, замещая часть атомов железа, начнется образование специальных карбидов. Твердость и прочность стали увеличивается с повышением степени дисперсности карбидов.

Для достижения высоких прочностных свойств, ударной вязкости, прокаливаемости, достаточной пластичности, рекомендуют выбирать конструкционные стали, легированные никелем и хромом. Однако, никель является дефицитным легирующим элементом, что повлечет некоторое увеличение стоимости.

При выборе легированной стали необходимо также учитывать возникновение отпускной хрупкости II рода, которая обнаруживается в среднеуглеродистых сталях после отпуска выше 500⁰С. Однако не все легированные стали склонны к этому виду дефекта. Как известно, карбидообразующие элементы (хром, марганец, никель и др.), используемые при легировании приводят к возникновению отпускной хрупкости. Следует отметить, что использование небольшого количества молибдена (0,5-0,6%) препятствует возникновению данного вида дефекта.

Кроме того, для эффективного устранения склонности к отпускной хрупкости II рода следует применять так называемые чистые стали по фосфору и по примесям внедрения (кислорода, азота, водорода).

Как правило, повышение прочности металлического сплава приводит к снижению способности воспринимать пластическую деформацию. Такой материал чувствителен к любому роду концентраторов напряжений (отверстиям, пазам и т.п.). При этом так же снижается ударная вязкость. Для оценки надежности разного рода деталей использовался критерий Лэнкфорда, однако он не учитывает поведение металла под нагрузкой. Позднее был предложен более совершенный критерий – работоспособность по Беренову. При определении обоих критериев учитывается как прочность материала, так и его пластичность.

Следует иметь в виду, что высокопрочные стали имеют повышенную чувствительность к концентраторам напряжений, водородной хрупкости и коррозии под напряжением [8].

Рациональный выбор материала предполагает обеспечение оптимального сочетания требований конструирования и возможностями материала. Задача упрощается, когда требуется достижение одной цели. Однако при выборе материала, как правило, необходимо обеспечить несколько целей.

В работах [9, 10, 11] предложены методы оптимального выбора параметров для достижения одновременно нескольких целей, в которых предлагается определение критериев выбора материала, характеризующих каждую цель.

По сути, выбор материала для деталей с заданными свойствами является многофакторной и многовариантной задачей, поэтому целесообразно использование современных информационных сред. Интерес представляет программный комплекс выбора марки сталей [12, 13], разработанный доцентом И.М. Мальцевым из Нижегородского государственного университета, который используется и в других вузах [14].

С появлением новой вычислительной техники трудности непосредственных вычислений отпали, однако могут возникать ошибки, связанные с надежностью таких расчетов. В работе [15] наглядно показано, чем больше точность расчетов, тем меньше его надежность, поэтому необходимо логическое осмысливание выполняемых расчетов.

При выборе материала также необходимо учитывать технологические свойства выбранной марки стали. Как известно, наиболее дешевым способом изготовления деталей сложной формы является литье, но литые детали могут не иметь высокой конструкционной прочности. Поэтому если эксплуатационные требования не позволяют использовать литье, необходимо подобрать сталь, обладающую хорошей обрабатываемостью давлением. При этом следует учитывать наследственное зерно и красноломкость. По сути, устанавливается соответствие технологических свойств выбранного материала с возможностями конкретного производства. Далее проводится оценка экономической эффективности изготовления изделия из выбранного материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Картонова Л.В. О проблеме рационального выбора материала // Литые материалы и ресурсосберегающие технологии: сб. тр. науч.-техн. конф., посвящ. 50-летию каф. «Литейные процессы и конструкционные материалы». 9–12 дек. 2013 г., Владимир / под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. В.А. Кечина; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых;

- Владим. регион. отд. Рос. ассоц. литейщиков; Владим. регион. отд. Рос. акад. естеств. наук. – Владимир: Изд-во ВлГУ, 2014. – с. 157-161.
2. Картонова Л.В. Практические рекомендации по выбору материала для изготовления стальных деталей. Сборник статей XV международной научно-практической конференции, часть I Москва: «Научно-издательский центр «Актуальность.РФ», 2018. – с. 51-52, ISBN 978-5-6041034-1-8
 3. Зоткин В.Е. Методология выбора материалов и упрочняющих технологий в машиностроении. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: ИД «Форум»: ИНФРА-М, 2017. – 320 с.
 4. Иванов Г. П. Надежность материала в прочностных расчетах (вопросы и ответы) / Г. П. Иванов [и др.]; под ред. Д. В. Бушенина. – Владимир: Посад, 2002. – 88 с.
 5. Callister W.D., Rethwisch D.G. Materials Science and Engineering. An introduction. 9th Edition. – Wiley, 2014. – XXIV, 962 p. – ISBN: 978-1-118-47770-0, ISBN: 978-1-118-32457-8.
 6. Золоторевский В.С. Механические свойства. – 2-е изд. М.: Металлургия, 1983. – 352 с.
 7. Металлы и сплавы. Справочник. – С.-Пб.: АНО НПО «Профессионал», АНО НПО «Мир и Семья», 2003. – 1090 с.
 8. Рогов В. А. Современные машиностроительные материалы и заготовки / В. А. Рогов [и др.]. – М.: Академия, 2008. – 330 с. – ISBN 978-5-7695-4254-1.
 9. Ashby M.F., Jones D.R.H. Engineering Materials 1: An Introduction to Properties, Applications and Design - 3rd Edition. – Butterworth-Heinemann, 2005. – 438 p. – ISBN-10: 0750663804.
 10. Ashby M.F., Jones D.R.H. Engineering Materials 2: An Introduction to Microstructures, Processing and Design –3rd Edition. – Butterworth-Heinemann, 2005. – 464 p. – ISBN-10: 0750663812.
 11. Эшби М.Ф. Инженерные свойства материалов. Многоцелевая оптимизация при конструировании и выборе материалов– Пер. с англ. под ред. В.Н. Чувильдеева. – Нижний Новгород: Изд-во ННГУ, 2005. – 52 с.
 12. Мальцев И.М., Седунов А.Н. Программный комплекс «СТАЛЬ»//Вестник машиностроения, 2009, №6, - С. 92-93.
 13. Мальцев И.М., Седунов А.Н. Программный комплекс выбора марки машиностроительной стали// Металловедение и термическая обработка металлов 2010. № 2, с. 37-39.
 14. Методология выбора металлических сплавов и упрочняющих технологий в машиностроении: учебное пособие : в 2 т. Т. I. Стали и чугуны / М. А. Филиппов, В. Р. Бараз, М. А. Гервасьев, М. М. Розенбаум. – 2-е изд., испр. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2013. – 232 с.–ISBN 978-5-7996-0928-3 (т. I)
 15. Иванов Г. П. Надежность материала в технических расчетах / Г. П. Иванов [и др.]; под ред. Д. В. Бушенина. – Владимир: Посад, 2002. – 128 с.

АВТОР

Картонова Любовь Владимировна, к.т.н., доцент, г. Владимир, ул. Горького, 87, кафедра «Технологии функциональных и конструкционных материалов», тел. (4922) 47-98-21, e-mail: lkart33@gmail.com

AUTHOR

Kartonova LyubovVladimirovna, Candidate of Technical Science, Assoc. Prof., 600000, Vladimir, Gorky St., 87, Department of Functional and Constructional Materials Technology, tel. (4922) 47-98-21, e-mail: lkart33@gmail.com

**ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ПУТЁМ
РЕГЛАМЕНТИРОВАННОЙ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ**

**INCREASING DURABILITY OF DETAILS BY REGULATED
TRIMMING PROCESSING**

ЛЕБЕДЕВ В.А.

*(Донской государственной технической университет,
Ростов-на-Дону, Россия)*

ПАСТУХОВ Ф.А.

*(Донской государственной технической университет,
Ростов-на-Дону, Россия)*

LEBEDEV V.A.

(Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia)

SHEPHERDS F.A.

(Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia)

Аннотация. В статье представлены результаты экспериментальных исследований влияния дополнительной упрочняющей обработки ППД на повышение усталостной долговечности деталей. Установлено, что применение упрочнения деталей в процессе эксплуатации имеет эффект при условии, если степень упрочнения поверхностного слоя, обеспечиваемая ППД, не превышает предельно допустимую величину свойственную конкретному материалу. Сделано заключение - для обеспечения повышения усталостной долговечности режимы дополнительной упрочняющей обработки должны быть согласованы с продолжительностью (количеством циклов) промежуточного циклового нагружения, которое также сопровождается развитием упруго-пластической деформации в поверхностном слое и как следствие повышением его напряжённого состояния

Annotation. The article presents the results of experimental studies of the effect of additional hardening treatment of PPD on increasing fatigue life of parts. It is established that the use of hardening of parts during operation has the effect provided that the degree of hardening of the surface layer provided by the DPD does not exceed the maximum permissible value inherent in a particular material. It was concluded that in order to increase the fatigue life, the additional hardening treatment regimes should be coordinated with the duration (number of cycles) of the intermediate cyclic loading, which is also accompanied by the development of elastic-plastic deformation in the surface layer and, as a consequence, the increase in its stress state

Ключевые слова: упрочнение, поверхностное пластическое деформирование, усталостная долговечность.

Key words: hardening, surface plastic deformation, fatigue life.

Надежность и ресурс деталей машин в основном определяется качественным состоянием их поверхностного слоя, являющимся носителем конструктивных, технологических и эксплуатационных концентраторов напряжений, величина и характер которых предопределяют усталостное разрушение конструкции в эксплуатации. Наиболее существенными с точки зрения эксплуатации свойствами поверхностного слоя деталей, определяющими усталостную прочность, являются шероховатость, микротвердость и уровень остаточных напряжений [1,2].

Требуемые параметры качества поверхности и практически большинство важнейших эксплуатационных свойств деталей машин могут быть обеспечены процессами упрочнения их методом поверхностного пластического деформирования, максимально проявляющими потенциальные возможности материала. Упрочнение методом ППД приводит к повышению поверхностной твердости, образованию в поверхностных слоях деталей остаточных напряжений сжатия и благоприятному изменению микрогеометрии поверхностей. В результате в зависимости от функционального назначения и условий эксплуатации деталей повышается их усталостная и контактная прочность, износостойкость, коррозионная стойкость и т.д.

Целью исследований являлось изучение эффективности применения дополнительной упрочняющей обработки динамическими методами поверхностного пластического деформирования (ППД) на повышение усталостной долговечности деталей в процессе их эксплуатации.

Методика экспериментальных исследований предусматривала:

1. Обоснование режимов виброударной упрочняющей обработки образцов;

2. Определение усталостной долговечности образцов, упрочнённых по следующим регламентам:

Регламент 1 - упрочнение $U(t)$ образцов и последующее их циклическое нагружение $Tr(\sigma)$ до разрушения. При исследовании по этой схеме устанавливается влияние степени упрочнения образцов, зависящей в основном от времени упрочнения, на их усталостную долговечность.

Регламент 2 - упрочнение образцов в два этапа $U(t_1)$ и $U(t_2)$. На первом этапе образцы упрочняются в течении времени t_1 (составляющем 50-60% от t), на втором этапе, которое проводится после проведения циклического нагружения образцов (тренировки) $T_{пр}(\sigma)$, образцы дополнительно упрочняются на тех же режимах в течении времени t_2 (составляющем 50-40% от t). После дополнительного упрочнения образцы подвергаются дальнейшему циклическому нагружению $Tr(\sigma)$ до разрушения. При исследовании по этой схеме устанавливается влияние дополнительного виброударного упрочнения на повышение усталостной долговечности.

Регламент 3 - предусматривает упрочнение образцов в три этапа $U(t_1)$, $U(t_2)$, $U(t_3)$, при этом $t_1 + t_2 + t_3 = t$. Между упрочняющими обработками $U(t_1) - U(t_2)$ и $U(t_2) - U(t_3)$ образцы подвергаются циклическому нагружению $T_{пр1}(\sigma_1)$ и $T_{пр1}(\sigma_2)$. После последнего дополнительного упрочнения образцы циклически нагружаются $Tr(\sigma)$ до разрушения.

Регламент 4 и 5 исследуют влияние отдыха (старения) $O(t)$ после упрочнения $Y(t)$ на усталостную долговечность образцов, упрочнённых по регламентам 1 и 2.

Упрочняющая обработка ППД осуществлялась виброударным методом на лабораторной вибрационной установке УВГ 4×10. В качестве рабочей среды для виброударной обработки были использованы стальные закаленные шарики диаметром 5-8 мм. Условия эксплуатации образцов эмитировались на плоских образцах из алюминиевого сплава Д16Т с концентратором напряжений, подвергаемых поперечному изгибу в одной плоскости на установке для усталостных испытаний УИ-20.

В качестве критериев для обоснования оптимальных режимов виброударной обработки (частоты f , амплитуды A , времени обработки t) были выбраны физико – механические характеристики качества поверхностного слоя, формируемого в процессе обработки, такие как микротвердость поверхности и величина остаточных напряжений, оцениваемая по величине стрелы прогиба образцов.

Исследования изменения физико – механических характеристик качества поверхностного слоя от продолжительности обработки позволили обосновать оптимальные режимы упрочняющей обработки обеспечивающие (без разрушения) наибольший их прирост, а именно частота колебаний- 33 Гц, амплитуда -2,5 – 3,5 мм, время обработки 90 минут

Установленные режимы виброударного упрочнения ППД были приняты в качестве основных для проведения дальнейших экспериментальных исследований по отработке влияние регламентов виброударного упрочнения образцов на повышение их усталостной долговечности.

На рис.1 представлено исследование влияние продолжительности виброударного упрочнения на усталостную долговечность образцов, из которого следует, что с повышением степени упрочнения образцов, обусловленной продолжительностью упрочняющей обработки, усталостная долговечность растёт до достижения поверхностным слоем предельной степени упрочнения, соответствующей времени упрочняющей обработки 90 минут. При этом показатели усталостной долговечности образцов возросли по сравнению с исходными в 9 раз. Снижение усталостной долговечности образцов, упрочнённых свыше 90 минут обусловлено переупрочнением поверхностного слоя образцов.

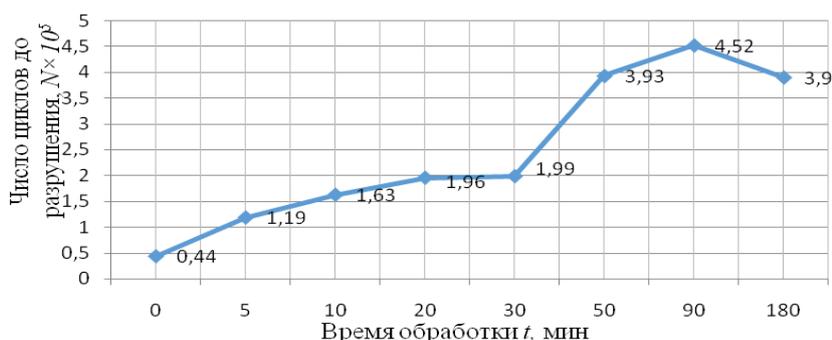


Рис. 1 Влияние степени упрочнения, на усталостную долговечность образцов

В таблице 1 представлены значения усталостной долговечности образцов в зависимости от регламента виброударной упрочняющей обработки

Таблица 1

№ регламента	Регламент упрочняющей обработки	Усталостная долговечность образцов, $N \times 10^3$
Исходный образец	без упрочняющей обработки	44
1	У(90)	452
2	У(60)+Тпр(20 т.ц.)+У(30')	547
3	У(30)+Тпр(20т.ц.)+У(30)+Тпр(20т.ц.)+У(30)	500
4	У(90') +О(3 сут.)	219
5	У(60)+О(18сут.)+Тпр(60 т.ц.)+ У(30)+О(3 сут.)	204

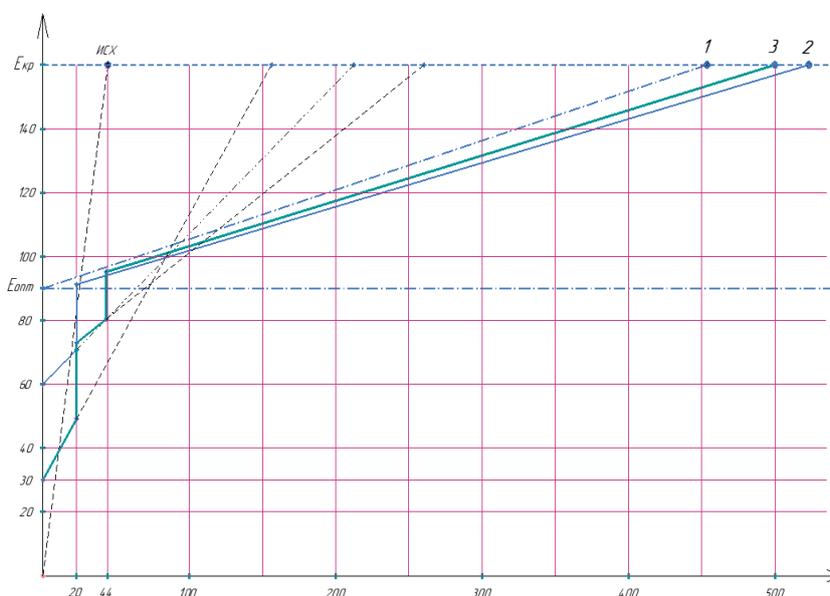


Рис. 6 Графическая интерпретация результатов экспериментальных исследований

Приведённые результаты исследований усталостной долговечности образцов виброударной упрочняющей обработки показали:

- применение однократного дополнительного виброударного упрочнения после промежуточного циклического нагружения (тренировки) способствует повышению усталостной долговечности образца примерно в 1,2 раза;

- двукратное дополнительное виброударное упрочнение образцов в сочетании с двукратным промежуточным циклическим нагружением повышает усталостную долговечность образцов в 1,1 раза;

- последеформационный отдых образцов не оказывает существенного влияния на повышение усталостной долговечности, что обуславливается релаксацией напряжений или разупрочнением в процессе старения.

На Рис.2 дана графическая интерпритация результатов исследования влияния дополнительной упрочняющей обработки на усталостную долговечность образцов

Анализ графической интерпритации результатов проведённых исследований позволяет сделать следующие выводы.

1. Дополнительная упрочняющая обработка обеспечивает повышение усталостной долговечности при условии, если степень упрочнения поверхностного слоя не превышает предельно допустимую величину свойственную конкретному материалу;

2. Двукратное дополнительное виброударное упрочнение образцов в сочетании с двукратным промежуточным циклическим нагружением обеспечивает повышение усталостной долговечности в том случае, если степень упрочнения поверхностного слоя не превышает критическую величину для конкретного материала.

3. Превышение предельно допустимой величины степени упрочнения поверхностного слоя приводит к снижению усталостной долговечности в связи с переупрочнением поверхности, что и было допущено при упрочнении образцов по регламенту 3;

4. Для обеспечения повышения усталостной долговечности режимы дополнительной упрочняющей обработки должны быть согласованы с продолжительностью (количеством циклов) промежуточного циклового нагружения, которое также сопровождается развитием упруго-пластической деформации в поверхностном слое и как следствие повышением его напряжённого состояния.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бабичев А.П., Бабичев И.А. Основы вибрационной технологии. – Ростов-на /Д: ДГТУ, 1999.-620с.
2. Суслов А.Г. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений/ А. Г. Суслов, В. П. Федоров, О. А. Горленко [и др.] ; под общ. ред. А. Г. Суслова. - Москва: Машиностроение, 2006. - 447 с

АВТОРЫ

Лебедев Валерий Александрович, к.т.н., профессор кафедры «Технология машиностроения», Донской государственной технической университет, г.Ростов-на-Дону
Пастухов Филипп Андреевич, ведущий инженер НИИ «Вибротехнология» Донской государственной технической университет, г.Ростов-на-Дону

THE AUTHORS

Lebedev Valery Aleksandrovich, Ph.D., professor of the chair "Technology of Mechanical Engineering", The Don State Technical University, Rostov-on-Don.
Pastukhov Philip Andreevich, Leading engineer of the scientific research institute "Vibrotechnology" The Don State Technical University, Rostov-on-Don.

**МОДЕРНИЗАЦИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ПОД ПРОЦЕССЫ
КОМБИНИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОАЛМАЗНОЙ ОБРАБОТКИ**

**MODERNIZATION OF EQUIPMENT UNDER PROCESSES OF COMBINED
ELECTRO-DIAMOND TREATMENT**

ЛОБАНОВ Д.В., МУЛЮХИН Н.В., СЕКЛЕТИНА Л.С., ЯНЮШКИН А.Р.
(Чув. Гос. ун-т, г. Чебоксары, Россия)

LOBANOVD.V., MULIUKHINN.V., SEKLETINAL.S., YANYUSHKINA.R.
(The Chuvash state un-ty, Cheboksary, Russia)

***Аннотация.** В статье предложены пути модернизации оборудования под процессы комбинированной электроалмазной обработки. Представлен краткий литературный обзор по применению комбинированных методов. Рассмотрено использование для обработки высокопрочных материалов различных методов комбинированного электроалмазного шлифования. Приведены этапы модернизации существующего оборудования под процессы комбинированной обработки, конструктивные особенности модернизируемых узлов заточного оборудования. В качестве примера реализации представленной методике на станке модели 3Е624.*

***Annotation.** The article suggests ways to modernize equipment for the processes of combined electro-diamond processing. A brief literature review on the use of combined methods is presented. The use of various methods of combined electro-diamond grinding for processing high-strength materials is considered. The stages of modernization of the existing equipment for the processes of combined processing, the design features of the upgraded nodes grinding equipment are given. As examples of the implementation of the presented methodology on the machine model 3E624.*

***Ключевые слова:** модернизация оборудования, комбинированные методы электроалмазной обработки, шлифование, обработка новых высокопрочных и наноструктурированных материалов.*

***Keywords:** modernization of equipment, combined methods of electro-diamond processing, grinding, processing of new high-strength and nanostructured materials.*

Появление новых высокопрочных и наноструктурированных материалов требует разработки и совершенствования существующих методов финишной обработки и оборудования для их реализации. На сегодняшний день существуют новые станки, позволяющие выполнять обработку в несколько раз качественнее своих аналогов, но у них есть значительный недостаток – высокая стоимость. Переоборудование производства путём замены устаревших станков на новые обойдётся в десятки миллионов, что доступно не каждому предприятию. Поэтому предлагается иной путь улучшения качества обработки

материалов, а именно - провести модернизацию под процессы комбинированной обработки уже существующего оборудования [1,2].

Анализ литературных данных [3-6] показывает, что одним из перспективных методов обработки современных материалов является комбинированное электроалмазное шлифование кругами на металлических связках. Несмотря на то, что данный метод был разработан давно, он не исчерпал свои возможности и требует дальнейшего изучения и совершенствования.

Комбинированная электроалмазная обработка подразделяется в зависимости от требуемых требований качества изделия, специфики оборудования и т.д [7]. Так один из методов - электрохимическое шлифование алмазными кругами на токопроводящих металлических связках представляет собой комбинированный процесс, при котором материал снимается в результате одновременно протекающих процессов: анодного растворения, механического резания алмазными зернами и электроэрозионных явлений. Кроме того, в результате воздействия электролитов происходит понижение прочности обрабатываемого материала вследствие уменьшения межфазной поверхностной энергии. Благодаря отсутствию сплошного контакта поверхностей детали и инструмента, а также выступанию зерен алмаза из связки, между ними образуется зазор, заполненный электролитом. В зазоре под воздействием электрического тока происходит анодное разупрочнение поверхности детали. Таким образом, поверхностный слой обрабатываемой поверхности при электрохимическом шлифовании образуется в результате протекания электрохимического процесса и механической работы круга, производимой зернами абразива, которые удаляют продукты анодного растворения и срезают обрабатываемый материал, а также разрушая и удаляя пленку окислов металла, образующуюся на поверхности детали.

Другим прогрессивным методом является метод абразивно-алмазного шлифования с одновременным воздействием электрохимических процессов на инструмент. При изменении полярности электродов (круг — анод, деталь — катод), т. е. так называемой обработки на обратной полярности, происходит разупрочнение металлической связки круга. Процесс характеризуется интенсивным самозатачиванием круга, снижением сил резания, температуры, вследствие чего производительность обработки также возрастает. Для обеспечения контроля правки круга также используется специально разработанный катод с системой подачи электролита в зазор между правящим катодом и алмазным кругом.

На основе первых двух способов был разработан комбинированный метод электроалмазного шлифования с одновременной электрохимической правкой шлифовального круга [8-10]. Одновременная работа двух цепей была достигнута за счёт гальванического разделения цепей, что позволило уменьшить сопротивление в зоне резания и, следовательно, температуру, повысить качество обработанной поверхности, а также уменьшить расход круга, что значительно уменьшило себестоимость технологии.

Для реализации технологии в производственных условиях была предложена модернизация шлифовального оборудования под комбинированные процессы [11,12]. Модернизация может выполняться в двух направлениях:

1. Изолируется шпиндельная бабка станка либо сам шпиндель от корпуса станка. При этом положительный полюс цепи травления инструмента от источника технологического тока подключается на корпус станка. К специальному катоду подключается отрицательный полюс цепи правки круга. К шлифовальному кругу через шпиндель и токосъемник одновременно подключаются соответственно положительный полюс цепи правки круга и отрицательный – цепи травления инструмента. [13,14]

2. Изолируется стол станка либо приспособление, устанавливаемое на столе. Подключение электрических цепей аналогично первому варианту. Второй вариант, на наш взгляд, предпочтительнее и менее трудоемок. [15-19]

В качестве примера для реализации комбинированного метода электроалмазного шлифования с одновременной электрохимической правкой шлифовального круга приведена модернизация заточного полуавтомата модели ЗЕ624. Станок предназначен для чистового затачивания по открытым задним и передним поверхностям режущего инструмента. Может быть использован в заточных отделениях машиностроительных и инструментальных заводов, специализирующихся на выпуске твердосплавного инструмента [20], а также при централизованной заточке и переточке режущего инструмента.

В общем виде модернизация заключается в следующем: алмазный круг на металлической связке изолируется от шпинделя станка диэлектрическими вставками, что обеспечивает надежную изоляцию круга от основной массы станка при подаче на него напряжения от источника тока через токосъемник.

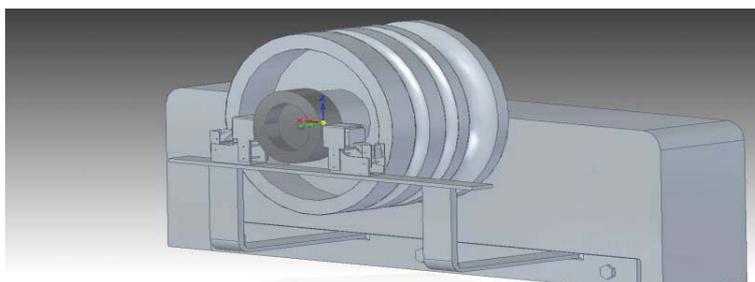


Рис.1. Установка токосъёмника на шпиндель станка.

Токосъемник устанавливается в защитном кожухе на креплении и изолируется пластинками из диэлектрика, которые предотвращают короткое замыкание на корпус в случае попадания электролита на токосъемник в процессе шлифования (рис. 1). В приспособлении закрепляется обрабатываемая деталь, которая, в этом случае, является анодом, а алмазный круг катодом. В результате формируется первая цепь – травления, предназначенная для анодного растворения поверхностного слоя детали.

Для обеспечения непрерывного восстановления режущей способности шлифовального круга в процессе обработки, формируется вторая цепь – правки. На защитном кожухе размещается правящий катод, который обеспечивает непрерывную правку поверхности круга и исключается образование засаленного слоя.

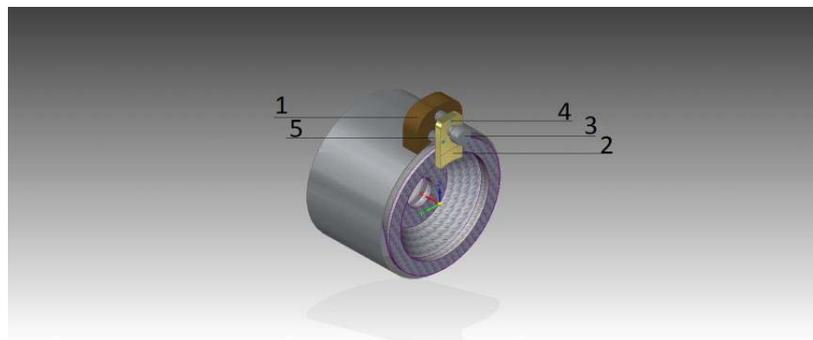


Рис 2. Конструкция катода для непрерывной правки алмазного круга

Конструкция катода показана на рис. 2. Катод представляет собой корпус 1, который крепится винтами к защитному кожуху станка. К корпусу жестко закрепляются три направляющие 4, поверх которых крепятся пружины 5, исключающие колебания катода и микрометрический винт 3 для настройки зазора между катодом и алмазным кругом. Регулировка межэлектродного зазора осуществляется вращением микрометрического винта.

Система подачи охлаждающей жидкости обеспечивает подвод электролита в зону правки и травления одновременно.

Эффективное использование представленных технических решений возможно только в совокупности с разработанными рекомендациями по условиям и режимам комбинированной обработки. Модернизированное оборудование способно обеспечить качественную обработку сверхтвёрдых и нанопропрочнённых материалов, при этом затраты на модернизацию значительно меньше в сравнении с закупкой нового оборудования [21-32].

ЛИТЕРАТУРА

1. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Ковалевский С.В. Повышение качества подготовки твердосплавного инструмента / Системы. Методы. Технологии. 2009. № 1 (1). С. 95-98.
2. Повышение эффективности обработки высокопрочных композиционных материалов / Янюшкин А.С., Попов В.Ю., Петров Н.П., Рычков Д.А. // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2013. Т. 1. С. 146-149.
3. Носенко С.В., Носенко В.А., Байрамов А.А. Влияние правки абразивного инструмента и направления движения стола на шероховатость обработанной поверхности при глубинном шлифовании заготовок из титановых сплавов / СТИН. 2015. № 1. С. 21-26.
4. Выбор оптимальных условий плоского шлифования стальных заготовок / Носенко В.А., Тышкевич В.Н., Орлов С.В., Саразов А.В., Сукочева Е.А. // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2016. № 6 (675). С. 73-81.
5. Моделирование процесса стохастического взаимодействия инструмента и заготовки на операциях шлифования / Братан С.М., Богуцкий В.Б., Новоселов Ю.К., Рошупкин С.И. // Научные технологии в машиностроении. 2017. № 5 (71). С. 9-18.

6. Геометрическая точность эльборового круга после правки методом обкатки / Салов П.М., Цай В.Н., Салова Д.П., Плотников В.В., Воронцов Ю.И., Сайкин С.С. // В сборнике: Современные технологии в машиностроении и литейном производстве материалы I-ой Международной научно-практической конференции. 2015. С. 216-221.
7. Виноградова Т.Г., Салов П.М., Салова Д.П. Качество обработанных отверстий при электрокорундовом и аэроборном шлифовании / Научно-технический вестник Поволжья. 2011. № 1. С. 91-95.
8. Янюшкин А.С., Архипов П.В., Ереско С.П. Качество поверхности твердого сплава при комбинированном электроалмазном шлифовании с непрерывной правкой круга / Научные технологии в машиностроении. 2012. № 5 (11). С. 26-31.
9. Попов В.Ю., Янюшкин А.С., Сурьев А.А. Качество инструмента из инструментальных сталей после обработки методом двойного травления / Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2003. Т. 2. С. 206-212.
10. Попов В.Ю., Янюшкин А.С. Формирование поверхностного слоя режущего инструмента при алмазной обработке кругами на металлической связке / Решетневские чтения. 2014. Т. 1. № 18. С. 306-308.
11. Повышение динамического качества шлифовального станка на основе оптимизации виброизолирующих устройств / Владецкая Е.А., Братан С.М., Харченко А.О., Владецкий Д.О. // В сборнике: Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении материалы международной научно-технической конференции. 2015. С. 139-148.
12. Анищенко С.С., Попов А.Ю. Методика определения рационального состава оборудования / Омский научный вестник. 2013. № 2 (120). С. 137-140.
13. Янюшкин А.С., Попов В.Ю., Янюшкин Р.А. Элементы модернизации станков шлифовальной группы под процессы электроалмазной обработки / Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2000. Т. 1. С. 189-190.
14. Наладка заточного станка 3б667 при работе методом двойного травления / Гартфельдер В.А., Медведев Б.П., Купцов М.В., Салов П.М. // В сборнике: Проектирование и перспективные технологии в машиностроении, металлургии и их кадровое обеспечение Материалы III-ей Всероссийской научно-практической конференции. Ответственный редактор И.Е. Илларионов. 2017. С. 268-272.
15. Архипов П.В., Сурьев А.А., Янюшкин А.С. Модернизация плоскошлифовального станка 3е711в под электрофизическое шлифование / Механики XXI века. 2006. № 5. С. 204-205.
16. К вопросу о совершенствовании и модернизации / Архипов П.В., Сурьев А.А., Янюшкин А.С., Кулехова Г.М. // Механики XXI века. 2007. № 6. С. 269-270.
17. Моделирование и модернизация технологического оборудования / Архипов П.В., Янюшкин А.С., Петров Н.П., Балакин Д.В., Муравьева О.О. // Механики XXI века. 2013. № 12. С. 111-112.
18. Реченко Д.С., Попов А.Ю. Компонировка высокоскоростного оборудования / Омский научный вестник. 2010. № 3 (93). С. 113-115.
19. Братан С.М., Владецкая Е.А. Исследование надежности виброизолирующего устройства шлифовального станка / Научные технологии в машиностроении. 2016. № 9 (63). С. 10-15.
20. Гартфельдер В.А., Секлетина Л.С. Технический аудит металлорежущего оборудования / Вестник Чувашского университета. 2004. № 2. С. 103-108.
21. Contact processes in grinding / Yanyushkin A., Lobanov D., Arkhipov P., Ivancivsky V. // Applied Mechanics and Materials. 2015. Т. 788. С. 17-21.
22. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Архипов П.В. Потеря режущей способности алмазных кругов на металлической связке при шлифовании композиционных материалов / Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2013. № 1 (47). С. 178-183.

23. Расчет гибкого вала, используемого для непрерывной правки шлифовальных кругов / Салова Д.П., Петряшин Е.Н., Григорьев В.С., Мулюхин Н.В., Плотников В.В., Сорокин С.С. // В сборнике: Проектирование и перспективные технологии в машиностроении и металлургии материалы II-ой Республиканской научно-практической конференции. Министерство образования и науки РФ; ФГБОУ ВПО "Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова". 2016. С. 118-121.
24. Определение относительной абразивной способности кругов при безалмазной непрерывной правке / Салов П.М., Цай В.Н., Сайкин С.С., Воронцов Ю.И., Мулюхин Н.В. // Научно-технический вестник Поволжья. 2016. № 4. С. 57-59.
25. Салов П.М., Шалунов Е.П., Матросов А.Л. Состав и выбор связок для алмазных брусков / В сборнике: Проектирование и перспективные технологии в машиностроении и металлургии материалы II-ой Республиканской научно-практической конференции. Министерство образования и науки РФ; ФГБОУ ВПО "Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова". 2016. С. 126-131.
26. Применение сверхтвердых материалов в промышленности / Гартфельдер В.А., Яношкин А.С., Гартфельдер В.А., Васильев И.А. // В книге: Проблемы совершенствования подготовки инженерных кадров и научно-технического сотрудничества вузов и предприятий ЧАССР Тезисы докладов научно-практической конференции. 1981. С. 46-47.
27. Борисов М.А., Дементьев Д.А., Мишин В.А. Способ электроабразивной обработки труднодоступных поверхностей / Journal of Advanced Research in Technical Science. 2017. № 4. С. 15-16.
28. Борисов М.А., Мишин В.А., Дементьев Д.А. Разработка программируемого устройства для управления параметрами тока при электрохимической обработке / В сборнике: Проектирование и перспективные технологии в машиностроении, металлургии и их кадровое обеспечение Материалы III-ей Всероссийской научно-практической конференции. Ответственный редактор И.Е. Илларионов. 2017. С. 188-192.
29. Борисов М.А., Мишин В.А. Аспекты применения электрохимического шлифования зубопротезных металлических изделий / В сборнике: Новые технологии науки, техники, педагогики высшей школы материалы Международной научно-практической конференции. 2017. С. 157-159.
30. Янюшкин А.С., Архипов П.В. Электроалмазная обработка. практика применение и модернизация / Механика XXI века. 2005. № 4. С. 260-265.
31. Устройство электроабразивной обработки с непрерывной правкой круга / Янюшкин А.С., Ереско С.П., Ереско Т.Т., Тюрин Н.В., Пылькин А.Ф., Рычков Д.А. // патент на полезную модель RUS 126275 08.10.2012
32. Popov V.Yu., Yanyushkin A.S. Combined electro-diamond grinding of high speed steels / International Journal of Advances in Machining and Forming Operations. 2012. Т. 4. № 1. С. 91-102.

АВТОРЫ

- ЛОБАНОВ Д.В.** - Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия.
- МУЛЮХИН Н.В.** - Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия.
- СЕКЛЕТИНА Л.С.** - Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия.
- ЯНЮШКИН А.Р.** - Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия.

THE AUTHORS

- LOBANOV D.V.** - Chuvash State University. I.N. Ulyanova, Cheboksary, Russia.
- MULYUHIN N.V.** - Chuvash State University. I.N. Ulyanova, Cheboksary, Russia.
- SECLETINA L.S.** - Chuvash State University. I.N. Ulyanova, Cheboksary, Russia.
- Yanyushkin A.R.** - Chuvash State University. I.N. Ulyanova, Cheboksary, Russia.

**ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ДЕТАЛЕЙ
ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫМИ
КОМБИНИРОВАННЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ**

**THE MAIN DIRECTIONS OF IMPROVING THE QUALITY OF PARTS
FUNCTIONALLY-ORIENTED HYBRID TECHNOLOGY**

МИХАЙЛОВ А.Н., МАТВИЕНКО С.А., ЛУКИЧЕВ А.В.
(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР)

MIKHAYLOV A.N., MATVIENKO S.A., LUKICHOV A.V.
(DonNTU, Donetsk, DPR)

***Аннотация.** В статье рассмотрены принципы построения комбинированных методов обработки, их классификация и структура определения меры полезности технологических воздействий на поверхность изделий. Предложены параметры квалиметрической оценки технологий поверхностной обработки при определении их меры полезности.*

***Abstract.** The article describes the principles of construction of combined methods of processing, their classification and structure of determining the measure of utility of technological effects on the surface of products. The parameters of the qualimetric assessment of surface treatment technologies in determining their utility measures are proposed.*

***Ключевые слова:** классификация, показатели, мера полезности, синтез.*

***Keywords:** classification, indicators, measure of usefulness, synthesis*

Введение. Для повышения функциональных свойств изделий машиностроения необходима разработка наукоемких технологий, признаками которых являются: формирование качественно новой совокупности свойств, как следствие реализация качественно новой меры полезности изделий, а также эффективность производства деталей машиностроения, достигаемая минимизацией материальных, энергетических, трудовых затрат. Формирование функциональных свойств и обеспечение надежности детали в целом, определяемых соответственно качеством их функциональных поверхностей, основывается на принципах полезности, подобия технологических систем и критериальной оценке. Целью изготовления любого изделия является обеспечение заданных эксплуатационных свойств изданного уровня полезности. Для этого синтез инновационных методов обработки изделий должен базироваться на единстве технологии изготовления и эксплуатации. Разработка наукоемких направлений обеспечения заданной меры полезности изделий является актуальной задачей машиностроения.

Целью статьи является определение перспективных наукоемких направлений повышения надежности деталей машиностроения за счет применения инновационных комбинированных методов обработки (КМО).

Основная часть. Качество машин, определяющее долговечность деталей и машин в целом, заложено в поверхностном слое (ПС) рабочих поверхностей ответственных деталей. В процессе эксплуатации он подвергается интенсивному износу и разрушению в форме усталостных трещин, абразивного износа, коррозия и др. Под качеством ПС деталей понимается его состояние, формируемое в результате технологического воздействия на поверхность и характеризуемое совокупностью физико-химических, механических свойств и геометрических показателей. Обеспечение качества поверхности заключается в формировании параметров ПС обеспечивающих эксплуатационные свойства, которые позволяют детали выполнять свое функциональное назначение в течение заданного срока службы. Параметры качества ПС формируются на операциях отделочно-упрочняющей обработки (ОУО). Повышение качества ПС за счет улучшения физико-механических свойств, повышения микротвёрдости и повышения предела выносливости позволяет увеличить ресурс деталей.

Уровень качества ПС характеризуется следующими критериями:

1. Показатель качества, являющийся отношением полного назначенного ресурса детали к суммарным затратам на отделочно-упрочняющую обработку.
2. Коэффициент соответствия технического ресурса данной поверхности к сроку службы детали.
3. Количество обеспечиваемых эксплуатационных свойств с высокими показателями.
4. Коэффициент соответствия технического ресурса отдельных зон, участков, точек поверхности с различным воздействием эксплуатационных факторов.

Основные направления повышения параметров качества ПС:

1. Автоматизация технологических процессов ОУО.
2. Технологическое обеспечение соответствующих параметров качества ПС для заданных условий эксплуатации, включая период приработки и период нормального износа.
3. Совершенствование существующих и разработка новых наукоемких, в том числе и комбинированных функционально-ориентированных технологических методов ОУО деталей
4. Создание при ОУО набора заданных эксплуатационных свойств деталей, исходя из заданного срока службы детали.
5. Гибридизация.
6. Выбор для ОУО технологических процессов обеспечивающих повышение эффективности по всем основным показателям (производительность, качество, себестоимость, эксплуатационные характеристики, конкурентоспособность).

Количественной характеристикой выполнения технической системой своего функционального назначения является её полезность, которая выражается в удовлетворении определенных требований и ограничений,

называемых частными критериями полезности. Изменение значений частных критериев соответственно оказывает влияние на полезность технической системы. В связи с этим на практике используется функция полезности, что требует объединения частных критериев полезности в единый критерий. Способ объединения критериев устанавливается на основе анализа физической сущности процесса или объекта и физической роли каждого из частных критериев в формировании полезности.

Мера полезности любого изделия определяется его качеством, надежностью и затратами на достижение параметров качества. На надежность детали оказывают влияние её эксплуатационные свойства, закладываемые в качестве ПС. Проблеме технологического обеспечения эксплуатационных свойств деталей посвящены работы, таких ученых как, А.П. Бабичева, И.В. Крагельского, В.С. Комбалова, А.Н. Михайлова, Э.В. Рыжова, А.Г. Сулова, Е.В. Смоленцева, В.И. Бутенко и др.

Наиболее перспективной технологией в достижении требуемых эксплуатационных свойств является комбинированная поверхностная обработка деталей, заключающиеся в последовательной, параллельной или смешанной подаче в зону обработки различных видов энергии различных источников по принципу пространственного совмещения. Применение комбинированных методов обработки позволяет комплексно использовать достоинства и нивелировать недостатки совмещаемых технологических процессов. В качестве признаков, подлежащих усилению, может выступать любой параметр меры полезности или их сочетание.

В работах [1,2,3,4,5,6,7,8,9,10] рассматриваются принципы построения комбинированных методов обработки, их классификация и разновидности.

Разработанные классификации комбинированных методов поверхностной обработки существенно различаются между собою по признакам, названиям и степени полноты охвата существующих методов отделочно-упрочняющей обработки. Подходы исследователей к синтезу комбинированных методов обработки основывается на одновременном использовании нескольких различных энергетических воздействий, протекаемых по своему физико-химическому механизму. Комбинированные методы обработки могут включать механические (постоянные или импульсные), тепловые, химические, электрические, электромагнитные, ядерные, акустические, ультразвуковые и др. воздействия. При энергетическом воздействии на объект обработки этом число видов энергии сокращается до четырёх: механическая, тепловая, химическая, ядерная.

По сущности процесса все комбинированные методы формирования ПС рабочих поверхностей деталей можно классифицировать на группы:

- с модификацией физико-химических свойств без удаления припуска;
- с удалением части поверхностного слоя;
- с нанесением и наращиванием слоев;
- комбинированные, сочетающие методы модифицирования и нанесения покрытий.

Комбинированным способам поверхностной обработки присущи следующие признаки классификации [14]:

1. По характеру, количественным характеристикам и последовательности совмещения энергетических воздействий, способов подвода, методов, операций

2. По виду физико-химических процессов проходящих в зоне обработки заготовки;

3. По виду первичного и вторичного энергетических воздействий и наличию или отсутствию преобразования первичного энергетического воздействия во вторичное воздействие;

4. По характеру распределения энергетических воздействий: в пространстве и во времени;

5. По сущности процесса воздействия на объект;

6. По технологическому назначению;

7. По эффективности влияния на эксплуатационные свойства;

8. По виду инструмента и оборудования;

9. По структуре формирования технологии (ветвящаяся, иерархическая, мультипликативная, аддитивная, мультипликативно-аддитивная);

10. По производительности (низкой, нормальной, высокой, сверхвысокой);

11. По эффективности обработки в целом;

12. По прецизионности обработки (низкой, нормальной, высокой, особо высокой);

13. По возможности гибридизации технологии;

14. По мере полезности.

Одной из главных научных задач при разработке комбинированных технологий поверхностной обработки изделий машиностроения является выбор рациональных сочетаний энергетических воздействий обеспечивающих необходимые значения эксплуатационных свойств в заданных пределах, а также установление общих закономерностей описывающих механизм взаимодействия и взаимовлияния энергетических составляющих подведенных к зоне обработки. В общем случае процесс преобразования энергии происходит по следующей цепочке: рабочая энергия - энергия воздействия - физико-химический механизм обработки [8].

Структуру КМО можно представить в виде $KMO=(P,C,O)$, где P- множество элементов-процессов физической, химической или иной природы, C- множество свойств этих процессов; O- множество отношений между ними. Каждому комбинированному методу обработки ставится в соответствие некоторый набор единичных идентифицируемых процессов, протекание каждого из которых сопровождается заданным воздействием на объект обработки в результате реализации некоторого физико- (химико)-технического эффекта[3].

При синтезе КМО нужно обеспечить выполнение следующих принципов, формирующих необходимые и достаточные условия целесообразной реализации КМО:

-принцип совмещения различных видов энергетических воздействий в различных сочетаниях в пространстве и во времени;

- принцип комбинирования физических эффектов, влияющих на механизм обработки;
- принцип рационального комбинирования различных процессов;
- принцип введения дополнительной энергии в базовые процессы;
- принцип достижения синергетического эффекта, заключающийся в комбинированном воздействии различных видов энергии на ПС детали, при котором суммированный эффект превышает действие, оказываемое каждым энергетическим воздействием в отдельности;
- принцип абстрагирования, заключающийся в обеспечения свойства ПС лимитирующего работоспособность детали исходя из условий эксплуатации;
- принцип комбинирования кинематических схем обработки;
- параметрический принцип комбинирования;
- принцип пространственной совместимости единичных составляющих процессов;
- принцип существования, заключающийся в обеспечении заданного закона распределения параметров качества по обрабатываемой поверхности детали;
- принцип управляемости, заключающийся в технологическом управлении заданными параметрами качества поверхности;
- принцип совместимости парциальных процессов во времени;
- принцип соизмеримости воздействий;
- принцип эффективности совмещения
- принцип энергетической совместимости;
- принцип экологической совместимости.

Решение задачи повышения качества и эксплуатационной надежности разрабатываемых изделий включает следующие этапы: На каждом этапе синтеза композиционной технологии реализуется следующие процессы [11,12,13,15]:

- анализ изделия в соответствии с условиями (нагрузка, температура, скорость, окружающая среда т.д.);
- установление эксплуатационных свойств деталей машин и их соединений и допустимых пределов их изменения, определяющих надежность;
- зависимости (или табличные данные) эксплуатационных свойств деталей машин и их соединений от параметров состояния поверхностного слоя;
- выбор параметров состояния ПС, обеспечивающих требуемые значения эксплуатационных свойств в заданных пределах
- синтез и корректирование структуры технологического процесса;
- разработка структуры эксплуатационных функций и граф функциональных элементов конструкции
- рассмотрение схемы технологического воздействия и вариантов реализации технологических операций повышения качества эксплуатационной надежности конструкции функционально-ориентированного подхода.
- обеспечение заданных, требуемых или предельных свойств изделия в зависимости от особенностей его эксплуатации в машине или технологической системе.
- оптимизация параметров состояния ПС по себестоимости изготовления или восстановления.

Обоснование эффективности выбора технологических воздействий с целью обеспечения заданного сочетания эксплуатационных свойств должно проводиться по критерию полезности [5]. Каждый технологический метод обработки поверхностей деталей позволяет достичь определенный уровень полезности изделия. Ординалистский подход к измерению полезности заключается в ранжировании параметров надежности или полезности по принципу предпочтения.

Прогрессивные методы характеризуются обобщенным показателем мерой полезности. Мера полезности технологических воздействий, представляет собой суммарный показатель эффективности применения комбинированного воздействия на эксплуатационные характеристики деталей.

Основу модели комбинированной поверхностной обработки функциональных поверхностей деталей составляет научная концепция о возможной совместимости различных энергетических воздействий с помощью критериального выбора и применения принципа полезности. Входные данные для проектирования модели:

- наличие базы данных существующих технологических процессов модификации ПС и нанесения покрытий, обеспечивающих заданные эксплуатационные показатели изделий;

- возможность проектирования перспективных методов и средств формирования качества ПС рабочих поверхностей деталей с целью обеспечения требуемой разработчиком меры полезности.

Граничные условия для построения модели:

1. Максимально возможные для заданного ресурса эксплуатационные показатели.

2. Техничко-экономическое обоснование финансовых и трудовых затрат на проектирование новых технологий.

Структура определения меры полезности КМО включает 3 этапа:

- выявление показателей результатов (альтернатив) обработки,
- определение множества допустимых альтернатив обработки (отсечение альтернатив),

- определение полезности результатов обработки, расчет обобщенного показателя привлекательности проекта на основе теории полезности;

Записывая альтернативы в виде дихотомного дерева решений, при этом в результате получается полное множество всех возможных решений.

Определение полезности как меры оценки того или иного результата обработки представляет сложную задачу. Все известные способы определения функции полезности носят приближенный характер и строятся на основе анализа влияния результатов обработки, на эксплуатационные свойства согласно существующим зависимостям.

Зная возможные альтернативы с их показателями полезности, можно построить функцию полезности, которая представляет собой числовую ограниченную функцию, определенную на множестве альтернатив, которая дает основу для сравнения и выбора решений. Глобальная полезность, или оптимальность, комбинированной функционально-ориентированной

технологии (КФОТ) должна отвечать критерию минимальных затрат временных, материальных и людских ресурсов, требуемых для осуществления производственного цикла и обеспечивать минимальный риск выпуска несоответствующей продукции. Глобальный критерий полезности может быть декомпозирован в ряд следующих частных критериев полезности на основе классификации этих критериев:

- обеспечение заданного уровня качества изготавливаемых деталей;
- минимальная себестоимость изготовления деталей;
- минимальное время производственного цикла изготовления [16].

Параметрами квалиметрической оценки комбинированных способов обработки при определении их меры полезности являются показатели технической эффективности, экономичности расхода ресурсов, материалоемкости, трудоемкости, эргономичности, экологичности.

Выводы. В статье предложены признаки классификации КФОТ; принципы, этапы и условия синтеза КФОТ; структура определения меры полезности КМО; параметры квалиметрической оценки комбинированных способов обработки при определении их меры полезности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ковалевский, С. В. Методика классификации комбинированных методов обработки деталей машин // С.В. Ковалевский, И.Н. Стародубцев // Научный Вестник ДГМА. - 2013.- № 2 (12Е). - С. 107-114.
2. Смоленцев, Е.В. Классификация комбинированных методов обработки / Е.В. Смоленцев // Вестник ДГТУ. - 2010. - Т.10. №1(44) – С. 76-79.
3. Саушкин, Б.П. Комбинированные методы обработки в машиностроительном производстве/ Б.П. Саушкин// Металлообработка. -2003. - №1. – С. 8-17.
4. Эдигаров, В.Р. Классификация комбинированных методов обработки на основе электромеханического упрочнения / В.Р. Эдигаров, И.Ю. Килунин, В.В. Дегтярь //Современные наукоемкие технологии. - 2012. - № 3. - С. 32-35.
5. Григорьев, С.Н. Проектирование комбинированных процессов модификации поверхностного слоя типовых деталей/ С.Н. Григорьев, С.В. Сафонов, В.П. Смоленцев // Вестник ВГТУ. – 2016. - №4. Том 12. - С.54-61.
6. Колмыков, Д.В. Комбинированные методы восстановления и упрочнения стальных деталей /Д.В. Колмыков, О.В. Воробьева, В.В. Катенев // Электронный научный журнал Курского государственного университета. - 2016. - №4(12).
7. Бабичев, А.П. Физико-технологические основы методов обработки: учеб.пособие / А.П. Бабичев, М.А. Тамаркин, В.А. Лебедев и др.; под ред.А.П.Бабичева. Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2003. - 430 с.
8. Иванов Владимир Витальевич.Процессы и методология создания поверхностных слоев высокоресурсных изделий путем вибрационного формирования покрытий комбинированным химико-механическим воздействием. Специальность: 05.02.07. - Технология и оборудование механической и физико-технической обработки Ростов-на-Дону 2017. 353 с.
9. Бабичев, А.П. Вибрационная механохимия в процессах отделочно-упрочняющей обработки и покрытий деталей машин / А.П. Бабичев, В.В. Иванов, С.Н. Шудалей и др. Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2012. - С.204.
10. Таровик, А.Б. Классификация комбинированных методов обработки тонкостенных цилиндрических изделий / Таровик, А.Б., Михайлов А.Н. // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наукових праць. - Донецьк: ДонНТУ, 2012.

11. Михайлов, А.Н. Основные особенности и принципы создания композиционных технологий машиностроения / А.Н. Михайлов, Д.А. Михайлов, Е.А. Михайлова // Прогресивні технології і системи машинобудування. - 2012. - Вип.1,2(43). - С. 206-202.
12. Дудников, И.А. Обеспечение эксплуатационных свойств деталей, определяющих надежность сельскохозяйственных машин / И.А. Дудников. // Технологический аудит и резервы производства. - 2011. - № 1(1). - С. 33-36.
13. Тилипалов, В.Н. Компьютерный синтез технологий механообработки деталей на базе теории графов / В. Н. Тилипалов // Вестник Белорусско-Российского университета. - 2008. - №2(19). С. 85-87.
14. Михайлов, А.Н. Общая классификация комбинированных функционально-ориентированных отделочно-упрочняющих методов обработки деталей в машиностроении / А.Н. Михайлов, А.В. Лукичев, С.А. Матвиенко // Перспективные направления развития отделочноупрочняющей обработки и виброволновых технологий: Сборник трудов/ - Ростов-на-Дону, 2018 С. 1-4.
15. Матвиенко С.А., Лукичев А.В., Хамской К.В. Анализ действия эксплуатационных функций на деталь – основа создания технологии отделочно-упрочняющей обработки // Инновационные перспективы Донбасса, г. Донецк, 22-25 мая 2018 г. – Донецк: ДонНТУ, 2018 Т. 3: 3.Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов. – 2018 – С. 98-101.
16. Трушин Николай Николаевич. Методология формирования оптимальной организационно-технологической структуры производственного процесса изготовления деталей машин. Специальность: 05.02.08. - Технология машиностроения. Тула, 2003. 319 с.

АВТОРЫ

Михайлов Александр Николаевич, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой, mntk21@mail.ru, ДНР, Донецк, Донецкий национальный технический университет.

Лукичев Александр Владимирович, канд. техн. наук, доц., a_lukichov@mail.ru, ДНР, Донецк, Донецкий национальный технический университет.

Матвиенко Сергей Анатольевич, канд. техн. наук, доц., serge-matvienko@yandex.ru, ДНР, Донецк, Донецкий национальный технический университет.

THE AUTHORS

Mikhaylov Alexander Nikolaevich, doctor of technical science, professor, manager of department, mntk21@mail.ru, DPR, Donetsk, Donetsk national technical university.

Lukichov Alexander Vladimirovich, candidate of technical science, docent, a_lukichov@mail.ru, DPR, Donetsk, Donetsk national technical university.

Matvienko Sergey Anatolyevich, candidate of technical science, docent, serge-matvienko@yandex.ru, DPR, Donetsk, Donetsk national technical university.

**ПРИМЕНЕНИЕ ОТКРЫТОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
OPENCALPHAD ДЛЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
В МЕТАЛЛУРГИИ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ**

**APPLICATION OF OPENCALPHAD OPEN SOFTWARE
FOR THERMODYNAMIC MODELING IN METALLURGY
AND MATERIAL SCIENCE**

ПРУСОВ Е.С.

*(Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых,
г. Владимир, Российская Федерация)*

PRUSOV E.S.

*(Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs,
Vladimir, Russia)*

***Аннотация.** Показаны основные тенденции развития компьютерных методов вычислительной термодинамики и направления их использования при проектировании новых материалов. Дана общая характеристика программных продуктов, применяемых для термодинамического моделирования многокомпонентных систем по методу CALPHAD. Проиллюстрированы возможности открытого программного обеспечения OpenCalphad при построении равновесных фазовых диаграмм.*

***Abstract,** The main trends in the development of computer methods of computational thermodynamics and the directions of their use in the design of new materials are shown. The general characteristic of software used for thermodynamic modeling of multicomponent systems by the CALPHAD method is given. The OpenCalphad free software features at the construction of equilibrium phase diagrams are illustrated.*

***Ключевые слова:** термодинамическое моделирование, свободное программное обеспечение, OpenCalphad, расчет фазовых диаграмм*

***Keywords:** thermodynamic modeling, free software, OpenCalphad, phase diagrams calculation*

Инновации в области создания новых материалов на протяжении всей мировой истории лежали в основе научно-технического прогресса. Однако на современном этапе традиционные подходы, основанные на интуитивном научном поиске и методах «проб и ошибок», уже не удовлетворяют интенсивно растущим потребностям высокотехнологичных отраслей промышленности в новых материалах, соответствующих постоянно ужесточающимся условиям эксплуатации изделий [1]. Такие подходы характеризуются высокой трудоемкостью, ресурсозатратностью и в большинстве случаев не приводят к положительным результатам при попытках создания материалов с требуемым

уровнем свойств и необходимым комплексом эксплуатационных характеристик. В этой связи общемировой тенденцией в этом направлении является поиск методов ускорения процесса разработки новых материалов с заданными свойствами.

Осознавая решающее значение интенсификации создания и внедрения современных функциональных и конструкционных материалов для достижения глобального экономического и военного превосходства, в 2011 году Правительство США запустило национальный инфраструктурный проект разработки «генома материалов» (Materials Genome Initiative, MGI) [2]. Основной задачей инициативы MGI является обеспечение разработки новых материалов на основе создания баз данных по свойствам веществ и компьютерного инструментария для прогнозирования свойств и поведения материалов, а также развития прорывных методов моделирования и анализа данных. Аналогичные проекты были инициированы и в других развитых и развивающихся странах [3], в частности, в Японии (Elements Strategy Initiative, 2012), Индии (Mapping the Materials Genome, 2012), Китае (Key Technology and Supporting Platform for Materials Gene Engineering, 2016). В Европейском союзе с целью ускорения разработки материалов с заданными функциональными свойствами в 2015 году запущена программа NoMaD (Novel Materials Discovery) в рамках проекта HORIZON 2020. Таким образом, тенденции последних лет в области разработки новых материалов характеризуются повышенным вниманием к развитию информационно-вычислительных методов с последующим их применением для моделирования материалов и прогнозирования поведения последних в условиях эксплуатации.

Вычислительные термодинамические методы получили широкое распространение для решения различных фундаментальных и прикладных задач, связанных с разработкой высококачественных литых материалов и технологических процессов их получения [4-6]. При использовании совместно с традиционными экспериментальными методами, расчетные методы вычислительной термодинамики позволяют существенно сократить затраты времени и других ресурсов, необходимые для вывода новых материалов и изделий из них на рынок. Применение термодинамических методов при моделировании технологических процессов получения материалов дает информацию о состоянии системы, включая различные экзотермические /эндотермические эффекты, изменения в объеме, химические потенциалы, диффузионные процессы и др. Фактически, термодинамическое моделирование должно давать ответ на вопрос, как необходимо управлять внешними переменными факторами, чтобы получить требуемую структуру и свойства материала.

Метод CALPHAD (Calculation of Phase Diagrams), реализуемый с использованием баз данных по термодинамическим и другим физическим свойствам, является в настоящее время наиболее распространенным для выполнения термодинамических расчетов многокомпонентных и многофазных систем при обеспечении точности, достаточной для практического использования [7]. Изначально метод CALPHAD был разработан для расчета фазового равновесия и использует математические модели для описания

свойств многокомпонентных систем как функций от температуры, состава и (в отдельных случаях) давления. По мере появления доступных термодинамических описаний для унарных, двойных и тройных систем эти описания были объединены в термодинамические базы данных для многокомпонентных систем, которые пригодны для термодинамических расчетов промышленных сплавов.

Для получения адекватных результатов моделирования по методу CALPHAD существенным требованием является необходимость интегрировать термодинамический код в соответствующее прикладное программное обеспечение. В настоящее время на мировом рынке представлен широкий спектр программных продуктов для термодинамического моделирования [8-13]: FactSage (Канада/Германия), MatCalc (Австрия), MTDATA (Великобритания), Pandat (США/Корея), Thermo-Calc (Швеция) и др. Однако лицензии на такие коммерческие программные продукты являются очень дорогостоящими, поэтому они недоступны большинству исследователей. Так, стоимость простой (неисключительной) лицензии на многофункциональный программный пакет Thermo-Calc достигает 27 000 евро без НДС (в ценах 2017 года).

Для преодоления проблем, связанных с высокой стоимостью термодинамического программного обеспечения, заинтересованные исследователи и разработчики самостоятельно создают необходимые расчетные программы, в том числе с открытым исходным кодом. Одним из наиболее масштабных проектов в этой сфере является разработка системы Open Calphad (инициатор – International Center for Advanced Materials Simulations, Германия), представляющей собой высококачественное свободно распространяемое программное обеспечение, предназначенное для компьютерного термодинамического моделирования многокомпонентных систем на основе методологии CALPHAD [14]. OpenCalphad пригоден для выполнения расчетов равновесия многокомпонентных систем с гибким набором условий, а также для построения диаграмм свойств и равновесных фазовых диаграмм. Программное обеспечение распространяется в открытом режиме по лицензии GNU GPL (General Public License), что позволяет пользователям при необходимости вносить изменения в исходный код для адаптации к конкретным областям применения. В качестве исходных данных для моделирования используется информация, систематизированная в открытых термодинамических базах NIST Materials Measurement Laboratory (США), NIMS Materials Database (Япония), COST507 (Евросоюз) и др. базах, распространяемых по лицензии Open Database License (формат TDB).

Некоторые примеры фазовых диаграмм, построенных в системе OpenCalphad, приведены на рис. 1 (файлы макросов для их создания распространяются вместе с программой).

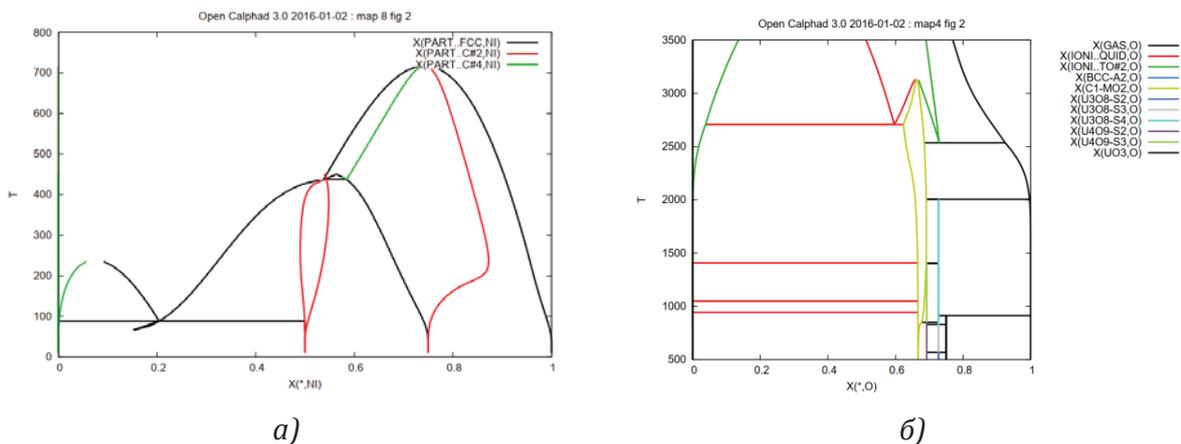


Рис. 1. Примеры фазовых диаграмм, построенных в системе OpenCalphad:
 а) стабильное и метастабильное упорядочение в системе Fe-Ni;
 б) участок фазовой диаграммы системы O-U.

По результатам тестирования на платформах Windows и Linux программа OpenCalphad по общей производительности была признана сопоставимой с коммерческими программными пакетами для термодинамического моделирования, такими как FactSage, Pandat и Thermo-Calc [15].

К недостаткам системы можно отнести то, что программный код OpenCalphad не позволяет считывать проприетарные, защищенные файлы баз данных, используемые коммерческими программами. В этой связи перечень доступных для расчета систем ограничивается наличием соответствующих открытых баз данных по термодинамическим параметрам для конкретной системы. Кроме того, пакет OpenCalphad пока не имеет собственного графического интерфейса, поэтому для его применения необходимо использование внешних графических программ, таких как gnuplot. Однако, поскольку проект OpenCalphad (<http://www.opencalphad.com>) активно развивается инициативными разработчиками со всего мира, можно ожидать, что в ближайшем будущем возможности программного пакета будут существенно расширены.

Можно констатировать, что инициатива OpenCalphad вносит значительный вклад в создание гибкого, надежного и универсального программного обеспечения, доступного любым исследователям, заинтересованным в термодинамическом моделировании материалов и процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Chen L. The Materials Genome Initiative and Advanced Materials. Engineering. 2015, Vol. 1(2), p. 169.
2. R. Ramprasad, R. Batra, G. Pilania, A. Mannodi-Kanakkithodi, C. Kim. Machine learning in materials informatics: recent applications and prospects, npj Computational Materials (2017) 3, 54.
3. Lin H.Q. Boosting computational capabilities. Nature Materials, 2016, Vol.15, No.7, pp. 693-694.
4. Shi R., Luo A.A. Applications of CALPHAD modeling and databases in advanced lightweight metallic materials. Calphad: Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry, 2018, Vol. 62, pp. 1-17.
5. Widom M. Modeling the structure and thermodynamics of high-entropy alloys. Journal of Materials Research, 2018. Vol. 33, Iss. 19. pp. 2881-2898.

6. Gopakumar A.M., Balachandran P.V., Xue D., Gubernatis J.E., Lookman T. Multi-objective Optimization for Materials Discovery via Adaptive Design. *Scientific Reports* 2018, 8(1), 3738.
7. Sundman B., Chen Q., Du Y. A Review of Calphad Modeling of Ordered Phases. *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, 2018, Vol. 39(5), pp. 678-693.
8. Sundman B., Kattner U.R., Palumbo M., Fries S.G. OpenCalphad– a free thermodynamic software. *Integrating Materials and Manufacturing Innovation*, 2015, Vol. 4, pp. 1-15.
9. Bale C.W., Bêlisle E., Chartrand P., Deckerov S.A., Eriksson G., Hack K., Jung I.-H., Kang Y.-B., Melançon J., Pelton A.D., Robelin C., Petersen S. FactSage thermochemical software and databases – recent developments. *Calphad*, 2009, Vol.33, pp. 295–311.
10. Colombo M., Gariboldi E. Prediction of the yield strength and microstructure of a cast Al-Si-Mg alloy by means of physically-based models. *Metallurgia Italiana*, 2017, Vol. 109(5), pp. 5-14.
11. Gisby J., Taskinen P., Pihlasalo J., Li, Z., Tyrer, M., Pearce, J., Avarmaa, K., Björklund, P., Davies, H., Korpi, M., Martin, S., Pesonen, L., Robinson, J. MTDATA and the Prediction of Phase Equilibria in Oxide Systems: 30 Years of Industrial Collaboration. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, 2017, 48(1), pp. 91-98.
12. Cao W., Chen S.-L., Zhang F., Wu. K., Yang Y., Chang Y.A., Schmid-Fetzer R., Oates W.A. The Pandat software with PanEngine, PanOptimizer and PanPrecipitation for multi-component phase diagram calculation and materials property simulation. *Calphad*, 2009, Vol.33, pp. 328–342.
13. Chen, Q., Engström, A., Höglund, L., Strandlund, H., Sundman, B. Thermo-Calc program interfaces and their applications - Direct insertion of thermodynamic and kinetic data into modeling of materials processing, structure, and property. *Materials Science Forum*, 2005, Vol. 475-479(IV), pp. 3145-3148.
14. Sundman B., Kattner U.R., Palumbo M., Fries S.G. OpenCalphad – free thermodynamic software. *Integrating Materials and Manufacturing Innovation*. 2015, Vol. 4, p. 1.
15. B. Sundman, U.R. Kattner, C. Sigli, M. Stratmann, R. Le Tellier, M. Palumbo, S.G. Fries. The OpenCalphad thermodynamic software interface. *Computational Materials Science*, 2016, Vol. 125, pp. 188–196.

АВТОР

Прусов Евгений Сергеевич, к.т.н., доцент, 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87, кафедра «Технологии функциональных и конструкционных материалов», тел. (4922) 47-98-21, e-mail: eprusov@mail.ru

AUTHOR

Prusov Evgeny Sergeevich, PhD, Assoc. Prof., 600000, Vladimir, Gorky St., 87, Department of Functional and Constructional Materials Technology, tel. (4922) 47-98-21, e-mail: eprusov@mail.ru

**АНАЛИЗ ИСХОДНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА
ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОТЯЖЕННОГО КОРПУСА**

**ANALYSIS OF THE SOURCE PROCESS TO MANUFACTURE
THE EXTENDED HOUSING**

ЯМНИКОВ А.С., РОДИОНОВА Е.Н., МАТВЕЕВ И.А.

(ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», г. Тула, Россия)

YAMNIKOV A. S., RODIONOVA E. N., MATVEEV I. A.

(Tula state University, Tula, Russia)

***Аннотация.** В статье рассмотрен процесс изготовления одной из составляющих частей реактивных снарядов систем залпового огня. Проведен анализ технологии изготовления протяженного корпуса, используемой в реальных производственных условиях для массового производства. Описаны основные технологические операции с указанием станков, оснастки и режущего инструмента. Проведены измерения заданного в конструкторской документации параметра на партии деталей. На основе замеров построены графики. Установлено, что не все детали из партии укладываются в допуски, заданные конструкторской документацией. Сделан вывод о высокой стабильности технологического процесса токарной обработки заготовки. Существует необходимость в проведении дальнейших исследований для выяснения причин появления брака.*

***Annotation.** The article describes the process of making one of the component parts of missiles systems of volley fire. In the text the technology of manufacturing of the extended case used in real production conditions for mass production is considered. The basic technological operations with the indication of machines, tooling and cutting tools are described. Measurements of the parameter set in the design documentation on the part batch are carried out. On the basis of measurements graphs are built. It is established that not all parts from the batch are placed in the tolerances specified in the design documentation. It is concluded that the high stability of the technological process of turning the workpiece. There is a need for further research to determine the causes of marriage.*

***Ключевые слова:** токарная обработка, погрешности точения, статистический анализ, точностная надежность.*

***Keywords:** turning, turning errors, statistical analysis, precision reliability.*

Важнейшей задачей, стоящей перед оборонной промышленностью, является освоение и выпуск новых видов вооружения, обладающих высокими качествами, усовершенствованными боевыми характеристиками, а также конкурентоспособностью на внешнем рынке [1]. К таким изделиям относится РСЗО «Торнадо-С», выпускающиеся на предприятии АО «НПО «СПЛАВ» [2-4].

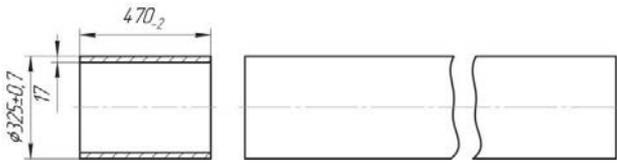
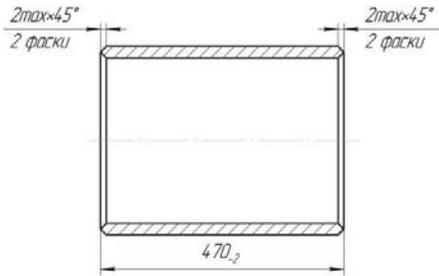
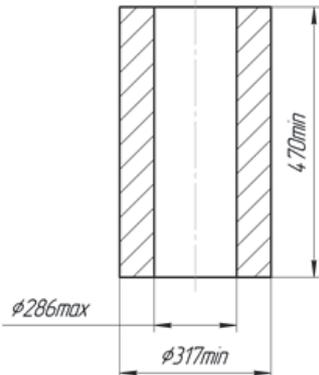
Одной из ответственных деталей реактивного снаряда является «Труба». Технологический процесс изготовления детали разработан для условий серийного производства и ориентирован, соответственно, на сравнительно большой объем выпуска продукции [5].

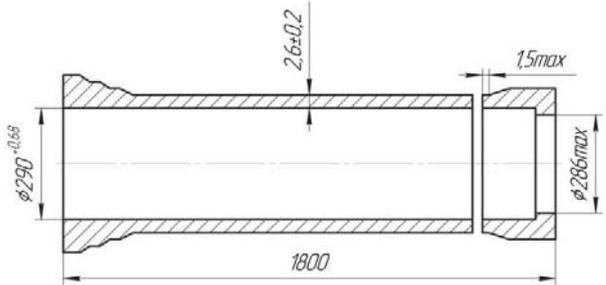
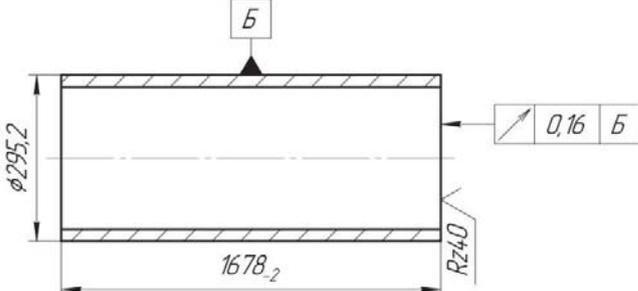
Исходя из перспективы улучшения тактико-технических характеристик (ТТХ) изделия [6], следует признать актуальным усовершенствование технологического процесса изготовления «Трубы» в условиях серийного производства, проведя на начальном этапе статистическую обработку опытных данных процессов механической обработки изделия [7].

Технология предусматривает следующие этапы технологического процесса: отрезка заготовки, точение фасок, обжим, подрезка торцов, точение поверхности, расточка отверстия, точение фаски, отрезка заготовки, подрезка торцов.

Исходной заготовкой является труба 325×17 по ТУ 14-3-1843-92. Операционные эскизы технологического процесса обработки приведены в таблице 1.

Таблица 1. Основные операции маршрутной технологии обработки

Наименование операции	Операционный эскиз
Заготовительная	
Токарная	
Обжим	

Ротационная вытяжка	
Токарная	

Заготовительная операция производилась на станке ленточно-пилильном Rusch-520 А.

Токарные операции выполнялись на станке токарно-винторезном 1М63, с использованием резца токарного проходного отогнутого с пластиной из твердого сплава 2102-0055 Т15К6 по ГОСТ 18877-73.

Обжим производился на прессе «Польте» с усилием 8000 кН (800 тс). Штамп состоит из штампа, двух матриц, пуансона, втулки направляющей, бандажа, кольца промежуточного.

Точение поверхности производилось резцом токарным проходным прямым с пластинами из твердого сплава 2100-0213 ВК6 ГОСТ 18878-73. При выполнении операции выдерживались размеры, заданные в конструкторской документации.

Отрезка заготовки на токарной операции выполнялась резцом токарным отрезным с пластинами из твердого сплава 2130-0002 Т15К6 ГОСТ 18884-73.

Очевидно, в таком многооперационном технологическом процессе существенное влияние может оказывать проявление технологической наследственности погрешностей операций обработки давлением на точность после обработки резанием [8-20].

В эксперименте, проведенном в реальных производственных условиях, была обработана партия деталей в количестве 100 штук, для которой были проведены статистические исследования точности параметров (таблица 2). Ниже приведены данные, контролируемых параметров партии деталей, а именно торцовых биений с предельным допуском 0,16 мм.

Таблица 2. Фактические значения исследуемого биения партии деталей

№ n/n	1-ый торец	2-ой торец
1	0,07	0,09
2	0,08	0,11
3	0,06	0,09
4	0,12	0,15
5	0,10	0,06
6	0,09	0,10
7	0,12	0,13
8	0,10	0,14
...		
94	0,05	0,09
95	0,15	0,08
96	0,10	0,09
97	0,05	0,08
98	0,06	0,07
99	0,04	0,08
100	0,06	0,10



Рис.1 Колебания биения торца 1



Рис.2 Колебания биения торца 2

По графикам наглядно видно, что из замеренной партии деталей 7 штук вышли за пределы допуска при измерении 1-го торца и 4 штуки при измерении 2-го торца.

Проведенные исследования обработки детали «Труба» показывают, что технологический процесс налажен. Параметры, заложенные в технологическом процессе в большей части выполнены в пределах допусков по точности обработки, однако некоторые параметры проверяемых изделий выходят за поле допуска, что дает возможность для проведения дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Военно-технический сборник «Бастион». Журнал оборонно-промышленного комплекса. 19 апреля 2017. [электронный ресурс]. URL: http://bastion-karpenko.ru/opk_rf. (дата обращения 17.04.17).
2. Сайт АО «НПО «СПЛАВ». [электронный ресурс]. URL: <http://www.splav.org> (дата обращения 06.07.18).
3. Гуров С.В. Реактивная система залпового огня 9К58 «Смерч» // Реактивные системы залпового огня. Обзор. Изд. 2, электронное, периодическое исп. и доп. Тула: ФГУП ГНПП «Сплав», 2010. 206 с.
4. Система залпового огня "Торнадо": характеристики. "Торнадо-Г" - реактивная система залпового огня [электронный ресурс]. URL: <http://fb.ru/article/186795/sistema-zalpovogo-ognya-tornado-harakteristiki-tornado-g-reaktivnaya-sistema-zalpovogo-ognya> (дата обращения 06.07.18).
5. Kugultinov S. P., Khisamutdinov R. M., Khisarntdinov M. R. Tool Creation and Operation System Development for Large Engineering Enterprises // World Applied Sciences Journ. (WoS). 2014. N 30 (5). P. 588 - 591.
6. Влияние технологических отклонений при изготовлении РС РСЗО на их рассеивание при стрельбе / А.А. Редько, С.А. Полторыхин, С.А. Кудрявцев и И.Л. Косарев // Боеприпасы и высокоэнергетические конденсированные системы. № 1, 2008. С. 32-35.
7. Матвеев И.А., Ямников А.С., Ямникова О.А. Влияние погрешностей базовой детали на погрешности сборки протяженных осесимметричных корпусов // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2018 Том 19 № 2 С. 59-63.
8. Дальский А.М. Технологическая наследственность в сборочном производстве. М.: Машиностроение, 1978 45 с.
9. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве / Дальский А.М., Базров Б.М., Васильев А.С. [и др.] Под ред. А.М. Дальского М.: Изд-во МАИ, 2000 364 с.
10. Sosenushkin E.N., Yanovskaya E.A., Emelyanov V.V. Stress state and deformability of metal in axisymmetric extension // Engineering Research. 2015. Vol. 35. № 6. P. 462—465.
11. Petro D. Kryvyi, Volodymyr O. Dzyura, Nadiya M. Tymoshenko and Volodymyr V. Krupa. Technological Heredity and Accuracy of the Cross-Section Shapes of the Hydro-Cylinder Cylindrical Surfaces // ASME 2014 International Manufacturing Science and Engineering Conference collocated with the JSME 2014 International Conference on Materials and Processing and the 42nd North American Manufacturing Research Conference. Volume 2: Processing. Detroit, Michigan, USA, June 9–13, 2014. Paper No. MSEC2014-3946, pp. V002T02A037; 6 pages. doi:10.1115/MSEC2014-3946.
12. Igor Malkov, Gennadiy Sirovoy, Sergey Kashkarov, Igor Nepran. CAD/CAE simulation of mechanical properties of tubular elements made from composite structures // ТЕКА, Commission of motorization and energetics in agriculture, Lublin, Poland-2013. Vol. 13 N. 3. -P. 133-138.
13. The problems of metrological support for the preparation of production in machine construction / S.N. Grigoriev, V.I. Teleshevskii, A.V. Glubokov et al. // Measurement Techniques. 2012. Vol. 55. Is. 5. P. 526—529.

14. Yamnikov A.S., Chuprikov A.O. Chucks For Thin-Walled Blanks // Russian Engineering Research. 2015. T. 35. № 11. С. 838-840.
15. Demeyere M., Dereine E., Eugene C., Naydenov V. Measurement of cylindrical objects through laser telemetry: application to a new forest caliper // IEEE Trans. Instrument. Measur. 2002. Vol. 51, N. 4. P. 645-649.
16. Ротационная вытяжка осесимметричных оболочек из анизотропных материалов с разделением очага деформации / С.С. Яковлев, В.И. Трегубов, О.В. Пилипенко [и др.] // Вестник машиностроения. 2015. №1. С. 72-78.
17. Трегубов В.И. Инновационные технологические процессы ротационной вытяжки сложнопрофильных осесимметричных деталей / В.И. Трегубов, С.С. Яковлев [и др.] // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2013. № 11. С. 9-16.
18. Астапов В.Ю. Ротационная вытяжка тонкостенных цилиндрических деталей // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2015. № 2. С. 15-18.
19. Sosnushkin E.N., Yanovskaya E.A., Emelyanov V.V. Stress state and deformability of metal in axisymmetric extension // Engineering Research. 2015. Vol. 35. № 6. P. 462—465.
20. Ямников А.С., Борискин О.И., Ямникова О.А., Матвеев И.А. «Технологическое наследование свойств исходной заготовки в параметрах точности протяженных осесимметричных деталей» // "Черные металлы". №12. С. 50-56.

АВТОРЫ

Ямников Александр Сергеевич, 300012, г. Тула, пр. Ленина, 92, ФГБОУ ВО Тульский государственный университет, профессор кафедры «Технология машиностроения», доктор технических наук, профессор, т. (4872) 25-46-48, 8 (910) 941-30-11, yamnikovas@mail.ru

Родионова Елена Николаевна, 300026, г. Тула, ул. Пархоменко, д. 53, аспирант, ФГБОУ ВО Тульский государственный университет, начальник Центральной измерительной лаборатории, АО «НПО «СПЛАВ», т. 8 (910) 580-70-90, masik-ele@yandex.ru

Матвеев Иван Александрович, 300034, г. Тула, ул. Бундурина 34-А, кв. 58, аспирант, ФГБОУ ВО Тульский государственный университет, заместитель начальника цеха по производству, АО «НПО «СПЛАВ», т. 8 (962) 278-70-33, ivan_matveev@list.ru.

THE AUTHORS

Yamnikov Alexander Sergeevich, 300012, Tula, Lenin Ave., 92, FSBEI of HE Tula State University, Professor of the Department "Mechanical Engineering", Doctor of Technical Sciences, Professor, t. (4872) 25-46-48, 8 (910) 941-30-11, yamnikovas@mail.ru

Rodionova Elena Nikolaevna, 300026, Tula, ul. Parkhomenko, 53, post-graduate student, FSBEI of HE Tula State University, head of the Central Measuring Laboratory, JSC "SPA" SPLAV", t. 8 (910) 580-70-90, masik-ele@yandex.ru

Matveev Ivan Alexandrovich, 300034, Tula, ul. Bundurin 34-A, apt. 58, postgraduate student, FSBEI HE Tula State University, deputy head of the production department, NPO SPLAV, tel. 8 (962) 278-70-33, ivan_matveev@list.ru.

**АЛГОРИТМ И ИНТЕРФЕЙС СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ
ВЫБОРА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА
ДЛЯ ОБРАБОТКИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ КОМПОЗИТОВ**

**ALGORITHM AND INTERFACE OF THE TOOL FOR AUTOMATING
THE SELECTION OF CUTTING TOOLS
FOR PROCESSING HIGH-STRENGTH COMPOSITES**

РЫЧКОВ Д.А.^{1,А}, СМИРНОВА Д.А.^{1,В}, ЯНЮШКИН А.Р.^{2,С}

(¹ Братский государственный университет, Братск, Россия

*² Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова,
Чебоксары, Россия)*

RYCHKOV D.A.^{1,A}, SMIRNOVA D.A.^{1,B}, YANYUSHKIN A.R.^{2,C}

(¹ Bratsk State University, Bratsk, Russia

² Ulianov Chuvash State University, Cheboksary, Russia)

***Аннотация.** При проектировании технологического процесса обработки деталей важным этапом является выбор режущего инструмента и его характеристик. В настоящее время промышленность располагает широкой номенклатурой конструкций инструментов, однако анализ и выбор их для определенного вида технологического процесса является актуальной проблемой. Это связано с недостатком информации о процессах резания высокопрочных материалов и отсутствии рекомендаций по конструктивным особенностям режущих инструментов при изменяющихся параметрах производства. Для повышения эффективности технологической подготовки производства при обработке высокопрочных материалов в настоящем исследовании создана система автоматизированного проектирования режущих инструментов для обработки высокопрочных материалов, позволяющая оптимизировать разработку технологического процесса. Систематизация и выбор рациональной конструкции инструмента выполняется в соответствии с разработанными методиками моделирования и сравнительного анализа конструктивных решений. Применение программного обеспечения позволяет сократить сроки проектирования технологического процесса на 80...85 %, и получить существенный годовой экономический эффект.*

***Annotation.** When designing the technological process of processing parts, an important step is the selection of the cutting tool and its characteristics. Currently, the industry has a wide range of tool designs, but the analysis and selection of them for a certain type of technological process is an urgent problem. This is due to the lack of information on the cutting processes of high-strength materials and the lack of recommendations on the design features of cutting tools with changing production parameters. To increase the efficiency of technological preparation of production for*

the processing of high-strength materials, this study has created a system for automated design of cutting tools for the processing of high-strength materials, which makes it possible to optimize the development of the technological process. The systematization and selection of the rational design of the tool is carried out in accordance with the developed methods of modeling and comparative analysis of design solutions. Application of the software allows to reduce the terms of designing the technological process by 80 ... 85%, and to obtain a significant annual economic effect.

Ключевые слова: САПР, композиционный материал, режущий инструмент
Keywords: CAD, composite material, cutting tools.

При проектировании технологического процесса обработки деталей важным этапом является выбор режущего инструмента и его характеристик. От этого зависит стабильность процесса резания, производительность обработки и экономическая эффективность производства. Большую актуальность составляет подбор режущего инструмента и технологических параметров для обработки высокопрочных материалов, в частности композитов с высокопрочными упрочнителями на различных связках. При этом важно учитывать геометрические параметры режущего инструмента, твердость и прочность режущей части, режимы резания и т.п. [1 – 9] В настоящее время промышленность располагает широкой номенклатурой конструкций инструментов, однако анализ и выбор их для определенного вида технологического процесса является актуальной проблемой. Это связано с недостатком информации о процессах резания высокопрочных материалов и отсутствии рекомендаций по конструктивным особенностям режущих инструментов при изменяющихся параметрах производства.

Одним из путей решения этой проблемы является создание программного обеспечения, позволяющего проектировать конструкцию режущего инструмента, назначать параметры обработки и давать оценку эффективности производства при заданных параметрах производительности обработки, качества обработанной поверхности и экономичности. Существующие на сегодняшний день программы и информационные системы при назначении режущего инструмента и режимов резания руководствуются лишь качеством обработанной поверхности и не учитывают производительность обработки, работоспособность инструмента и экономическую целесообразность его применения [10 – 12].

В связи с этим создание системы автоматизированного проектирования режущих инструментов для обработки высокопрочных материалов, позволяющей оптимизировать разработку технологического процесса, а также повысить качество и эффективность обработки высокопрочных материалов, является актуальной задачей для современной промышленности.

Целью научного исследования является повышение эффективности технологической подготовки производства при обработке высокопрочных материалов путем создания системы автоматизированного проектирования режущего инструмента.

Ранее нами были разработаны методики оценки параметров технологического процесса, обеспечивающих логику работы программы. Согласно этим методикам для оценки эффективности применения режущих инструментов по критериям производительности, экономичности и работоспособности и выявления рациональной конструкции режущего инструмента для заданных условий производства необходим набор исходной информации [13 – 20]. Для расчета необходимо знать следующие основные данные:

1. Обрабатываемый материал, для которого производится подбор режущего инструмента. Здесь, помимо марки обрабатываемого материала, необходимо знать также его физико-механические свойства, такие как предел прочности, модуль упругости, твердость, плотность и т.п. Для повышения производительности ввода исходных данных целесообразно указывать лишь марку материала, а информацию о его свойствах хранить отдельно.

2. Значимость производственных критериев, совокупность которых определяет задаваемые условия производства. Согласно методике сравнительного анализа, разработанной на первом этапе настоящего исследования, каждому критерию может быть назначена степень его значимости для конкретного случая. Это позволит сделать анализ в соответствии со спецификой проектируемого технологического процесса.

3. Тип производства. В зависимости от типа производства повышается производительность технологического процесса, что влияет на расчет критериев.

Помимо этого, для корректного расчета должны быть известны физико-механические свойства инструментальных материалов, геометрические, линейные и экономические характеристики режущих инструментов, тариф оплаты рабочего инструментальщика, стоимость электроэнергии и т.п. Хранение этой информации обеспечивается в базах данных и базах знаний, которые представлены далее.

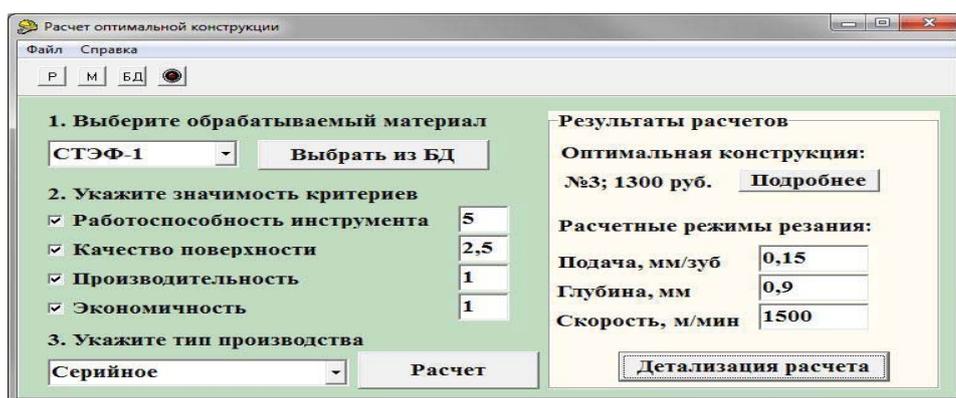


Рис. 1. Интерфейс программного модуля для определения оптимального режущего инструмента

Для определения оптимальной конструкции режущего инструмента для конкретных условий обработки запускается программный модуль, интерфейс которого представлен на рис. 1. Вначале пользователю предлагается ввести

исходные данные для расчета: марку обрабатываемого материала, коэффициенты значимости критериев и тип производства. При необходимости имеется возможность вызова справки по заполнению полей исходных данных. Стоит отметить, что обрабатываемый материал может быть выбран из соответствующей базы данных путем нажатия кнопки «Выбрать из БД». Эта кнопка запускает программный модуль, содержащий информацию о различных конструкционных и композиционных материалах, применяемых в промышленности.

После ввода исходных данных следует нажать кнопку «Расчет», после чего произойдет автоматическое вычисление критериев и коэффициентов по методикам, разработанным на предыдущих этапах исследования.

После расчета производится сортировка записей базы данных по весовому критериальному коэффициенту. Максимальный коэффициент свидетельствует об оптимальности применения того или иного технологического процесса.

Результаты расчетов по определению оптимальной технологии обработки выводятся в правой части модуля (рис. 1). Она представляет собой краткий отчет, в котором отражен номер оптимальной конструкции режущего инструмента в базе данных в соответствии с параметрами расчета. Нажатие на кнопку «Подробнее» приводит к открытию модуля с базой данных режущих инструментов с соответствующим номером.

Также выводятся расчетные предлагаемые режимы резания, обеспечивающие наибольшую эффективность производства.

Для вывода подробной информации необходимо нажать кнопку «Детализация расчета». Откроется окно табличной формы (рис. 2), где показаны основные параметры инструмента (вид крепления пластин, материал режущей части, диаметр резания, геометрия инструмента, тип режущих элементов и их количество, посадочный диаметр и стоимость) и значения критериев расчета по каждой конструкции: ПЗ – приведенные затраты в руб/мм³; П – производительность в мм³/мин; Р – работоспособность в мин; q – весовой критериальный коэффициент.

Сборка	Материал	Диаметр	Альфа	Бета	Режущая часть	z	D	Цена	ПЗ	П	Р	q
Сборная (плавное соединение)	Р6М5	150	15	15	Режущие элементы с возможностью заточки	6	40	1050	40,2	2300,1	0,5	0,1
Сборная (с механическим креп	У12	20	2	2	Режущие элементы с возможностью заточки	4	32	525	39,54	2100,2	0,5	0,1
Сборная (с механическим креп	ВК3-М	150	25	12	Режущие элементы с возможностью заточки	4	32	4800	2,5	8882,8	189	2,2
Сборная (с механическим креп	ТН20	125	15	20	Сменные поворотные многогранные режущ	4	32	1800	33,2	4522,6	12,4	0,6
Сборная (с механическим креп	ВК10-ОМ	250	10	10	Режущие элементы с возможностью заточки	2	32	1200	6,1	6523,2	48,7	1,1
Сборная (с механическим креп	ВК3	200	10	10	Режущие элементы с возможностью заточки	6	32	2000	2,8	8804,8	150,1	1,4
Сборная (с механическим креп	Т30К4	150	10	15	Режущие элементы с возможностью заточки	4	32	3000	3,5	6841,6	45,4	1,2
Сборная (с механическим креп	КНТ20	200	15	15	Сменные поворотные многогранные режущ	6	32	4000	35,2	6522,2	30,3	1,2
Сборная (с механическим креп	ВОК63	150	16	16	Сменные поворотные многогранные режущ	6	32	8000	2,2	9200,1	230,3	2,5
Сборная (с механическим креп	ВК6-ОМ	250	20	7	Режущие элементы с возможностью заточки	8	32	3000	2,6	9003,5	178,2	2,4

Рис. 2. Детализация расчета по оптимизации технологического процесса

Детализация расчета позволяет корректировать условия технологического процесса при проектировании различных операций механической обработки. Кроме того, результаты расчета могут быть полезны для оценки технико-экономических показателей производства.

Для работы программного модуля по определению рациональной конструкции режущего инструмента и оптимизации технологического процесса в автоматическом режиме (рис. 1) необходимо наличие справочной информации о свойствах материалов. Их номенклатура весьма широка и продолжает расти. В связи с этим разрабатывается программный модуль, позволяющий формировать базу знаний программы о свойствах инструментальных и обрабатываемых материалов.

Для инструментальных материалов форма диалогового окна представлена на рис. 3. Она позволяет перемещаться по записям, редактировать маркировку и свойства инструментальных материалов. При необходимости записи могут добавляться, пополняя базу знаний программного обеспечения. На сегодняшний день информационная база программы содержит более 600 марок инструментальных материалов, разделенных на 7 групп.

Систематизация информации об обрабатываемых материалах производится в программном модуле, разработанном ранее [21, 22]. Он позволяет добавлять новые материалы, производить выбор рационального материала из созданной базы данных, сохранять текущее состояние введенной информации, создавать и просматривать отчеты по всем параметрам, характерным для рассматриваемого элемента.

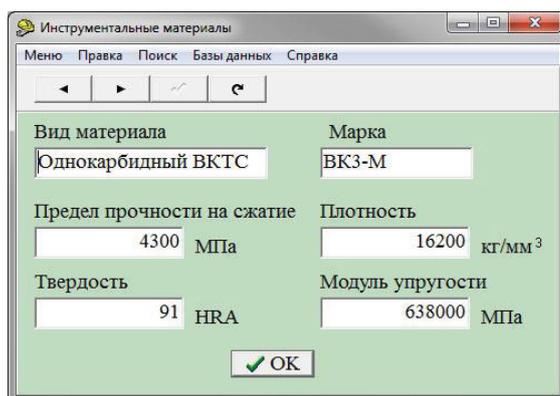


Рис. 3. Интерфейс модуля для формирования информации о свойствах инструментальных материалов

Таким образом, на основе результатов исследования можно сделать следующие выводы:

1. Проектирование процессов обработки композиционных материалов несомненно требует автоматизации ввиду большого количества переменных факторов: особенностей конструкций режущих инструментов, оборудования, обрабатываемых материалов и т.п.

2. Разработанное программное обеспечение позволяет снизить трудоемкость разработки технологических процессов и автоматизировать работу технолога.

3. Необходимо проведение дальнейших исследований с целью увеличения номенклатуры обрабатываемых и инструментальных материалов, видов обработки, создания системы инструментального обеспечения и технологической оснастки.

В целом представленная автоматизированная система может иметь практическое применение на производстве, где применяются технологии механической обработки высокопрочных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yanyushkin A.S., Rychkov D.A., Lobanov D.V. Rationalization of polymer composite materials processing by improving production efficiency // *Procedia Engineering*. 2016. С. 942–947.
2. Янюшкин А.С., Якимов С.А., Лобанов Д.В. Состояние твердотельного инструмента, заточенного различными методами электроалмазной обработки // *Вестник иркутского регионального отделения академии наук высшей школы РФ*. 2006. № 2. С. 100–104.
3. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В. Повышение качества подготовки твердосплавного инструмента // *Системы. Методы. Технологии*. 2009. № 1 (1). С. 95–98.
4. Skeebe V.Yu., Ivancivsky V.V., Zhigulev A.K., Skeebe P.Yu., Lobanov D.V. Integrated processing: quality assurance procedure of the surface layer of machine parts during the manufacturing step «diamond smoothing» // *IOP conference series: materials science and engineering*. 2016. Т. 125. № 1. P. 012031.
5. Лобанов Д.В., Янюшкин А.С., Рычков Д.А. Технологические методы изготовления и выбора режущего инструмента для фрезерования композиционных материалов на полимерной основе // *Вестник южно-уральского государственного университета. Серия: Машиностроение*. 2015. Т. 15. № 1. С. 35–46.
6. Лобанов Д.В., Янюшкин А.С. Анализ конструктивных решений фрезерного сборного инструмента для обработки композиционных материалов // *Технология машиностроения*. 2011. № 5. С. 20–25.
7. Лобанов Д.В., Янюшкин А.С. Организационно-технологическая подготовка инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2012. № 2- 2 (292). С. 17–23.
8. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Кузнецов А.М. Определение рациональных режимов обработки и геометрии инструмента при фрезеровании композиционных материалов // *Механики XXI века*. 2008. № 7. С. 203–205.
9. Bokhoeva L.A., Rogov V.E., Chermoshentseva A.S., Lobanov D.V. Stability and process of destruction of compressed plate of layered composite materials with defects // *IOP conference series: materials science and engineering*. 2016. Т. 142. № 1. P. 012077.
10. Иванов В.В. Программный комплекс T-FLEX Технология 10 // *САПР и графика*. 2006. №9. С. 44-47.
11. Каменев Е.М. Система автоматизации конструкторско-технологической подготовки производства ADEM-VX // *САПР и графика*. 2007. №12. С. 14-19.
12. Чилингаров К.А. Учет использования номерного инструмента в производстве с применением системы TechnologiCS // *САПР и графика*. 2007. №11. С. 26-31.
13. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Rychkov D.A. Automation tool preparation in the conditions of production // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. № 770. P. 739-743.
14. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Рычков Д.А. Программные продукты для автоматизации подготовки инструментального производства на предприятиях // *Ползуновский альманах*. 2008. № 4. С. 214–216.
15. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Рычков Д.А. Моделирование режущего инструмента для обработки композиционных древесных материалов // *Вестник иркутского регионального отделения академии наук высшей школы РФ*. 2009. № 2. С. 159–162.
16. Лобанов Д.В., Рычков Д.А. Автоматизация процесса создания баз данных сборного фрезерного инструмента // *Механики XXI века*. 2007. № 6. С. 327–331.
17. Рычков Д.А., Янюшкин А.С., Лобанов Д.В. Автоматизация процесса выбора конструкции режущего инструмента // *Механики XXI века*. 2008. № 7. С. 161–164.

18. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Рычков Д.А. Методика сравнительного анализа конструкций сборного режущего инструмента // Механика XXI века. 2009. № 8. С. 120–123.
19. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Рычков Д.А. Повышение эффективности производства за счет автоматизации подготовки режущего инструмента // Научные технологии в машиностроении. 2015. № 4 (46). С. 25–30.
20. Лобанов Д.В., Янюшкин А.С. Автоматизация организационной подготовки инструмента для обработки композиционных материалов // Автоматизация и современные технологии. 2013. № 3. С. 3–9.
21. Лобанов Д.В., Сидоренко С.А., Ющенко Д.А., Большешапова А.В. Методика выбора композиционных материалов взамен общепринятых конструкционных // Современные материалы, техника и технология: сборник материалов 4-й Международной научно-практической конференции 25-26 декабря 2014 г. Курск: ЗАО «Университетская книга», под редакцией Горохова А.А., 2014. С. 255–261.
22. Лобанов Д.В., Сидоренко С.А., Ющенко Д.А., Большешапова А.В. Анализ и рациональный выбор полимерных композиционных материалов для изделий по их физико-механическим свойствам // Актуальные проблемы в машиностроении. 2015. № 2. С. 206–212.

АВТОРЫ

- Рычков Даниил Александрович** - Братский государственный университет, Братск, Россия.
- Смирнова Дарья Алексеевна** - Братский государственный университет, Братск, Россия.
- Янюшкин Андрей Романович** - Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, Чебоксары, Россия.

THE AUTHORS

- Rychkov Daniil Aleksandrovich** - Bratsk State University, Bratsk, Russia.
- Smirnova Daria Alekseevna** - Bratsk State University, Bratsk, Russia.
- Yanyushkin Andrey Romanovich** - I.N. Chuvash State University Ulyanova, Cheboksary, Russia.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПЛОСКИХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СПЛАВА ВТ22 ПРИ МАЯТНИКОВОМ ШЛИФОВАНИИ

СОЛЕР Я. И., КАЗИМИРОВ Д.Ю., МАЙ ДИНЬ ШИ

*(Иркутский национальный исследовательский технический университет,
Иркутск, Россия)*

SOLER Y.I., KAZIMIROV D.YU., SHI MAY DI

*(Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia)*

Аннотация. Рассмотрены технологические возможности повышения прочности опорной поверхности плоских деталей из титановых сплавов.

Annotation. The technological possibilities of increasing the strength of the supporting surface of flat parts made of titanium alloys are considered.

Ключевые слова: опорная поверхность, шлифование, титановый сплав, статистика, меры положения и рассеяния.

Keywords: bearing surface, grinding, titanium alloy, statistics, measures of position and scattering.

ВВЕДЕНИЕ

Титановые сплавы обладают уникальной комбинацией свойств: высокой удельной прочностью, коррозионной стойкостью в самых разнообразных средах и жаропрочностью [1]. Они в разной мере востребованы в авиационной и космической технике, газоперекачивающей аппаратуре, химическом оборудовании и судостроении. Все марки титановых сплавов, особенно высокопрочные ($\sigma_s > 1000$ МПа), имеют технологический недостаток – низкую обрабатываемость инструментами из традиционных абразивов (электрокорунда, карбида кремния) стандартной пористости: (6-7)-ой структур. По этой причине удельный вес шлифования при изготовлении титановых деталей до сих пор остается намного ниже по сравнению со стальными. Сказанное негативно сказывается на технологическом прогрессе в указанных выше отраслях машиностроения.

Титановый сплав ВТ22 является двухфазным ($\alpha+\beta$). Присутствие β -стабилизаторов в количестве 11,8%-ов позволяет проводить эффективную термообработку (закалку, старение), после которой он входит в группу титановых сплавов высокой прочности с наилучшими показателями шлифуемости. Эти трудности обусловлены интенсивным засаливанием рабочей поверхности абразивного инструмента стандартной пористости и его адгезионным взаимодействием с материалом заготовки [1-3]. Первое явление вызвано низкими антифрикционными свойствами титана, который имеет малую износостойкость и высокую склонность к схватыванию при трении. Тонкая окисная пленка на поверхности титана легко разрушается, поскольку является более хрупкой, чем нижележащий материал. Ее охрупчивание вызвано диффузией водорода,

кислорода и азота при температурах шлифования, начиная с 400 – 600°C [3]. Сказанное увеличивает адгезионную составляющую коэффициента трения, которая зависит от сил адгезионного взаимодействия и коэффициента упрочнения образовавшейся связи под нагрузкой [4]. К эффективным мерам улучшения обрабатываемости титановых сплавов шлифованием следует отнести: использование инертных, износостойких абразивных зерен и высокопористых кругов (ВПК); создание в зоне резания реакционной среды, способствующей пассивации металла и, как следствие, уменьшению его взаимодействия с абразивами. Как известно, эффективным средством снижения засаливания абразивного инструмента служит использование специальных СОЖ [2;5;6]. Однако при небольшом объеме шлифования титановых деталей специальные СОЖ затрудняют их централизованное приготовление на предприятии. Сказанное в каждом конкретном случае требует дополнительного экономического обоснования их применения. На наш взгляд, более перспективными направлениями по улучшению шлифуемости деталей из титановых сплавов следует рассматривать первые два, указанные выше.

По результатам работ [2;3;5] установлено, что при шлифовании титановых заготовок традиционными абразивами предпочтение имеют карбиды кремния черный и зеленый. Это связано с тем, что титан более интенсивно отдает электроны атомам алюминия в корунде, усиливая их адгезионный износ. Свойства титана, влияющие на его взаимодействие с абразивными материалами, влияют непосредственно на их износостойкость. Так, при шлифовании ВТ22 карбид кремния превосходит износостойкость корундовых материалов до двух раз. Зерна черного и зеленого карбидов кремния по химическому составу и физическим свойствам различаются незначительно. Их выбор при шлифовании титановых деталей в основном связан с результатами по микрорельефу поверхности. Однако последний оказался коррелированным с марками титанового сплава. Сказанное затрудняет выбор модификаций зерен карбида кремния и требует индивидуального подхода для каждой конкретной марки титанового сплава. Абразивными материалами, атомы которых не принимают электроны титана и тем самым сводят адгезию к минимуму, являются кубический нитрид бора (КНБ, зарубежная аббревиатура – *CBN*) и алмаз [3].

Формирование крупных пор в ВПК с зёрнами КНБ обеспечивает хорошее размещение стружки и способствует дополнительному охлаждению обрабатываемых заготовок за счет лучшего проникновения СОЖ в зону резания и пропитывания ею черепка круга. В итоге снижается засаливание ВПК, температура и мощность шлифования в 1,5 – 2 раза [3, 7].

Синтез КНБ расширил возможности эффективного шлифования титановых сплавов. Однако одновременно усилился кинематический перенос топографии рабочей поверхности ВПК из КНБ на обработанную поверхность, влияющий на ее микронеровности и волнистости [8,9].

Для анализа реального состояния поверхности деталей используются различные методы ее диагностики. Известен способ оценки опорной поверхности по фотосъемке через микроскоп с контрастным выделением неконтактной зоны [10]. Изучение поверхности ведется в отраженном поляризованном свете и требует визуального сопоставления контуров пятен основных цветов. Площадь единичного пятна выявляется в микрометрах. Это вызывает трудности при сопоставлении масштабно-переменных деталей, представленных с разным масштабом увеличения. В [11] рассмотрен метод поиска трехмерных координат поверхности с помощью сканирования и цифровой фотосъемки. При этом присутствуют погрешности,

связанные, прежде всего, с отклонениями от перпендикулярности измеряемой поверхности относительно сканирующего устройства. В [12] предложено использовать планшетный сканер и анализ фотографий вести по плоскости оттенков серого тона. Данную методику не рекомендуется использовать при шлифовании заготовок, которые при нагреве склонны к появлению цветов побежалости и прижогов. Приборы нового поколения основаны на получении голографического изображения объекта в оптическом и рентгеновском диапазонах. Несомненно, они позволяют изучать процессы обработки в пространстве и определять топографию поверхности деталей, основанную на модульно-геометрическом подходе [13]. Инструментарий для создания подобных приборов ограничивается сложностью и высокой стоимостью.

Перспективным направлением диагностирования поверхности является так называемое цифровое топографирование, поскольку стандартных параметров шероховатости и точности формы недостаточно для характеристики контактной пары деталей и оценки режущих способностей кругов. Выбору ВПК с различными зёрнами и глубиной шлифования по критерию опорной поверхности плоских деталей из титанового сплава ВТ22 с использованием инновационного показателя [9] посвящено данное исследование, расширяющее наше представление о формировании поверхности.

МЕТОДЫ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Оборудование, форма и размеры ВПК, параметры режима маятникового шлифования приведены в таблице 1.

Таблица 1. Базовые условия проведения натурального эксперимента

Станок	зерен	Форма и размеры ВПК	Технологические параметры*				
			v_k , м/с	$s_{пр}$, м/мин	$s_{п}$, мм/дв. ход	$t(j=1;2)$, мм	z , мм
3Е711В	CBN30	1A1 200×20×76×5мм [14]	28	6	4	0,005(1), 0,010 (2)	0,1
3Г71М	37С, 39С	01 250×20×76 мм [15]	35				

Примечание. * – v_k – скорость резания, $s_{пр}$ – продольная подача, $s_{п}$ – поперечная подача, t – глубина резания, z – операционный припуск.

Ниже остановимся на некоторых частных условиях проведения эксперимента, раскрывающих их сущность. Опускание шпинделя с ВПК на глубину t вели в момент выхода заготовки с продольным столом в крайнее левое положение относительно оператора в начале технологического перехода и в период срезания припуска. Напомним, что на станке ВПК имеет вращение по числовой стрелке, а подача $s_{п}$ задавалась нами на двойной ход. В такой ситуации перемещение продольного стола слева направо по функциональному назначению рассматриваем рабочим ходом в пределах перемещения заготовки в поперечном направлении на величину $s_{п}$. Тогда обратное движение стола в исходное положение служит выходящим. Оставшаяся часть детали по ширине ВПК, равная в конце шлифования поверхности не более 16 мм, также

работает в режиме многократного выхаживания по схеме попутного шлифования. Объект исследования – образцы из титанового сплава ВТ22 ($\sigma_s = 1200$ МПа, $\delta = 8-12\%$, $E=115$ ГПа) с размерами $B \times L \times H = 40 \times 40 \times 50$ мм, которые крепились прихватами к столу станка. Шлифование вели по плоскости $B \times L$ без дополнительных выхаживающих проходов в классической трактовке. Применяемая СОЖ – 5%-ая эмульсия Аквол-6 (ТУ 0258-024-00148845-98), подаваемая поливом на деталь в количестве 7–10 л/мин. Объем дублирующих повторений $-n=10$. Перед каждым опытом $\mathcal{G} = \overline{1;10}$ выполняли правку ВПК алмазным карандашом. Переменные условия шлифования отражены кодом « i, j, r, \mathcal{G} » в выходном параметре процесса - $y_{ijr\mathcal{G}}$, который обладает большей информативностью при кратной записи. Индексом $i = \overline{1;5}$ закодированы характеристики ВПК: 1–СВN30 В76100 ОV К27–КФ40; 2–СВN30 В126100ОV К27–КФ40; 3–СВN30 В151100 ОV К27–КФ40; 4– 37С46I12VP; 5– 39С46I12VP. Круги $i = \overline{1;3}$ изготовлены на ОАО «Научно-производственный комплекс «Абразивы и шлифование» (г. Санкт – Петербург) [14;16]. В них варьировалась зернистость от В76 (200/230) до В151 (100/120), где в скобках приведены размеры зерен в мешах. Круги 37С, 39С ($i=4;5$) представляют продукцию фирмы Norton [15] с различными абразивными материалами: 37С – карбид кремния черный; 39С – карбид кремния зеленый. Как видно из таблицы 1, индекс $j=1;2$ отражает принятую глубину резания t : 1 – 0,005 мм, 2 – 0,010 мм (базовая). Для оценки прецизионности процесса воспользовались мерами рассеяния $r = \overline{1;3}$: 1 – стандартами отклонений $(SD)_{ij}$; 2 – размахами R_{ij} ; 3 – квартильными широтами $КШ_{ij}$, которые подробно представлены ниже при рассмотрении статистических методов.

Учитывая стохастическую природу шлифования, полученные наблюдения рассматриваем случайными величинами (СВ). Их оцениваем с привлечением статистических подходов, для чего на первом этапе исследования представляем в виде независимых множеств $i = \overline{1;5}$, $j = 1;2$:

$$\{y_{ij\mathcal{G}}\}, \mathcal{G} = \overline{1;10}. \quad (1)$$

Теоретическая статистика включает два направления: параметрическое и непараметрическое (в частности, ранговое). Характеристиками одномерного распределения для (1) служат [17-20]: средние $\bar{y}_i = y_{i\bullet}$, стандарты отклонений $(SD)_{ij}$, размахи $R_{ij} = |y_{\max} - y_{\min}|_{ij}$ – для первого направления; медианы \tilde{y}_{ij} , квартильные широты $КШ_{ij} = |y_{0,75} - y_{0,25}|_{ij}$ – для ранговых статистик. Первая частота одномерного распределения частот характеризует меру положения СВ (опорное значение), последующая – их меры рассеяния (прецизионность). Различие между $y_{ij\bullet}$ и \tilde{y}_{ij} свидетельствует о том, что плотность вероятности кривой распределения характеризуется асимметрией (скошенностью), которая приближенно вычисляется из выражения:

$$As_{ij} = [3(y_{i\bullet} - \tilde{y}_{ij}) / SD]_{ij}, i = \overline{1;5}, j = 1;2. \quad (2)$$

Каждый метод статистики имеет свою область рационального применения с учетом особенностей полученных (1). В инженерных приложениях наиболее часто используют параметрические статистики без должного обоснования. На самом деле для этого метода необходимо, чтобы (1) удовлетворяли нормальности и особенно важно гомоскедастичности (синонимы – однородность или гомогенность дисперсий отклонений) распределений. При наличии нарушений среди перечисленных ограничений целесообразно воспользоваться ранговым методом, который не связан с конкретным семейством распределений и не использует его свойств.

Тестирование (1) на предмет однородности дисперсий $(SD)_{ij}$, т.е. принятия нуль-гипотез (H_0), вели по трем группам критериев ($q = \overline{1;3}$): 1 – Хартли, Кохрена, Бартлетта (в программ *Statistica 6.1.478.0* представлены единой совокупностью), 2 – Левене, 3 – Брауна-Форсайта. Условием однородности дисперсий является выполнение неравенств:

$$\alpha_{ijq} < 0,05 \quad (3)$$

при переменных $i = \overline{1;5}$ и фиксированных $j = 1;2$, $q = \overline{1;3}$, где α_{ijq} – расчетный уровень значимости.

В силу вероятностного характера гипотез решения f_o в пользу H_0 могут различаться, но в конечном итоге должны удовлетворять требованию: $f_o \in [2;3]$.

Для подтверждения H_0 относительно нормальности распределений (1) использована статистика Шапиро-Уилка, которая апробирована для каждой переменной i и j , при условии выполнения неравенств:

$$\alpha_{ij} > 0,5. \quad (4)$$

В любом случае интерпретация (1) ведется в две последовательно выполняемых процедуры. Первоначально на базе одномерного дисперсионного анализа (ОДА) на 5%-ом уровне выявляется значимость разностей $|y_{uo} - y_{do}|$ или $|\tilde{y}_p - \tilde{y}_w|$, $(u, d, p, w) \in [1;5]$, $u \neq d$, $p \neq w$ - без поиска конкретных u, d, p, w . При подтверждении выдвинутой гипотезы проводится заключительный этап ОДА с привлечением критериев множественного сравнения мер положения, завершающийся поиском их ожидаемых средних \hat{y}_{ij} или my_{ij} , $i = \overline{1;5}$, $j = 1;2$, которые существенно различаются на 5%-ом уровне. Для количественной оценки опорной площади плоскости проведен мониторинг шлифовальной операции путем цифрового топографирования. Разработанный метод диагностики позволяет учесть характер топографической структуры поверхности. Для численного описания несущей плоскости предложен инновационный показатель – относительная опорная часть плоскости, теоретическое обоснование которого приведено в [9]:

$$t_{fM} = \frac{1}{n} \left[\sum_{g=1}^n \left(1 - \frac{F_{BII}}{F_{\Sigma}} \right) \right] \times 100 \%, \quad (5)$$

где f – глубина впадины, соответствующей толщине фракции индикатора – наполнителя; F_{Σ} – суммарная площадь проекции; $F_{вл}$ – площадь проекции впадин.

На первом этапе цифрового топографирования обработанных поверхностей следовало получить цветной фотофайл с численными параметрами пикселей, отражающих тональную картину. Для этого использован метод красок, который удобен для индикации впадин макронеровностей. Суть метода заключается в том, что на шлифованную поверхность с помощью резинового валика наносится слой масляной краски «Краплак красный» (ТУ 2331–023–05751640–2007) с размерами помола крупы породы до 2 мкм. Предварительно краска разбавлялась индустриальным маслом для достижения соответствующей плотности цвета (цветосилы). Излишки нанесенной краски удалялись с изучаемой поверхности до прекращения переноса на скользящий по ней эталон плоскостности – линейки поверочной ШП–2–400 (ТУ 2–034–806–76, класс точности 2).

Объект изучения фотографировался в режиме макросъемки с фокусным расстоянием 250 мм со штатива цифровой зеркальной фотокамерой *Nikon D3100* с матрицей *CMOS*, с общим количеством пикселей 14,2 млн. Режим макросъемки характеризуется чувствительностью *ISO400*, максимальной апертурой $f/3,5-5,6$ и разрешением снимка 4608×3072 пикселей. Она велась при искусственном освещении набором студийных осветителей *Smartumc* источниками 5500°K через рассеиватели. Это позволило избежать возможных полутеней. Каждая элементарная площадка поверхности: плато, выступ, впадина и т.д. – в цифровой фотоснимке отражена пикселем соответствующего цвета.

Снимок сохранялся в виде фотофайла с расширением *JPEG* и параметрами, обеспечивающими наиболее контрастное представление поверхности. Пиксели фотоснимка, отличающиеся от оттенков красного цвета, выделялись средствами цифровой обработки. Фотофайл переводился в цветной рисунок и ограничивался количеством бит $K \leq 16$, достаточных для генезиса поверхности. При этом неокрашенные области изучаемой поверхности становились одним из стандартных цветов белого, а окрашенные – оттенками, близкими по тону из возможных 16-ти цветов, за исключением белого. Количественное соотношение пикселей красного цвета к остальным сохранилось идентичным, как в исходном файле красных оттенков к серо-стальным. Этот файл конвертировался при помощи специальной программы обработки растровых изображений в таблицу частот пикселей, закодированных в *HTML*– и *RGB*– кодах, и сохранялся в виде *txt*–файла.

Согласно стандартным *HTML*–кодам выявляются стандартные цвета красного, которые отражают наличие впадин. Информация по цифровому топографированию поверхности позволяет преобразовать (1) с учетом (3) к виду [9]:

$t_{fM} = \frac{1}{n} \left[\sum_{g=1}^n \left(1 - \frac{\sum P_{red}}{\sum P_k} \right) \right] \times 100 \%$, где t_{fM} – мера положения (средняя, медиана) для всех (1); $\sum P_k$, $\sum P_{red}$ – соответственно количество пикселей всех цветов при $K \leq 16$ и красного спектра для каждого $\mathcal{G} = \overline{1;n}$.

В дальнейшем из t_{fM} составлены последовательности, для которых проведен поиск одномерных распределений частот. С учетом изложенного сдвиг медиан относительно средних оцениваем медиальными коэффициентами при одноименных $i = \overline{1;5}$ и $j = \overline{1;2}$:

$$KM_{ij} = (\tilde{t}_{fM} / t_{fM\bullet})_{ij}, \quad (6)$$

$$\hat{K}M_{ij} = (m\hat{t}_{fM} / \hat{t}_{fM\bullet})_{ij}. \quad (7)$$

Оценку режущих способностей ВПК $i = \overline{2;5}$ относительно базового инструмента CBN30 B76100OV K27-KФ40 ($i=1$) ведем для обеих характеристик одномерного распределения частот (1) при одноименных $i = \overline{1;5}$ и $j = \overline{1;2}$ [17-20]:

$$K_{(i)j} = (\tilde{t}_{fM(i)} / t_{fM(1)})_j, \quad (8)$$

$$\hat{K}_{(i)j} = (m\hat{t}_{fM(i)} / m\hat{t}_{fM(1)})_j, \quad (9)$$

$$K_{CT(i)j1} = SD_{(1)j} / SD_{(i)j}, \quad (10)$$

$$K_{CT(i)j2} = R_{(1)j} / R_{(i)j}, \quad (11)$$

$$K_{CT(i)j3} = KШ_{(1)j} / KШ_{(i)j}. \quad (12)$$

Влияние глубины резания t_j , $j = \overline{1;2}$ при базовой $t_2 = 0,01$ мм на опорную поверхность деталей представлено в усеченном виде коэффициентами:

$$\hat{K}_{i(1)} = (m\tilde{t}_{fMi(1)} / m\hat{t}_{fMi(2)})_j, \quad (13)$$

$$K_{CTi(1)3} = KШ_{i(2)} / KШ_{i(1)}. \quad (14)$$

В (8) – (14) индекс, заключенный в круглые скобки, отражает переменные условия шлифования.

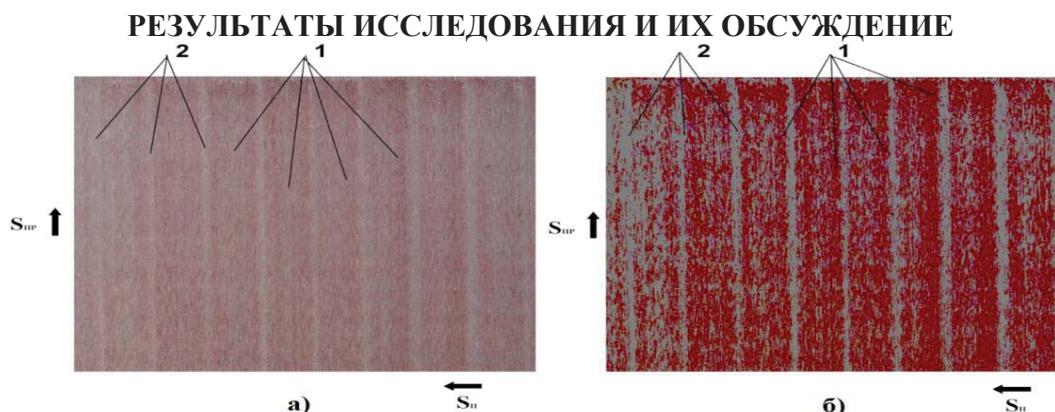


Рис. 1. Фотофайлы поверхности детали $\mathcal{G} = 7$, протшлифованной ВПК CBN30 B76 100 OV K27 - KФ40 при глубине $t = 0,01$ мм: а – исходный фотофайл, б – фотофайл, представленный 16-битным цветным рисунком

На рис. 1 представлены фотофайлы шлифованной поверхности детали, на которых выделены две зоны: 1 – впадины макронеровностей, 2 – более ровная зона, формирующая опорную часть поверхности. Качественный анализ фотографии, представленной на рис. 1,б, показал, что топограмма характеризуется псевдорегулярным макрорельефом с чередующимися выступами и впадинами, направленными по вектору s_{np} . Шаг расположения впадин идентичен подаче $s_{п}$. Следовательно, кинематика процесса шлифования предопределяет формирование систематических погрешностей формы, а поверхность несет на себе вид «слепок» режущей поверхности ВПК, зафиксированный при шлифовании образца $\varnothing = 7$ с глубиной $t = 0,01$ мм в момент обратного выхаживающего прохода. Поперечное перемещение каретки с заготовкой отражено стрелкой $s_{п}$. Таким образом, врезание заготовки в зону резания начинается с ее правой стороны, а выход из контакта с ВПК – с противоположной левой. Как известно, границы областей контакта с сопряженной деталью сосредотачиваются по зонам выступов 2 (рис. 1,б). Для образца $\varnothing = 7$ среднее опорной поверхности составило $\bar{t}_{FM(1;2;7)} = 47,687$ %. Величина опорной площади вычислена по (5) с использованием средних пикселей (таблица 2), в которой впадины формируются цветами $K = \overline{4;6}$.

Таблица 2. Частотное распределение пикселей каждого цвета при шлифовании образца $\varnothing = 7$ кругом CBN30 B76 100 OV K27 - KФ40 при $t = 0,01$ мм

Цвет, $K = \overline{1;7}$	Количество пикселей	RGB-код	HTML-код
1	2513	(0,0,0)	#000000 black
2	10	(0,0,128)	#000080 navy
3	3	(0,128,128)	#008080 teal
4	1801688	(128,0,0)	#800000 maroon
5	175481	(128,0,128)	#800080 purple
6	89212	(128,128,0)	#808000 olive
7	1881209	(128,128,128)	#808080 fractal

Возрастание (5) ведет к снижению отклонений от плоскостности сопрягаемых поверхностей. В рамках проведенного исследования данная проблема частично решена путем шлифования титановых деталей кругами из зерен CBN30 и 37С при меньшей глубине $t = 0,005$ мм. (рис. 2,а,б). По (5) опорная площадь контакта выросла до следующих величин: $\bar{t}_{FM(1;1;7)} = 55,556\%$ – при шлифовании ВПК CBN30 B76 100 OV K27 - KФ40; $\bar{t}_{FM(4;1;7)} = 63,778\%$ – для ВПК 37С 46 I12 VP. Как видно из рис. 2, в обоих случаях шлифования изменилось соотношение между выступами и впадинами поверхности в пользу первых. Псевдорегулярный характер на всей поверхности выражен менее ярко, особенно для зерен 37С, обладающих меньшей износостойкостью. Впадины пересекают поверхность по всей длине заготовки. Их называют коммуницирующими. Такие поверхности характеризуются высокой

капельной утечкой под действием перепадов давления гидрожидкости [26]. С другой стороны, псевдерегулярный профиль способен в процессе работы удерживать и транспортировать смазку, исключая так называемое пленочное голодание. По данным работы [4] сказанное особенно актуально для стальных деталей при $R_a 0,04 - 0,16$. У нас шероховатости титановых деталей выше ($R_a 0,32 - 0,63$), но титан характеризуется большим коэффициентом трения и нуждается в более обильной смазке по сравнению с стальными деталями для повышения противозадирной стойкости трущихся поверхностей.

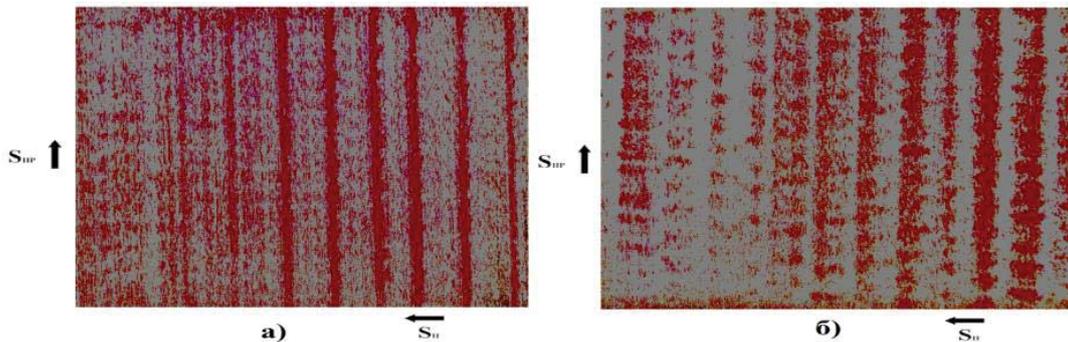


Рис. 2. Топограммы макрорельефа поверхности при шлифовании с глубиной резания $t = 0,005$ мм ВПК CBN30 B76 100 OV K27 – КФ40 (а) и 37С 46 I12 VP (б)

На рис. 1;2, наглядно видно, что участки поверхностей на выходе заготовки из контакта с ВПК (левая часть поверхности) характеризуются более сглаженным рельефом с доминирующей долей выступов в диапазоне $B=(2-4)s_n$. На этих участках ВПК заканчивают работу в условиях классического выхаживания при обоих вариантах продольной подачи стола. Другое дело, что эффективность процесса выхаживания, сопровождаемое уменьшением впадин зависит от упругого натяга в звене «деталь - ВПК». При меньшем натяге (например, при $t = 0,005$ мм) процесс сглаживания поверхности начинает проявляться на более ранней стадии при $B=4s_n$. (рис. 2, а;б), чем при большем натяге (рис. 1, б). По результатам нашего исследования рассматриваемый участок поверхности характеризуется повышенной микротвердостью поскольку цикл шлифования заканчивается в условиях снижения теплового воздействия на деталь.

Для выбора метода статистики протестируем выходные параметры шлифования по (3) и (4). В таблице 3 приведены результаты тестирования (1) на предмет их однородности дисперсий.

Таблица 3. Проверка однородности дисперсий для относительной опорной части поверхности

Критерий ($q = \overline{1;3}$)	α_{ij}		Принятие H_0 по (3)	
	$j = 1$	$j = 2$	$j = 1$	$j = 2$
Хартли, Кохрена, Бартлетта (1)	0,567622	0,183888	-	+
Левене (2)	0,412934	0,080001	-	+
Брауна – Форсайта (3)	0,432594	0,257694	-	-

Результаты тестирования (1) на гомоскедастичность распределений свидетельствуют, что характер варьирования $(SD)_{ij}^2$ при переменной $i = \overline{1;5}$ и фиксированном $j = 1;2$ зависит от принятой глубины резания. В случае шлифования с минимальной $t = 0,005$ мм H_o по (3) отклонены по всем статистикам $q = \overline{1;3}$. С ростом глубины до $t = 0,01$ мм H_o приняты при $f_o = 2$ в условиях ошибки второго рода. Вероятно, что съем операционного припуска при $t = 0,01$ мм ведет к росту упругого натяга в технологическом звене «ВПК-заготовка», что сопровождается снижением α в (3) в 2-4 раза и повышает случайный характер рассеяния $(SD)_{i2}^2$.

Таблица 4. Тестирование (1) на нормальность распределений H_o по (4)

ВПК $i = \overline{1;5}$	Расчетный уровень α_{ii}		Принятие $H_{o(ij)}$ по (4)	
	$t = 0,005$ мм ($j = 1$)	$t = 0,010$ мм ($j = 2$)	$t = 0,005$ мм ($j = 1$)	$t = 0,010$ мм ($j = 2$)
<i>CBN30B76</i> ($i = 1$)	0,6410	0,7738	+	+
<i>CBN30B126</i> ($i = 2$)	0,6065	0,1673	+	-
<i>CBN30B151</i> ($i = 3$)	0,5424	0,2550	+	-
<i>37C 46</i> ($i = 4$)	0,4779	0,6579	-	+
<i>37C 46</i> ($i = 5$)	0,4468	0,0947	-	-

Результаты тестирования (1) на предмет нормальности распределений для ВПК $i = \overline{1;5}$ при двух глубинах резания иллюстрирует таблица 4, а для наглядности на рис. 1 представлены гистограммы качества поверхности при двух глубинах t_j , $j = 1;2$, полученных при шлифовании базовым ВПК *CBN30 B76 100 OV K27 - KФ40*.

Как видно из таблицы 4, законы распределения (5) зависят не только от характеристики ВПК, но даже в большой мере от глубины t . При шлифовании деталей ВТ22 нитридоборовыми ВПК $i = \overline{1;3}$ с глубиной $t = 0,005$ мм обеспечено 100%-оенормальное распределение опорных поверхностей. Круги *Norton* ($i = 4;5$) показали незначительные отклонения от кривой плотности нормального распределения. С возрастанием t до 0,010 мм количество случаев шлифования с нормальным распределением (5) снизилось от 3-х до 2-х и только один базовый ВПК $i = 1$ при обеих t_j , $j = 1;2$ обеспечил нормальность распределений (5). Для этого ВПК на рис. 1, а,б представлены гистограммы качества для обеих глубин резания с наложенным кривым нормального распределения. Полученная информация позволяет сформулировать две закономерности:

* Пределы размаха R_{11} при работе с $t = 0,005$ мм превышают свои аналоги при $t = 0,01$ мм на 5-10% по опорной поверхности, что благоприятно сказывается на работоспособности соединений.

* Отсутствие деталей в отдельных диапазонах t_{jm} однозначно требует увеличения повторных испытаний.

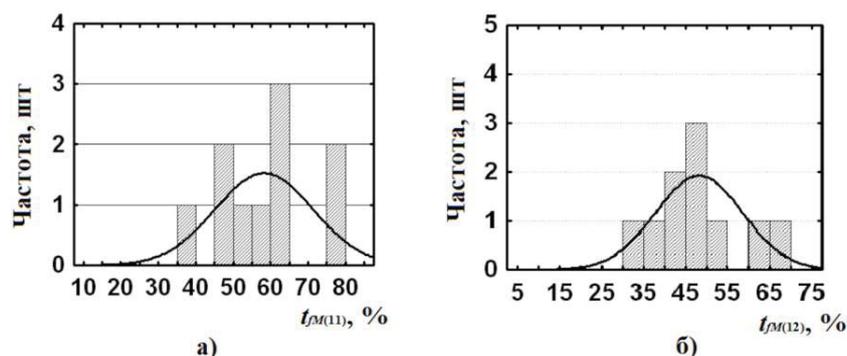


Рис. 3. Гистограммы качества поверхности с наложенными кривыми нормального распределения при шлифовании деталей кругом CBN30 B76 100 OV K27 - KФ40 при глубинах резания 0,005 (а) и 0,010 мм (б)

Требование к СВ со стороны параметрического метода статистики не обеспечены в полном объеме. Этим объясняется выбор рангового метода для интерпретации (1) в качестве приоритетного.

Таблица 5. Влияние характеристик кругов на меры положения опорной поверхности и коэффициенты (6)-(9)

$t_j,$ $j = 1; 2$	Круг $i = 1; 5$	$t_{fMij}, \%$				K_{Mi} (6)	\hat{K}_{Mi} (7)	K_i (8)	\hat{K}_i (9)
		$y_{i\cdot}$	\tilde{y}_i	$\hat{y}_{i\cdot}$	$m\hat{y}_i$				
0,005 (1)	1	58,026	58,849	58,373	54,420	1,014	0,932	1,000	1,000
	2	30,679	29,676	33,064	34,567	0,967	1,045	0,504	0,635
	3	56,552	57,227	58,373	54,420	1,012	0,932	0,972	1,000
	4	60,543	62,145	58,373	59,407	1,026	1,018	1,056	1,092
	5	40,219	39,459	37,834	46,303	0,981	1,224	0,671	0,851
0,010 (2)	1	48,021	48,456	46,289	46,258	1,009	0,999	1,000	1,000
	2	23,618	20,089	27,011	27,786	0,851	1,029	0,415	0,601
	3	45,712	50,968	45,380	46,258	1,115	1,019	1,052	1,000
	4	50,594	50,125	46,744	46,258	0,991	0,990	1,034	1,000
	5	37,191	35,483	41,604	41,024	0,954	0,986	0,732	0,887

Примечание. Круги i : 1 – CBN30 B76 100 OV K27 - KФ40, 2 – CBN30 B126 100 OV K27 - KФ40, 3 – CBN30 B151 100 OV K27 - KФ40, 4 – 37C 46 I12 VP, 5 – 39C 46 I12 VP.

В таблице 5 приведены опытные и ожидаемые меры положения для показателя t_{fMij} и коэффициенты (6) – (9) при шлифовании с обеими глубинами t_j , $j = 1; 2$. Как известно, для повышения надежности соединений деталей желательно, чтобы (1) имели отрицательный эксцесс, что обеспечивает неравенство: $(\tilde{y} > y_{\cdot})_{ij}$ при одноименных i, j . Как видно из таблицы 5, такая ситуация сложилась при шлифовании деталей ВТ22 инструментами CBN30 с зернистостями В76 и В151 при обеих глубинах шлифования: 0,005 мм – $K_{M11} = 1,014$, $K_{M31} = 1,012$; 0,010 мм – $K_{M12} = 1,009$, $K_{M32} = 1,115$, а также для ВПК 37С ($i = 4$) при $t = 0,005$ мм – $K_{M41} = 1,026$. Представленные на рис.3 гистограммы соответствуют отрицательной асимметрии (2). По ожидаемым медианам, которые являются окончательными оценками мер положения, коэффициенты (7), большие

единицы, по ВПК изменились: $i = 2;4;5$ – при $t = 0,005$ мм; $i = 2;3$ – при $t = 0,01$ мм. Это свидетельствует о целесообразности проведения второго этапа множественного анализа мер положения.

По (9) при шлифовании деталей ВТ22 с глубиной $t = 0,005$ мм наибольшая опорная поверхность предсказана для ВПК 37С 46 I12 VP ($\hat{K}_{41} = 1,032$), а наименьшая – для ВПК CBN30 B126. На второй позиции расположены ВПК CBN30 с зернистостями B76 и B151 (соответственно $ci = 1;3$). С ростом t до 0,010 мм отмеченные закономерности в целом сохранили свои позиции: для ВПК $i = 2$ полностью, а для ВПК $i = 1;3;4$ - медианы $mt_{fM(i2)}$ предсказаны общей средней, в силу чего (9) равны единице.

Таблица 6. Оценка режущих способностей кругов по мерам рассеяния (5)

$t_j, j = 1;2$	Круг $i = 1;5$	SD_{ij}	R_{ij}	КШ $_{ij}$	$K_{стр(i)j1}(10)$	$K_{стр(i)j2}$ (11)	$K_{стр(i)j3}$ (12)
		%					
0,005 (1)	1	13,073	40,007	13,940	1,000	1,000	1,000
	2	7,621	21,549	14,422	1,715	1,857	0,967
	3	9,673	27,178	17,480	1,352	1,472	0,797
	4	8,588	32,528	8,767	1,522	1,230	1,590
	5	10,043	29,938	14,789	1,302	1,336	0,943
0,010 (2)	1	10,375	35,963	9,852	1,000	1,000	1,000
	2	9,626	32,222	12,483	1,078	1,116	0,789
	3	15,967	44,138	30,697	0,650	0,815	0,321
	4	6,918	19,642	12,556	1,500	1,831	0,785
	5	11,234	41,659	7,521	0,924	0,863	1,310

Примечание. Круги i : 1 – CBN30 B76 100 OV K27 - KФ40, 2 – CBN30 B126 100 OV K27 - KФ40, 3 – CBN30 B151 100 OV K27 - KФ40, 4 – 37С 46 I12 VP, 5 – 39С 46 I12 VP.

По (13) прогнозируемые меры положения для показателя $mt_{fM(i1)}$ при $t = 0,005$ мм превысили свои ожидаемые аналоги при $t = 0,01$ мм в 1,13 – 1,24 раза. Установлено, что наибольший эффект на рост показателя mt_{fM} при снижении $t \in [0,010; 0,005]$ мм отмечен для ВПК CBN30 B126 ($i = 2$), у которого наихудшие результаты по t_{fM} при обеих $t_j, j = 1;2$. В аналогичных условиях ВПК Norton – с зернами из зеленого карбида кремния ($i = 5$) предсказали наименьший эффект (1,13 раза).

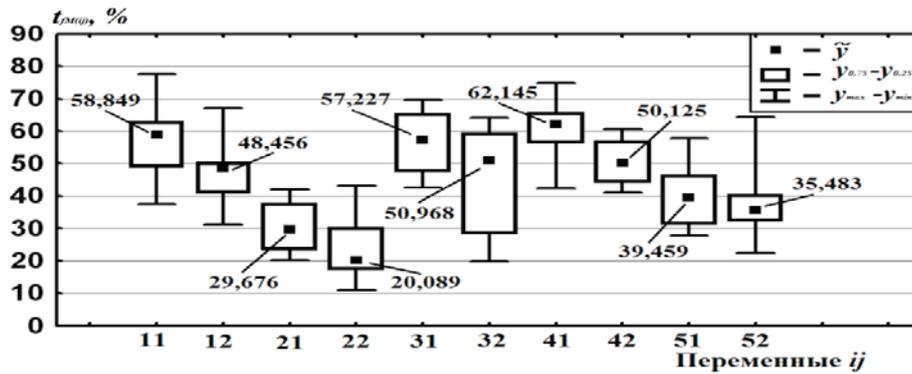


Рис. 4. Описательные статистики, характеризующие влияние кругов $i = \overline{1;5}$ на показатель $t_{fm(ij)}$ при шлифовании с глубинами 0,005 ($j = 1$) и 0,010 мм ($j = 2$)

Окончательную оценку прецизионности режущих способностей ВПК ведем по КШ $_{ij}$, которые в условиях приоритетного метода статистики характеризуют меры рассеяния. Приводимые параллельно меры рассеяния: (SD, R) $_{ij}$ гауссового конкурента носят вспомогательный характер и приводятся с целью выявить их неэффективность «на чужом поле» [18]. Результаты по КШ $_{ij}$ (таблица 6) необходимо сопоставить с данными по описательным статистикам для непараметрического метода (рис. 4), на котором по оси ординат представлено реальное расположение ($\tilde{y}, R, КШ$) $_{ij}, i = \overline{1;5}, j = 1;2$. Из таблицы 6 видно, что при $t = 0,005$ мм наименьшая квартильная широта КШ $_{41}$ предсказана для ВПК 37С ($i = 4$), а при $t = 0,005$ мм – для ВПК 39С ($i = 5$). Из рис. 4 наглядно видно, что процентиля $|y_{0,75} - y_{0,25}|_{41}$ для круга 37С действительно обеспечивают для 50%-тов шлифованных деталей самую высокую опорную поверхность, а верхняя граница их размаха $y_{\max(41)}$ чуть уступает аналогу для ВПК *CBN30 B76*. Менее благоприятная ситуация сложилась для ВПК 39С ($i = 5$) при шлифовании в аналогичных условиях. Как видно из рис. 4, в результате положительного эксцесса для (5) при шлифовании ВПК 39С ($i = 5$) медиана и КШ $_{52}$ расположены ниже центра распределения. Сказанное для 50%-тов шлифуемых деталей снизило величину опорной поверхности по сравнению с ВПК $i = 1;4$. При этом процентиль $y_{0,75(52)}$ для ВПК *Norton 39 C* смещен ниже по сравнению с $y_{0,25(i,2)}, i = 1;4$ для кругов *CBN30 B76* и 37С. Таким образом, более 59%-тов деталей, протшлифованных ВПК *Norton 39C*, при КШ $_{52} = 7,521\%$ имеет меньшую опорную поверхность по сравнению с деталями после шлифования ВПК $i = 1;4$, которые характеризуются большими КШ соответственно 9,852 и 12,556%. В итоге ВПК $i = 5$ при большей глубине шлифования по количеству качественных деталей по топографии поверхности превосходит только режущие возможности ВПК *CBN30 B126* с КШ $_{22} = 12,483\%$. Проанализированная ситуация, возникающая при шлифовании деталей ВТ22 кругом *Norton 39C* ($i = 5$) при наибольшей глубине t однозначно свидетельствует о том, что формальное использование мер рассеяния для непараметрического метода может привести к методическим ошибкам, для их

исключения необходимо тщательно анализировать асимметричность распределений (2), которые наглядно иллюстрируют описательные статистики.

Представляет интерес полученные непараметрические оценки прецизионности формирования опорной части поверхности с аналогами из нормальной теории. При этом напомним, что наиболее точными мерами рассеяния в параметрическом методе служат стандарты отклонений (1). По их оценкам наибольшую воспроизводимость процесса обеспечили ВПК: *CBN30 B126* – при $t = 0,005$ мм и *Norton 37C(i = 4)* – при $t = 0,010$ мм. С этими оценками совпали прогнозы по размахам. Как видим, параметрические оценки стабильности работы ВПК значительно отличаются от рангового метода по КШ. Это позволяет считать их неадекватными «на чужом поле».

ВЫВОДЫ

1. Подтверждена эффективность использования инновационного показателя определения опорной площади макрогеометрии плоских деталей из сплава ВТ22 с использованием цифровых технологий.

2. Обнаружено, что топография поверхности деталей обладает выраженной анизотропией. Наиболее ярко псевдорегулярный макрорельеф с впадинами вдоль продольной подачи выражен с правой стороны по ширине деталей, с которой протекало ее врезание в ВПК на завершающем проходе по срезанию операционного припуска. В конце этого прохода на левой стороне детали коммуницирующие впадины практически не просматриваются.

3. Шлифование деталей ВТ22 нитридборовыми кругами усиливает формирование псевдорегулярного макрорельефа поверхности по сравнению с ВПК *Norton* с зёрнами *37C*, *39C* в связи с большей износостойкостью кубического нитрида бора и сложностью правки кругов.

4. В условиях нарушений нормальности распределений привлечение рангового метода взамен более известного параметрического анализа обеспечило повышение надежности оценок параметра t_{JM} по мерам положения (медианам) и рассеяния (квартильным широтам).

5. Установлено, что при глубине резания $t = 0,005$ мм наибольшие медианы $mt_{JM} = 54,42\%$ предсказаны при шлифовании ВПК $i = 1;3;4$, среди которых присутствует и вышеназванный инструмент, предсказанный наилучшим при меньшей глубине резания.

6. По прецизионности формирования показателя t_{JM} наилучшие результаты по КШ предсказаны для ВПК: *37C46I12 VP* – при $t = 0,005$ мм; *39C46I12 VP* – при $t = 0,01$ мм.

7. При снижении t от 0,01 до 0,005 мм ожидаемые медианы показателя t_{JM} увеличиваются в 1,13 – 1,24 раза, поэтому окончательные проходы при съеме припуска следует вести с пониженной глубиной резания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глазунов С.Г., Моисеев В.Н. Конструкционные титановые сплавы. М.: Metallurgy, 1974. 366 с.
2. Носенко В.А., Носенко С. В. Технология шлифования металлов: монография. Старый Оскол: ТНТ, 2013. 616 с.
3. Кремень З.И., Юрьев В.Г. Шлифование суперабразивами высокопластичных сплавов. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. 167 с.
4. Мельников П.А., Пахоменко А.Н. Математическая модель формирования микрорельефа шейки вала при обработке алмазным выглаживанием // Вектор науки Тольяттинского государственного университета, 2015. №2. С. 104 – 110.
5. Turley D. M. Factors affecting surface finish when grinding titanium and titanium alloy (Ti-6Al-4V) // Wear, 1985. 104. P. 323–335.
6. Guoqiang G., et al. Experimental investigation on conventional grinding of Ti-6Al-4V using SiC abrasive // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011. 57. P. 135–142.
7. Старков В.К. Шлифование высокопористыми кругами. М.: Машиностроение, 2007. 688 с.
8. Унянин А.Н. Научное и технологическое обеспечение шлифования заготовок из пластичных сталей и сплавов с предотвращением засаливания абразивных кругов; дис. ... докт. техн. наук: (05.03.01). Ульяновск: УлГТУ, 2006. 537 с.
9. Солер Я.И., Казимиров Д.Ю. Подходы к оценке опорной части поверхности шлифованных плоскостей титановых деталей абразивными кругами *Norton* // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2014. № 5 (307). С. 142–150.
10. Беркович И.И., Гузман М.И. Методика измерения площади единичных пятен контакта // Фрикционный контакт деталей машин: сб. науч. тр., под ред. Н.Б. Демкина. Калинин: КТУ, 1984. №10. С. 33-36.
11. Бирюков В.С. Цифровые снимки в фотограмметрии // Геодезия и картография, 2000. №10. С. 33-36.
12. Пальцева Ю.А., Бабошкин А.Ф. Методика получения трехмерной модели шероховатой поверхности // Инструмент и технологии, 2006. №23. Вып. 1. С. 135 – 140.
13. Белкин Е.А., Поярков В.Н., Степанов Ю.С. Приборы неразрушающего контроля нового поколения над процессом формирования микрорельефа // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2013. №4 (300). С. 145-149.
14. ГОСТ Р 53923–2010. Круги алмазные и из кубического нитрида бора (эльбора) шлифовальные. Технические условия. Введен 2010–12–11. М.: Стандартинформ, 2010. 27 с.
15. www.tehnotools.com/upload/iblock/9be/9be7e214f25e68c5398c87614355aa31.pdf (20 марта 2015).
16. ГОСТ Р 53922-2010. Порошки алмазные и из кубического нитрида бора (эльбора). Зернистость и зерновой состав шлифпорошков. Контроль зернового состава. Введен 2010–12–11. М.: Стандартинформ, 2011. 7 с.
17. Уилер Д. Чамберс Д. Статистическое управление процессами / пер. с англ. М.: Альпина Бизнес Букс, 2009. 409 с.
18. Hollander M., Wolfe D.A. Nonparametric statistical methods, second edition. Wiley Interscience, 1999. 787 p.
19. Закс Л. Статистическое оценивание / пер. с нем. М.: Финансы и статистика, 1983. 518 с.
20. ГОСТ Р ИСО 5725–1–2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Ч.2. Основной метод определения повторяемости и воспроизводимости стандартного метода измерений. Введен 2002-01-11. М.: Изд-во стандартов, 2002. 58 с.

21. Кревсун Э.П. Сравнение фрикционных характеристик пар трения с различной топографией поверхностей // Вестник машиностроения, 1984. №7. С. 12 -14.
22. Носенко В.А., Носенко С. В., Крутинова А.А. и др. Исследование химического состава поверхностного слоя титанового сплава при шлифовании его кругом из карбида кремния без использования СОТС // СТИН, 2015. №1. С. 26-29.
23. Ryszard W. The grinding of titanium alloys. Archives of Mechanical // Technology and Automation. 2013. 33 (4). P. 49–60.
24. Yang Ch. Y., et al. Grinding titanium alloy with brazed monolayer CBN wheels // Key Engineering Materials, 2008. 359. P. 33–37.
25. Xu X., Yu Y., Huang H. Mechanisms of abrasive wear in the grinding of titanium (TC4) and nickel (K417) alloys // Wear, 2003. 255. P. 1421–1426.
26. Кремень З.И., Юрьев В.Г., Бабошкин А.Ф. Технология шлифования в машиностроении; под ред. З.И. Кременя. СПб.: Политехника, 2007. 425 с.
27. Кремень З.И., Поповский Д.А., Юрьев В.Г. Шлифование титановых сплавов кругами на основе эльбора и алмаза // Вестник машиностроения, 2013. №5. С. 66 – 69.

АВТОРЫ

Солер Яков Иосифович - ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», г. Иркутск, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры Технология и оборудование машиностроительных производств, ведущий научный сотрудник лаборатории «Технология финишной обработки».

Казимиров Денис Юрьевич - ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», г. Иркутск, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Технология и оборудование машиностроительных производств, старший научный сотрудник лаборатории «Технология финишной обработки».

Динь Ши Май - аспирант кафедры «технология машиностроения» Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск (Россия).

THE AUTHORS

Soler Yakov Iosifovich - Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Technology and Equipment for Machine-Building Industries, Leading Researcher of the Laboratory of Finishing Technology.

Denis Y. Kazimirov - Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department Technology and Equipment for Machine-Building Industries, Senior Researcher of the Laboratory of Finishing Technology.

Dinh Shi Mai - Postgraduate Student, Department of Engineering Technology, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk (Russia).

**РЕЗЕРВЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
РЕЗАНИЯ МАТЕРИАЛОВ СВЕРХЗВУКОВОЙ
ГИДРОАБРАЗИВНОЙ СТРУЕЙ**

**RESERVES OF INCREASE IN ECONOMIC EFFICIENCY CUTTING
OF MATERIALS SUPERSONIC HYDROABRASIVE STREAM**

**СТЕПАНОВА Е.Ю., БАРСУКОВ Г.В., КОЖУС О.Г.,
СТЕПАНОВ Ю.С.**

(ОГУ им. И.С. Тургенева, г. Орел, Россия)

**STEPANOVA E. YU., BARSUKOV G. V., KOZHUS O.G.,
STEPANOV YU.S.**

(OGU named after I.S. Turgenev, Oryol, Russia)

***Аннотация.** Гидрорезание на сверхзвуковых скоростях относится к числу наиболее динамично развивающихся способов раскроя материалов, составляя серьезную конкуренцию традиционным технологиям: газовой и электроэрозионной, лазерной, плазменной резке, механообработке лезвийным инструментом. Анализируются достоинства и описываются направления повышения эффективности гидрорезания.*

***Annotation.** Hydraulic cutting at supersonic speeds is one of the most dynamically developing methods of cutting materials, making a serious competition to traditional technologies: gas and EBM, laser, plasma cutting, machining with a blade tool. Analyzed the advantages and describes the direction of improving the efficiency of hydro-cutting.*

***Ключевые слова:** гидроабразивное резание, достоинства, направления повышения эффективности.*

***Keywords:** hydroabrasive cutting, advantages, directions of increase in efficiency.*

Одним из наиболее популярных, современных и инновационных методов обработки материалов является гидрорезание на сверхзвуковых скоростях [1-5]. Метод эволюционировал от черновых, заготовительных и разделочных операций до высокоточных операций получения сложнопрофильных деталей, стоящих на равных условиях по точности с лазерной и плазменной обработкой при широком ценовом диапазоне (рисунок 1).

Гидроабразивная резка - одно из самых универсальных и полезных инструментов на рынке металлообработки. Этот процесс предоставляет компаниям во многих отраслях широкий спектр уникальных возможностей и преимуществ, что делает его практически идеальным решением для решения многих проблем, которые другие технологии просто не могут решить.

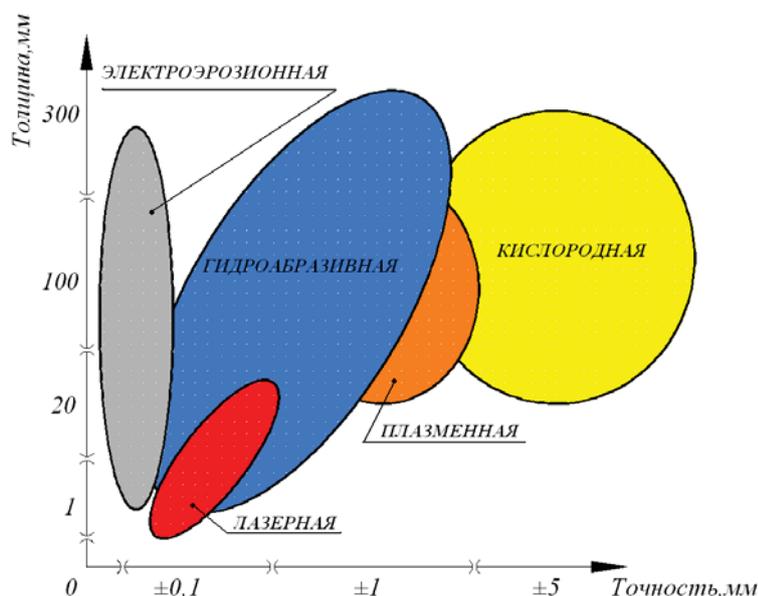


Рисунок 1 – Место гидроабразивной резки среди альтернативных ей методов обработки (по А.С. Денисову [6])

Достоинства гидроабразивного резания [7, 8]:

- резка любого материала;
- холодная резка, т.е. отсутствие зон с тепловым воздействием и упрочнением; процесс идеален для термочувствительных материалов, т.к. структурно-фазовые изменения в поверхностном слое заготовок не происходят; изделие не деформируется, а, следовательно, нет затрат на устранение погрешностей формы, обусловленные термическими напряжениями в поверхностном слое;
- всенаправленное резание, т.е. способность разрезать в любом направлении с одинаковой эффективностью;
- бесконтактное резание;
- практически нулевая сила резания;
- не требуется заточка режущего инструмента;
- минимальное крепление элементарными прихватами или за счет собственного веса;
- перфорирование большинства материалов без предварительного сверления;
- чистые без заусенцев поверхности реза, во многих случаях не требующие отделочных операций обработки;
- биосферосовместимые технологии, отсутствие пыли и опасных газов, нет опасных отходов;
- гибкая интеграция станков для ГАР в технологический процесс;
- низкий процент отходов благодаря небольшой ширине реза;
- высокая производительность обработки по сравнению с традиционными методами;
- точность резки $\pm 0,1$ мм, до $0,025$ мм, а прецизионной $\pm 0,01$ мм при точности позиционирования по всем осям $\pm 0,025$ мм;

- возможность вырезать изделия с очень тонкими (< 0.1 мм) стенками, что не невозможно сделать лазером;

- ГАР на несколько порядков производительнее проволочной электроэрозионной обработки.

На наш взгляд, многие инновационные решения в области повышения эффективности ГАР следует искать в физике протекания процесса резания, разрушения материалов под воздействием сверхзвуковой гидроабразивной струи, непрерывной диагностике и мониторинге процесса, создании комбинированных методов и совершенствовании технологического оборудования, снижении затрат на расходные материалы[9].

Так, Я. Ю. Яблуновский, главный технолог АО «Рыбинский завод приборостроения» установил [10], что через 120 часов работы установки ГАР в результате износа струе формирующего сопла кинетическая энергия струи на выходе уменьшается более чем в 3 раза за счет изменения его формы в продольном и поперечном сечении. Разработанные им технологические рекомендации на основе учета изменения энергетических и динамических характеристик гидроабразивной струи в процессе эксплуатации оборудования ГАР позволили снизить в среднем расход граната на 10%, увеличить стойкость сопел с 100 до 180 часов, повысить производительность резки некоторых материалах до 60%.

Ученые СГТУ им. Гагарина Ю.А. предложили интересный способ интенсифицировать процесс гидроабразивного резания за счет закручивания струи гидроабразивной суспензии [11] за счет ее прохождения по спиралеобразной канавке в смесительной трубке. Закручивание струи приводит к увеличению кинетической энергии ударного воздействия струи на обрабатываемый материал, обеспечивается «сверлильный» эффект, который способствует повышению как усталостного разрушения обрабатываемого материала, так и режущей способности гидроабразивной струи, а, следовательно, и производительности обработки. Этому способствует концентрация абразива на оси канавки за счет работы центроостремительных сил. В условиях завода «САЗ» получено повышение производительности обработки за счет закручивания струи на 12%.

Авторами работы [12] предложено для повышения эффективности гидрорезания накладывать на процесс направленные вибрации материала вдоль линии реза. Эффективная частота этого воздействия, полученная расчетным путем, находится в килогерцовом диапазоне возможных частот колебаний. Чем больше скорость гидроабразивной струи, тем меньшей должна быть амплитуда накладываемой вибрации большей ее частота.

А.С. Денисов (МГТУ «Станкин») [6] за счет дискретной подачи абразива при ГАР получили существенную его экономию: на 22% при резке стали и на 27% при резке Al, но при этом скорость реза может быть увеличена на 10-20% при обработке Al и на 20-40% при обработке стали.

Добавление водорастворимых полимеров при гидрорезании, например, 0,01% по массе полиоксиэтилена, по данным исследований Р.А. Кузьмина [13] увеличивает силу воздействия струи на разрезаемый материал в 1,6-1,7 раза за

счет увеличения ее скорости истечения в 1,16-1,17 раза, минутного расхода через сопло в 1,14-1,28 раза и длины начального участка (без расхождения струи) в 1,4-1,7 раза. В итоге производительность гидрорезания возрастает в 1,11-1,35 раза по сравнению с резанием струей чистой воды.

Получить наилучшие результаты обработки обеспечивают способы ГАР, разработанные в МГТУ им. Н.Э. Баумана, за счет применения метода акустической эмиссии для назначения технологических режимов резания [14], которые ранее хорошо себя зарекомендовали при оптимизации процессов резания лезвийным инструментом и ультразвуковой обработке.

Наблюдается тенденция создания гибридного оборудования, например, сочетающего лазер и гидрорезание, плазму и гидрорезание, гидрорезание и сверление и т.п., которые значительно повышают экономические показатели обработки.

Компания Synova SA (Швейцария) запатентовала и реализовала инновационный гибридный способ обработки, названный Water Jet Guided Laser (WJGL) [15]. Суть способа: мощное лазерное излучение циклически воздействует на обрабатываемый материал, расплавляя его в локальной зоне, а гидроструя (является световодом) диаметром 0,08-0,15 мм и более под давлением 0,5–2,5 МПа в моменты пауз воздействует на расплав, охлаждает его и удаляет продукты разрушения. Способ имеет большие перспективы, но внедрение его ограничивает сложность и дороговизна комбинированной струйно-лучевой головки и оснастки на данный момент.

Новые требования к гидроабразивной резке предъявляются при обработке прецизионных деталей, точность которых на порядок выше, чем для деталей машиностроения. Установка MWJ C4 & F4 компании Daetwyler (Швейцария) отвечает таким требованиям: обеспечивает шероховатость поверхности реза Ra 0,8 мкм, точность обработки как при шлифовании, а точность позиционирования менее 1 мкм. Диаметр струи уменьшен с 0,5 до 0,3 мм, а в перспективе – до 0,1 мм. Это открывает уникальные возможности в микроэлектронной промышленности при обработке многослойных кристаллов и кристаллоносителей, в медицине – для изготовления имплантатов, костных и фиксирующих пластинок, в авиационной промышленности – при изготовлении прецизионных изделий [16].

Повышение производительности в разы и снижение себестоимости операций обеспечивает параллельная резка одной или нескольких деталей на гидрорежущих комплексах с 2-4 и более режущими головками, установленными на портале и управляемыми системами ЧПУ. Однако дополнительные опции станков часто сопровождаются усложнением их конструкции, увеличивая их стоимость (до 60%) и эксплуатационные расходы, а также снижая их надежность.

Стоимость абразивного материала (граната) достигает до 75 % общей почасовой эксплуатационной стоимости системы гидроабразивной резки. Поэтому создание альтернативных видов абразивных материалов, разработка систем управления абразивной системой, систем рециркуляции и удаления отработанного абразива, поиск новых материалов

для изготовления сопел является актуальными задачами. Например, алмазные сопла обеспечивают непрерывную работу от 500 до 2000 часов, сапфировые и рубиновые – 50-200 часов.

Большие резервы повышения эффективности ГАР заключены в оснащении станков режущими головками для трехмерного резания, в совершенствовании систем диагностики процесса, состояния оборудования и его элементов, мониторинге хода режущей головки (работы насосной системы), во внедрении системы профилактического ремонта, управляемого интеллектуальной системой станка, в разработке современного интуитивного ПО, во внедрении роботизированной гидроабразивной резки, разработке цифровых интеллектуальных технологий на всех этапах технологического процесса и жизненного цикла изделий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Степанов, Ю.С. Научно-технические технологии резания материалов сверхзвуковой струей жидкости различного состава / Ю.С. Степанов, Г.В. Барсуков, А.В. Михеев // Научно-технические технологии в машиностроении. 2011. № 4. С. 32-38.
2. Степанов, Ю.С. Перспективы развития гидроструйных технологий в машиностроении / Ю.С. Степанов, М.А. Бурнашов, А.Н. Прежбилов // Вестник современных технологий. 2016. № 3 (3). С. 68-75.
3. Степанова, Е.Ю. Инновационные технологии резания сверхзвуковой струей жидкости: экономика, рынок, состояние и перспективы развития / Е.Ю. Степанова, О.Г. Кожус, Г.В. Барсуков // Вестник Брянского государственного технического университета. 2017. № 1 (54). С. 243-253.
4. Stepanov, Yu. A Thermo-Physical Model of Destruction of Contaminants by Means of a Water-Ice-Jet Cleaning Technology / Yu. Stepanov, M. Burnachov, E. Stepanova // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 50 (2017) 012021 doi: 10.1088/1755-1315/50/1/012021.
5. Бурнашов, М.А. Водолеяная струя как современный инструмент для разрезания, упрочнения и очистки деталей машин / М.А. Бурнашов, А.Н. Прежбилов, Е.Ю. Степанова // Вестник РГТУ им. П.А. Соловьева. 2017. № 2 (41). С. 274-280.
6. Денисов, А.С. Повышение эффективности гидроабразивного резания заготовок из толстолистовых металлов на основе дискретной подачи абразива: автореферат дис. кандидата технических наук : 05.02.07 / Денисов Александр Сергеевич; [Место защиты: Моск. гос. технол. ун-т «Станкин»]. - Москва, 2014. - 18 с.
7. Гидрорезание судостроительных материалов / Р. А. Тихомиров, В.Ф. Бабанин, Е. Н. Петухов и др. Л.: Судостроение, 1987. - 164 с.
8. Stepanov, Yu.S. Technological fundamentals for efficiency control of hydroabrasive cutting / Yu.S. Stepanov, G.V. Barsukov, S.G. Bishutin // International Conference on Industrial Engineering, ICIE. 2016. ProcediaEngineering 150 (2016) 717 – 725. doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.093.
9. Степанов, Ю.С. Разрушение преграды сверхзвуковым потоком свободных абразивных частиц / Ю.С. Степанов, Г.В. Барсуков, А.В. Михеев. М.: Спектр, 2010. 149 с.
10. Яблуновский, Я. Ю. Повышение эффективности гидроабразивной обработки на основе учета коэффициента эффективности / Я. Ю. Яблуновский // Естественные и технические науки. – 2011. – №4. – С. 386–390.
11. Пат. 2466008 РФ, МПК В24С 005/04. Способ формирования струи жидкости для резания материалов и устройство для его реализации / Шпилев В.В., Решетников М.К., Капульник С.И., Береда Н.Н., Кутин А.С.; опубл. 10.11.2012. Бюл. № 31. 8 с.
12. Алюшин, Е.Г. Повышение эффективности гидроабразивного резания путем направленной вибрации материала вдоль линии реза / Е.Г. Алюшин, А.В. Воронков, Ю.С.

Степанов //Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2012. № 3-3 (293). С. 82-87.

13. К вопросу о механизме воздействия струи жидкости с полимерными добавками на обрабатываемый материал при гидрорезании /Р.А. Тихомиров, Е.Н. Петухов, Д.В. Кравченко, Р.А. Кузьмин. Сб. науч. тр. Междунар. науч.-техн. интернет-конф. «Фундаментальные и прикладные проблемы технологии машиностроения - Технология 2002», 1 марта-10 сентября 2002. Орел: ОрелГТУ, 2002. С. 142-145

14. Повышение производительности гидроабразивной резки материалов путем выбора рациональных режимов обработки методом акустической эмиссии /А.А. Барзов, А.Л. Галиновский, М.В. Хафизов, В.И. Колпаков // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. № 1(670). – 2016. С. 71-77.

15. Synova, S. A. Natural diamond cutting using water jet-guided laser [Electronic resource] / S. A. Synova. – Available at: http://www.synova.ch/fileadmin/user_upload/conferences/2011_LIM2011_Synova_final.pdf. – 12.05.2013. – Title from the screen.

16. Способ прецизионной гидроабразивной резки прецизионны деталей благодаря новому способу их производства с помощью установок MWJ C4 & F4 производства компании Daetwyler (Швейцария)// Металлообработка и станкостроение. Мир станкостроения и технологий. Июнь 2018. №6. С. 40-41.

АВТОРЫ

Степанова Елена Юрьевна, Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, к.э.н., доцент.

Барсуков Геннадий Валерьевич, Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, д.т.н., профессор.

Кожус Ольга Геннадьевна, Орловский государственный университетим. И.С. Тургенева, ведущий инженер.

Степанов Юрий Сергеевич, Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, д.т.н., профессор.

THE AUTHORS

Stepanova Elena Yurievna, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Orel State University named after I. S. Turgenev;

Gennady Valerievich, Doctor of Technical Science, Professor, Orel State University named after I. S. Turgenev;

KozhusOlga Gennadievna, Lead Engineer ,Orel State University named after I. S. Turgenev;

Stepanov Yury Sergeevich, Doctor of Technical Science, Professor; Orel State University named after I. S. Turgenev.

**УВЕЛИЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ
И ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВИБРАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ**

**INCREASING TECHNOLOGICAL OPPORTUNITIES AND IMPROVING
THE EFFICIENCY OF VIBRATION TREATMENT**

ХВОСТИК Э. А., ОКСАНИЧ О.З., СЕРГА Г. В.

*(Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина,
Краснодар, Россия)*

KHIVOSTIK E. A., OKSANYCH O.R., SERGA G. V.

(Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia).

***Аннотация.** Представлены результаты многолетних исследований и разработок способов увеличения технологических возможностей и повышения эффективности вибрационной обработки путем упрочнения поверхностного слоя деталей и улучшения их качества поверхности с помощью совмещения сложного движения обрабатываемых деталей с колебательным движением рабочих тел с малой амплитудой колебаний до 8 мм и путем создания технологии и комплекта оборудования, обеспечивающих придание обрабатываемым деталям и рабочим телам движения с большой амплитудой колебаний от 10 до 1000 мм и выше. Представлены не только схемы работы, но и опытный образец станка для отделочно-зачистной обработки шестерен с совмещением их сложного движения с колебательным движением рабочих тел.*

***Annotation.** The results of many years of research and development of ways to increase technological capabilities and increase the efficiency of vibration treatment by strengthening the surface layer of parts and improving their surface quality by combining the complex motion of machined parts with vibrational motion of working bodies with a small amplitude of oscillations up to 8 mm and by creating technology and a set The equipment providing giving to processed details and working bodies of movement with the big amplitude to from 10 to 1000 mm and above. Presented are not only work schemes, but also a prototype machine for finishing and cleaning gears with the combination of their complex motion with the vibrational motion of working bodies.*

***Ключевые слова:** вибрационная обработка, колебания, амплитуда, отделочно-зачистной обработка, обработка шестерен*

***Keywords:** vibration processing, oscillations, amplitude, finishing-cleaning treatment, gearing*

1. Введение

Вибрационная обработка поверхности деталей, посредством которой осуществляется отделочно-зачистная и упрочняющая обработка, осуществляется под воздействием колебаний однообразных форм с амплитудой не более 4-8 мм. Поэтому применяемые в настоящее время вибрационные станки по своим эксплуатационным показателям не отвечают возрастающим потребностям производства. Устранение проблемы следует искать в нестандартных решениях, поиске оригинальных конструкций машин и технологий, обеспечивающих существенную интенсификацию процессов контактирования обрабатываемых деталей и рабочих тел, усложнению и приданию разнообразия форм их движению в рабочих органах станков, а также увеличение их амплитуд путем совершенствования геометрии рабочих органов станков методами начертательной геометрии и инженерной графики, что позволяет оформлять рабочие органы по периметру криволинейными или плоскими элементами расположенными под углом не только друг к другу, но и к оси вращения рабочих органов [1, 2, 3, 4, 5, 6].

2. Основная часть

2.1. Увеличение технологических возможностей и повышение эффективности вибрационной обработки путем наложения двух и более движений обрабатываемых деталей с колебательным движением рабочих тел и их совмещение.

Такая задача может быть решена совмещением колебательного движения рабочих тел и сложного движения обрабатываемых деталей. Например, сложного движения обрабатываемых деталей, путем сложений их относительного и переносного движений.

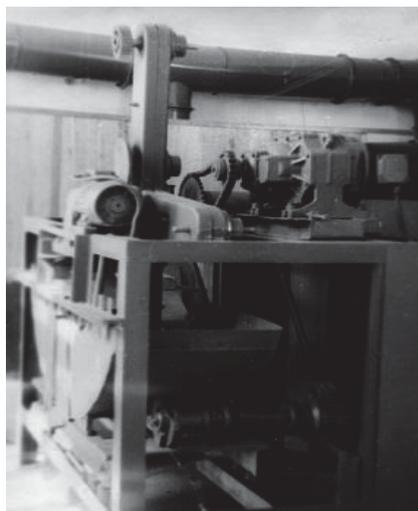


Рисунок 1- Образец станка для отделочно-зачистной и упрочняющей обработки шестерен с помощью совмещения их сложного движения с колебательным движением рабочих тел

Реализация предлагаемого способа осуществлялась (рисунок 1) путем внедрения в производство машиностроительного предприятия станка для отделочно-зачистной и упрочняющей обработки шестерен [7].

После проведения предварительных исследований был спроектирован и изготовлен станок для отделочно-зачистной и упрочняющей обработки шестерен, который показал высокую эффективность обработки, в том числе качество обработки и высокую производительность. Время обработки непрерывным потоком двух шестерен не превышало 1,5 минуты. На рисунке 2 представлена схема станка для отделочно-зачистной и упрочняющей обработки шестерен, смонтированного в цехе металлообработки машиностроительного предприятия.

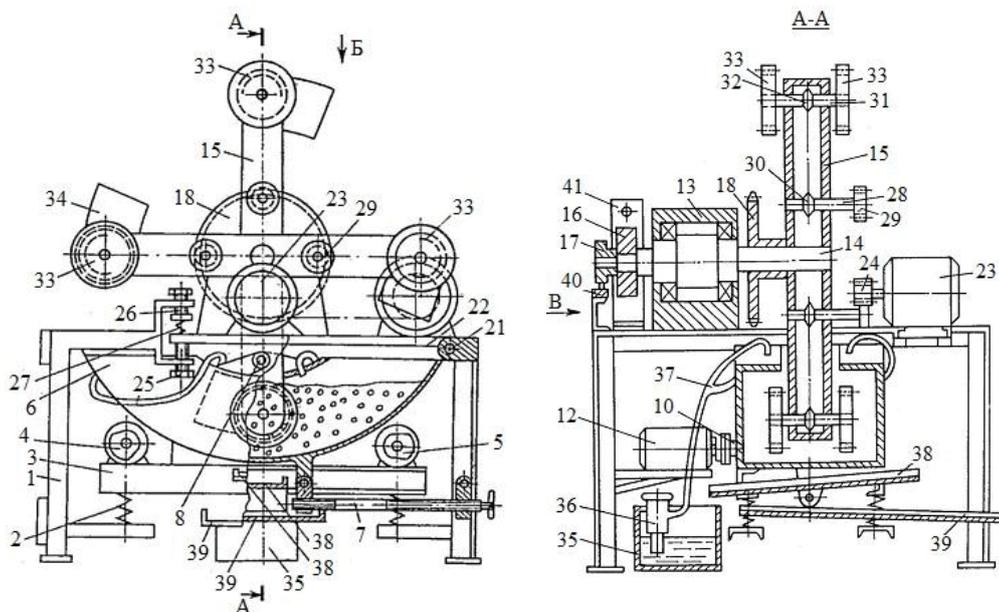


Рисунок 2 – Станок для вибрационной обработки шестерен с совмещением сложного движения обрабатываемых предметов с колебательным движением рабочих тел, (1 – основание, 2 – пружины, 3 – площадка, 4 и 5 – пружины, 6 – торообразная рабочая камера, 7 – механизм поворота, 8 – шарнир поворота, 9 и 10 – гибкие валы, 11 и 12 – электродвигатели, 13 – подшипниковая опора, 14 – вал силового привода, 15 – пустотелый ротор, 16 – шкив тормоза, 17 – кулачок, 18 и 19 – приводные звездочки, 20 – электродвигатель, 21 – шарнир, 22 – рама, 23 – электродвигатель, 24 – шестерня, 25 – регулировочный винт, 26 – винт, 27 – пружина, 28 – ведомый вал, 29 – шестерня, 30 – звездочка, 31 – шпиндель, 32 – звездочка, 33 – обрабатываемые предметы, например шестерни, 34 – обтекатели, 35 – емкость, 36 – насос, 37 – шланги, 38 – выдвижной наклонный лоток, 39 – стационарный наклонный лоток, 40 – электротормоз, 41 – микровыключатель, 42 – командный прибор, 42 – рубильник, 44 – кнопочная станция, 45 – пружина)

2.2. Увеличение технологических возможностей и повышение эффективности вибрационной обработки путем создания технологии и комплекта оборудования обеспечивающих придание обрабатываемым деталям и рабочим телам движения с большой амплитудой

На базе идеологии академика Кошкина Л. Н. [8] нами также предлагается технологии и комплекты оборудования, позволяющие осуществлять колебания масс загрузки (обрабатываемых деталей и частиц рабочих сред) с амплитудой от 10 до 1000 мм и выше [5, 6, 7]. Такая возможность реализуется за счет оформления

наружных поверхностей рабочих органов названных нами «Винтовые роторы» дискретно расположенными по периметру плоскими или криволинейными элементами различной формы и типоразмеров, разнонаправленными по отношению к винтовым линиям по их наружной поверхности.

Комбинирование величины и направления винтовых линий в сочетании с геометрическими характеристиками плоских или криволинейных элементов позволяет не только создавать низкочастотные колебания масс загрузки с большой амплитудой, но и совмещать транспортные и технологические функции, т. е. осуществлять процесс ОЗО и упрочнения поверхностного слоя, улучшения качества поверхности непрерывным потоком, во время транспортирования деталей от загрузки к выгрузке.

В результате проведенных многолетних исследований созданы 70 конструкций винтовых роторов, в том числе 22 цилиндрических, 15 конических, 2 зигзагообразных, 4 выпуклых, 5 прутковых, 5 кольцевых-торовых, 1 спиральный-торовый, 4 спиральных-прямоточных, 4 квадратных, а также 8 комбинированных. Разработана классификация винтовых роторов, которая позволяет целенаправленно вести поиск новых конструкций винтовых роторов. По нашему мнению их может быть 224 [1-7].

Исследования эффективности упрочнения поверхностного слоя деталей и улучшения качества поверхности по методикам, проведены на двенадцати конструкциях винтовых роторов с учетом влияния отдельных факторов: частот вращения винтовых роторов, геометрии винтовых роторов (значений отделов, классов), веса деталей, твердости материала деталей продолжительности обработки, размера гранул рабочих сред, зернистости абразивных материалов рабочих сред.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования показали:

– увеличение технологических возможностей и повышение эффективности вибрационной обработки, повышение надежности машин можно достичь с помощью совмещения сложного движения обрабатываемых предметов с колебательным движением рабочих тел с малой амплитудой колебаний до 8 мм;

– увеличение технологических возможностей и повышение эффективности вибрационной обработки, повышение надежности машин можно достичь путем создания технологии и комплекта оборудования обеспечивающих придание обрабатываемым деталям и рабочим телам движения с большой амплитудой колебаний не только рабочих тел, но и предметов обработки от 10 до 1000 мм и выше. Показаны: принцип работы станка для отделочно-зачистной обработки шестерен с помощью совмещения их сложного движения с колебательным движением рабочих тел, образец станка, внедренный на машиностроительном заводе;

– процесс обработки в винтовых роторах сопровождается пластическим деформированием поверхностных слоев деталей, однако, увеличение времени обработки свыше 25 мин, практически не приводит к улучшению состояния поверхностного слоя деталей;

- на каждом этапе обработки деталей в винтовых роторах интенсивность наклепа различная и может достигать значительной величины, обеспечивая повышение микротвердости поверхностного слоя в 1,1-1,5 раза;
- чем выше класс винтового ротора, тем выше транспортирующая способность, однако, меньше энергоёмкость взаимодействия гранул рабочих сред на детали, а значит меньше съём металла;
- с увеличением твердости обрабатываемого материала детали, съём металла уменьшается;
- увеличение грануляции (размеров) части рабочих сред повышает съём металла и скорость протекания процессов;
- с увеличением веса детали увеличивается съём металла;
- с увеличением продолжительности обработки съём металла увеличивается;
- производительность съёма металла растёт с увеличением частоты вращения винтовых роторов до предельной скорости, свыше которой детали и рабочая среда «прилипают», т. е. начинают вращаться вместе со стенками винтовых роторов.

В результате проведенных исследований предлагаются конструкции станков для ОЗО и упрочнения поверхности деталей, обеспечивающих повышение надежности деталей машин, а также техническая документация.

ЛИТЕРАТУРА

1. Серга Г.В. Оборудование на базе винтовых роторов в машиностроении / Г.В. Серга, Э.А. Хвостик // Вестник БГТУ– 2018. – №3 (64). С. 4-9
2. Серга Г.В. Исследование возможности применения низкочастотных колебаний с большой амплитудой для сепарации сыпучих сред / Г.В. Серга, Э.А. Хвостик, М.Э. Делок // Прогрессивные технологии и системы машиностроения – 2018 №1(60) – С. 62-67
3. Серга Г.В., Иванов А.Н. Технология финишной обработки кромок и удаления заусенцев в винтовых роторах // Технология финишной обработки прецизионных поверхностей и удаление заусенцев. сб. тр. 6-ой междунар. науч.-техн. конф.–Санкт-Петербург, 2000. С. 249-256.
4. Серга Г.В. Оборудование для мойки сыпучих материалов и абразивных сред с амплитудой движения свыше 500 мм / Г.В. Серга, Э.А. Хвостик, Н.Н. Кузнецова, И.И. Табачук // Вестник БГТУ– 2018. – №2 (63). С. 38-43
5. Пат. № 2185947, МПК В24В 31/02. Устройство для галтовки / А.Н. Иванов, А.В. Ляу, И.Н. Лукин, Г.В. Серга ; Заявитель и патентообладатель Федеральное государственное учреждение высшего профессионального образования «Кубанский государственный аграрный университет». - № 2000116854/02; заявл. 26.06.2000; опубл. 27.07.2002 Бюл. № 21
6. А.с. № 1433774 Российская Федерация, МПК В24В 31/02. Устройство для галтовки / Г.В. Серга ; Заявитель и патентообладатель Армавирский государственный педагогический институт - № 4234030; заявл. 08.03.1987; опубл. 27.07.2002 Бюл. № 21
7. А.с. 1283058 Российская Федерация, МПК В24В 31/073. Станок для шпиндельной вибрационной обработки деталей в абразивной среде / Г. В. Серга; Армавирский государственный педагогический институт. - № 3857326 ; заяв. 20.02.1985 ; опубл. 15.01.1987.
8. Кошкин Л. Н. Роторные и роторно-конвейерные линии. М. : Машиностроение, 1986. 319 с.

АВТОРЫ

Хвостик Эдуард Андреевич - магистрант, Кубанский государственный аграрный университет им. И. Т. Трубилина.

Оксанич Оксана Романовна - студентка архитектурно-строительного факультета, Кубанский государственный аграрный университет им. И. Т. Трубилина;

Серга Георгий Васильевич - д. т. н., профессор, зав. каф. НГиГ, Кубанский государственный аграрный университет им. И. Т. Трубилина.

THE AUTHORS

Khvostik Eduard Andreevich - Master, Federal State-funded Educational Institution of Higher Professional Education «Kuban State Agrarian University».

Oksanych Oksana Romanovna - Student of the Architecture and Construction Faculty, Federal State-funded Educational Institution of Higher Professional Education «Kuban State Agrarian University»;

Serga Georgiy Vasilievich - D. Eng., Prof., Head of the Dep., Federal State-funded Educational Institution of Higher Professional Education «Kuban State Agrarian University»/

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ОБРАБОТКИ ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОТВЕТСТВЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ

IMPROVING THE PROCESSING TECHNOLOGY OF INTERNAL SURFACES OF CRITICAL PARTS

АВРЕЛЬКИН В.А., СОЛИН С.В., НАДЕЖДИНА О.А., ЕВДОКИМОВ Р.С., ПОРФИРЬЕВА К.Л., НИКОЛАЕВ В.В., ФЕДОТОВА Н.В., САЛОВ П.М.

*(Чувашский государственный университет имени И.Н.Ульянова,
г. Чебоксары, Россия)*

AVRELKIN V.A., SOLINS V., NADEZHDIRINA O.A., EVDOKIMOV R.S., PORFIRIEVA K.L., NIKOLAEV V.V., FEDOTOVA N.V., SALOV P.M.

(The Chuvash state university of I.N.Ulyanov, Cheboksary, Russia)

Аннотация. Работа посвящена выбору и совершенствованию отдельных операций механической обработки отверстий диаметром 138-200 мм в корпусных деталях. Наиболее трудоёмкими из них являются внутреннее шлифование, хонингование, тонкая расточка, профильное точение и шлифование, раскатка, алмазное выглаживание, вибронкатка и др. Правильный выбор методов обработки позволяет сократить припуск на обработку, увеличить производительность процесса, сократить расходы, связанные с восстановлением инструмента и технологической оснастки.

Annotation. The work is devoted to the selection and improvement of individual machining operations of holes with a diameter of 138-200 mm in the body parts. The most time-consuming of them are internal grinding, honing, fine boring, profile turning and grinding, rolling, diamond smoothing, vibronakatka, etc. The correct choice of processing methods allows to reduce the allowance for processing, increase the productivity of the process, reduce the costs associated with the restoration of the tool and tooling.

Ключевые слова: деталь, выбор, методы, инструмент, жёсткость, прирабатываемость, износ, правка, повышение надёжности, стойкость.

Key words: detail, choice, methods, tool, rigidity, workability, wear, straightening, reliability increase, durability.

Во всех типах производства изготавливаются детали с отверстиями, получение которых связано с большей трудоемкостью. Например, в станкостроении весьма сложно получить отверстия под пиноль (гильзу) в шпиндельных бабках высокоточных станков. Основное требование к сопрягаемым поверхностям - высокая несущая способность в диапазоне температур эксплуатации станка – $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$ [1, 2]. В связи с этим производится индивидуальная подгонка тел - вал подгоняется к отверстиям. Диаметр отверстия имеет второстепенное значение, первостепенно то, что колебание размера при

длине $300 \div 500$ мм не должно превышать 2 мкм ($D^{+0,002}$). Шероховатость обработанной поверхности - не более $Ra0,032$. Неперпендикулярность оси к базовому торцу не должна превышать погрешностей современных методов измерений. Сопрягаемые поверхности должны иметь «масляные карманы».

При обеспечении отверстий с диаметром $D = (138 + 1 \div 2)$ мм длиной 400 мм в шпиндельной бабке из чугуна СЧ28-48 было проработано несколько рекомендуемых вариантов с участием процессов шлифования кругами различных характеристик [2-4], тонкой расточки твердосплавными и резцами из сверхтвердых материалов [5,6], хонингования обычными абразивными (электрокорундовыми), алмазными, эльборовыми и алмазно-эльборовыми (50%+50% концентрации) брусками различной зернистости [7-9]. При этом были опробованы различные варианты восстановления инструмента [10-12], повышения жёсткости технологических систем (ТС) [1, 2], анализ прирабатываемости инструмента [13-15], различные смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ) [4,8 - 10, 16].

Результаты проведенных исследований показали, что процесс шлифования не рекомендуется использовать при обработке указанной детали при любом сочетании операций. Не рекомендуется применять процесс полустого хонингования алмазными брусками зернистостью 63/50 т.к. последующее хонингование брусками зернистостью 28/20 приводит к их быстрому засаливанию и увеличению шероховатости обрабатываемой поверхности. Обкатка не позволяет получать однородную шероховатость поверхности. Окончательные операции должны выполняться в помещении, где поддерживается температура воздуха 20 ± 05 С°, а СОЖ - $18 \div 20$ С°. Целесообразно растачивать отверстие эльборовыми резцами, обеспечивая $R_a = 0,80 \div 0,63$ [5,6]. Подобная шероховатость способствует самозатачиванию алмазных брусков на металлической связке МС01 зернистостью 100/80 [7-9]. Окончательно поверхность должна обрабатываться хонингованием алмазными брусками зернистостью 28/20. Вместе с тем, рекомендуемый маршрут обработки не гарантирует выполнение всех требований к обработанной поверхности. В частности – не обеспечиваются требования по шероховатости при использовании СОЖ АРИАН ОСМ-1 [16]. Ранее на операциях хонингования применялась СОЖ на основе керосина с добавлением масла и олеиновой кислоты, которая обеспечивает меньшую шероховатость.

При эксплуатации изготовленного станка на его пиноле появляются продольные риски, вызванные шаржированием внутренней поверхности алмазными зернами. Для уменьшения шероховатости поверхности в отверстиях и уменьшения в ней абразива нами опробована доводочная операция. Работа выполнялась на хонинговальном станке с помощью удлиненного хона. Вместо алмазных использовались бруски из свинцовистой бронзы. Их контактная поверхность рифленая. Рифления наносятся на обточенную, на токарном станке цилиндрическую поверхность с радиусом, меньшим радиусу отверстия. Фактическая площадь контакта брусков с заготовкой должны быть не более 3% от теоретической. Обточка бронзовых брусков производится в сборе с корпусом хона с фиксацией подвижного конуса, обеспечивающего требуемое разжатие брусков.

Правка алмазных брусков после приклейки проводится алмазными крупнозернистыми кругами на металлической связке электроискровым методом [17,18]. Электродвигатель с кругом крепится на суппорте токарного станка. Длина брусков превосходит длину отверстия на 1-3 мм. Осцилляция хона составляет 2÷6 мм. Поверхность отверстия постоянно находится в контакте с брусками. Увеличение длины бруска несимметричность хода при осцилляции приводит к большему увеличению диаметра по краям отверстия.

Осцилляция реализуется за счет кулачка, установленного на тяге хона. За один оборот хона совершается один двойной ход.

Угол подъема винтовой линии бруска вверх и вниз для диаметра 138мм

$$tg \alpha = \frac{2 \div 6}{\frac{\pi D}{2}} = 0,009 \div 0,027$$

составит $\frac{2 \div 6}{\frac{\pi D}{2}}$, откуда α равен - от 32 минут до одного градуса 33 минуты.

При хонинговании риски от зерен имеют большие углы подъема. Наличие дополнительных рисок способствуют вытеснению из поверхностного слоя абразивов, уменьшают шероховатость поверхности, создают большую поверхность для удерживания масла. Бронзовые бруски крепятся к колодкам хона винтами.

Был опробован и другой метод доводки. В качестве доводчиков использовались удлиненные полые цилиндры, заполняемые подогреваемым маслом или соевым раствором. Их длина, так же на 1-3 мм больше длины отверстия, как и в предыдущем варианте, и выполнялись они так же из свинцовистой бронзы. Внутри монтировались термостаты для нагревания.

Доводчик вертикально вводился в отверстие, включался подогрев и его вертикальная осцилляция с помощью эксцентрика с амплитудой 2-6 мм, с частотой 0.5-1.5 Гц. При ходе вниз нагрузка - не более удвоенного веса доводчика. При перегрузке подогрев прекращался до момента, когда тянущая нагрузка снижалась до веса доводчика.

Доводка проводилась 30-45с, за этот период поверхность с вероятностью 0.8 приобретала требуемые параметры.

На практике доводка не производится. Не прошедшие контроля отверстия снова растачиваются и хонингуются, что может повторяться несколько раз. Из двух методов доводки более практичен первый. При хонинговании и доводке особое внимание необходимо уделять очистке СОЖ.

Окончательный размер отверстия выбирается или выгравировывается на торце бабки. Руководствуясь им, изготавливают сопрягаемую деталь-пиноль.

ЛИТЕРАТУРА

1. Расчёт податливости технологических систем внутреннего шлифования /Д.П. Салова , Н.В. Мулюхин , П.М. Салов и др. -Чебоксары : Чув. ун-т, 2013, Деп. в ВИНТИ 25.10.2013, №296-В 2013,-16с.
2. Внутреннее шлифование с продольной подачей / П.М. Салов, Д.П. Салова, С.С. Сайкин и др. - Чебоксары :Чув. ун-т, 2012. Деп. в ВИНТИ 22.06.2012, № 286-В 2012 , 56 с.
3. Виноградова, Т.Г. Качество обработанных отверстий при электрокорундовом и азоборном шлифовании/ Т.Г. Виноградова , П.М. Салов, Д.П. Салова// Научно-технич. вестник Поволжья , г. Казань : Научно-технич. вестник Поволжья .2011.№1. - С.91-95.

4. Салова, Д.П. Анализ тепловых процессов при внутреннем шлифовании ответственных деталей / Д.П. Салова, Т.Г. Виноградова, П.М. Салов // Технология машиностроения . 2011. № 5, - С.10-13.
5. Повышение эффективности алмазного инструмента на металлической связке при шлифовании высокопрочных материалов / Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Скиба В.Ю., Гартфельдер В. А., Секлетина Л.С. Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2017. №3 (76). С.17-27.
6. Гартфельдер В.А., Кравченко Б. А., Давыдов А.С., Секлетина Л.С. Параметры процесса трения при резании из КНБ И РК. Деп. в ВИНТИ в 1997г. №1592-В97 от 13.05.97.
7. Анализ тепловой ситуации при внутреннем шлифовании с продольной подачей / Салова Д.П., Виноградова Т.Г., Салов П.М. и др.- Чебоксары : Чув. ун-т, 2013. Деп. в ВИНТИ 25.10.2013, № 298-В 2013,-15с.
8. Салова Д.П. Тепловой баланс при шлифовании / Д.П. Салова, Т.Г. Виноградова, П.М. Салов // Вестник Чувашского университета : науч. журн. -Чебоксары, 2008. № 2, - С.104-108.
9. Виноградова, Т.Г. Импульсные температуры при аэроборном шлифовании / Т.Г. Виноградова, Д.П. Салова, П.М. Салов // Технология машиностроения . 2011. № 3, - С.11-14.
10. Салов, П.М. Влияние различных условий правкой на микропрофиль абразивного круга / П.М. Салов, В.С. Григорьев, Н.В. Мулюхин // Современные технологии в машиностроении и литейном производстве . Матер. 1-ой Междунар. науч.- практ. Конф.-Чебоксары : Чув.ГУ,- 2015, С. 241-246.
11. Правка кругов при внутреннем шлифовании / Д.П. Салова, Т.Г. Виноградова, П.М. Салов, Ю.И.Воронцов . - Чебоксары : Чув. ун-т, 2013. Деп. в ВИНТИ 25.10.2013, №299- В 2013, 15 с.
12. Повышение эффективности процесса и качества обработанной поверхности присиловом шлифовании торцом круга / П. М. Салов, Д.А. Вячеславов, М.Л. Афанасьева и др. // Сборник « Высокие технологии в машиностроении ». Матер. Всероссийской научн.-конфер., Самара : Сам.гос. техн. ун-т, 2015.-С.28-29.
13. Салов, П.М. Рациональное использование рабочей поверхности абразивных кругов / П.М. Салов, Д.П. Салова. - Чебоксары :Чебок. политехн. ин-т (филиал) МГОУ, 2010. - 332 с.
14. Салов, П.М. Принципы самоорганизации износа шлифованных кругов / П.М. Салов, Б.А. Кравченко.- Самара: Самар.гос.техн.ун-т,2001.-118с.
15. Салов, П.М. Повышение эффективности заточки, круглого и плоского шлифования с продольной подачей : Дис. докт. тех.наук: 05.02.08 и 05.03.01/ Самарский гос. техн. ун-т. - Самара, 1998.-497 с.
16. Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием : Справочник / Л.В. Худобин, А.П. Бабичев, Е.М. Булыжев и др. // Под. общ. ред. Л.В.Худобина, - М. : Машиностроение, 2006. - 544с. ; ил.
17. Lobanov, D.V., Arkhipov, P.V., Yanyushkin, A.S., Skeebe, V.Y. Research of Influence Electric Conditions Combined Electro Diamond Processing by on Specific Consumption of Wheel // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 142 (2016) 012081.
18. Skeebe, V.Yu., Ivancivsky, V.V., Lobanov, D.V., Zhigulev, A.K., Skeebe, P.Yu. Integrated Processing: Quality Assurance Procedure of the Surface Layer of Machine Parts during the Manufacturing Step "diamond Smoothing" // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 125 (2016) 012031.

АВТОРЫ

Аврелькин Владимир Александрович—министр промышленности и экономики Чувашской Республики, д.т.н., профессор кафедры прикладной механики и графики Чувашского государственного университета. Россия, Чебоксары.

Солин Сергей Владимирович- старший преподаватель кафедры архитектуры и дизайна среды Чувашского государственного университета. Россия, Чебоксары.

Надеждина Оксана Анатольевна- старший преподаватель кафедры прикладной механики и графики Чувашского государственного университета.Россия, Чебоксары.

Евдокимов Роман Сергеевич- студент машиностроительного факультета Чувашского государственного университета.Россия, Чебоксары.

Порфирьева Кристина Леонидовна- студент машиностроительного факультетаЧувашского государственного университета. Россия, Чебоксары.

Николаев Вячеслав Владимирович- студент машиностроительного факультетаЧувашского государственного университета. Россия, Чебоксары.

Федотова Надежда Валерьевна – студент машиностроительного факультета Чувашского государственного университета. Россия, Чебоксары.

Салов Пётр Михайлович – д.т.н., проф., профессор кафедры технологии машиностроения Чувашского государственного университета. Россия, Чебоксары

AUTHORS

Avrelkin Vladimir Aleksandrovich- Minister of Industry and Economics of the Chuvash Republic, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Applied Mechanics and Graphics of Chuvash State University. Russia, Cheboksary.

Solin Sergey Vladimirovich - Senior Lecturer, Department of Architecture and Environmental Design Chuvash State University. Russia, Cheboksary.

Nadezhdina Oksana Anatolevna - Senior Lecturer, Department of Applied Mechanics and Graphics Chuvash State University. Russia, Cheboksary.

Evdokimov Roman Sergeevich - a student in the engineering department of Chuvash State University. Russia, Cheboksary.

Porfiryeva Kristina Leonidovna - a student at the engineering faculty of Chuvash State University. Russia, Cheboksary.

Nikolaev Vyacheslav Vladimirovich - a student of engineering faculty of Chuvash State University. Russia, Cheboksary.

Fedotova Nadezhda Valeryevna - a student in the engineering faculty of Chuvash State University. Russia, Cheboksary.

Salov Petr Mikhailovich - Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, Chuvash State University. Russia, Cheboksary

**ТЕХНОЛОГИИ, РАЗРАБОТАННЫЕ ЧУВАШСКИМ ГОСУДАРСТВЕННЫМ
УНИВЕРСИТЕТОМ, СОВМЕСТНО С ПРЕДПРИЯТИЯМИ ЧУВАШИИ**

**TECHNOLOGIES DEVELOPED BY THE CHUVASH STATE UNIVERSITY TOGETHER
WITH THE CHUVASHIAN ENTERPRISES**

**АВРЕЛЬКИН В.А., ШАЛУНОВ Е.П., ИЛЛАРИОНОВ И.Е., ВОРОНЦОВ Ю.И.,
ГРИГОРЬЕВ В.С., НИКИТИН Д.С., САЛОВ П.М., КУПЦОВ М.В.**

*(Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова,
г. Чебоксары, Россия)*

**V.A. AVRELKIN, SHALUNOV E. P., ILLARIONOV I. E., VORONTSOV, Y. I.,
GRIGORIEV V. S., NIKITIN D.S., SALOV P.M., KUPTSOV M.V.**

(The Chuvash state university of I.N. Ulyanov, Cheboksary, Russia)

Аннотация. В работе выполнен анализ научно-технических разработок, выполненных Чувашским государственным университетом при участии предприятий Чувашии. В их основу заложены принципы самоорганизации технических систем на основе синергетического подхода. Рассмотрены вопросы, касающиеся вовлечения в работу большей площади режущей поверхности инструмента и сохранения его квазистационарной формы. Это существенно увеличивает стойкость инструмента и производительность процесса. Достаточного внимания уделено тепловым явлениям при шлифовании и их связи с качеством обработанной поверхности. В работе выполнен глубокий анализ условий правки кругов. Опытно-промышленная проверка проводилась на предприятиях Чувашской республики.

Annotation. The paper analyzes the scientific and technical developments carried out by Chuvash State University with the participation of Chuvash enterprises. They are based on the principles of self-organization of technical systems based on a synergistic approach. The questions concerning the involvement of a larger area of the cutting surface of the tool and the preservation of its quasistationary form are considered. This significantly increases tool life and process performance. Sufficient attention is paid to thermal phenomena during grinding and their relationship with the quality of the treated surface. In work the deep analysis of conditions of editing of circles is executed. The pilot industrial inspection was carried out at the enterprises of the Chuvash Republic.

Ключевые слова: отделка, абразив, трудоёмкость, квалификация, качество, магниты, современные материалы, внедрение.

Key words: finishing, abrasive, laboriousness, qualification, quality, magnets, modern materials, introduction.

Эффективность процесса в механообработке зависит от правильного выбора технологии получения требуемой поверхности детали. Одна из современных тенденций в машиностроении – повышение надежности и

качества технологических процессов на основе пассивного и активного управления ими. Активное управление реализуется на основе внедрения систем с ЧПУ и многооперационных и многоцелевых станков с большими технологическими возможностями. В современном производстве традиционная операция или ее отдельный переход могут быть разбиты на эпизоды (мелкие переходы, элементы цикла и др.), в которых исполнительный процесс (точение, фрезерование, сверление, шлифование и т.п.) реализуется с наибольшей эффективностью. В эти эпизоды должен входить фактор времени работы исполнительного органа, который перестраивается должным образом, или должна использоваться адаптивная система управления.

Пассивное управление – это по мнению авторов работ [1, 2] создание условий при которых технологическая система или процесс самоорганизуются на основе синергетических принципов [1, 2]. Управление реализуется в трибосистемах, в том числе при шлифовании, когда важнейшую роль играет прирабатываемость инструмента [1-4].

Основная цель при организации процесса шлифования - обеспечить относительно равномерный износ режущей поверхности круга и уменьшить долю кромочного износа. Для её реализации необходима информация о факторах, влияющих на износ круга: температура, правка, применение СОЖ, геометрические условия в контакте, распределение припуска и т.п. [4-10], а так же усилия при работе, жёсткость технологической системы [1-3, 11-15].

В работах [3,5,7,10,12] прорабатывались рекомендации и мероприятия, связанные с устранением дефектов, возникающих при реверсировании инструмента при плоском и внутреннем шлифовании. Разработанная методика реализована при внедрении в производство.

Представляют особый интерес внедрённые разработки по предварительному бесцентровому шлифованию, рекомендации к которым подробно описаны в работах [2,5,10]. Совершенствование процесса шлифования на предприятиях Чувашии [1].

На предприятии ОАО Электроприбор ОАО ЭП активно внедряются новые технологии, чему способствует значительное внимание руководства предприятия к повышению научно-технического потенциала у работников различного уровня деятельности. Для пополнения знаний и приобретения навыков используются выставки, конференции, учеба в вузах, в том числе зарубежных, аспирантуре, прохождения стажировок на передовых предприятиях России и Зарубежья. Работниками предприятия защищено несколько докторских и десятки кандидатских диссертаций, написаны монографии, сотни статей. Предприятие поддерживает творческие связи с вузами и научно-техническими организациями, занимающимися вопросами приборостроения. Наиболее тесно связи поддерживаются с Чувашским государством. Значительный научно-технический потенциал обеспечивает предприятию получение грантов и заказов, выполнение которых укрепляет экономику Чувашской республики и России в целом. За последние годы значительный объём работы по совершенствованию выполнен по отделочным операциям и заточке. На ОАО ЭП, используя рекомендации [3,5-12],

оптимизировались операции при изготовлении технологической оснастки, штампов и пресс-форм. Шлифовались сырые и закаленные конструкционные и инструментальные стали X12МФ, У8А, Р6М5, JC5015, 40Х13, литой магнитотвердый сплав Ю14ДК24. Совместо со сталью обрабатывались керамические материалы. Затачивался и перетачивался твердосплавной и быстрорежущий инструмент. Использовались круги на керамической и бакелитовой связках (электрокорундовые, алмазные, эльборовые, аэроборовые) при работе с керамикой - круги с зернами из карбида кремния.

В результате была снижена трудоёмкость, уменьшился износ абразивных кругов. Качественных параметры деталей не ухудшились. Усовершенствованы процессы: заточка и переточка кругами оптимальной формы; глубинное фасонное шлифование режущих пластин из материала JC5015 аэробными кругами; шлифование деталей для штампов и пресс-форм; шлифование магнитного сплава Ю14ДК24 вместе со стальным кольцом; шлифование радиусных канавок; бесцентровое шлифование. Значительное влияние уделено правке кругов, что позволило повысить стойкость, снизить расходы на правку.

При бесцентровом полуставном шлифовании магнитов из сплава ЮН14ДК24 ГОСТ 17809-72 (дисперсионно твердеющий сплав системы $Fe - Al - Ni - Co$, дополнительно медь) применялись круги, форма которых рассчитывались по специальным методикам [2,5,10,15]. Заборная и вспомогательная части рабочего круга образуют форму эллипсоида вращения. Края круга плавно скругляются.

Круг проектировался как разноизнашиваемый, форма которого увязывалась с продольной подачей, глубиной резания, высотой круга. Ограничения по температуре в зоне обработки определяли по методике [5].

Плоское шлифование магнитов по торцу проводилось на станке с ЧПУ. Магниты по 400 штук крепились в специальном приспособлении. Шлифование выполнялось по постоянными удельными нагрузками на круг. Более подробно о рекомендациях по внедрению описано в работе [2,3,15].

В первую очередь следует выделить работы с офтальмологом С.Н. Фёдоровым по изготовлению хрусталика, конвейера для проведения операций ОАО «Чебоксарский электроаппаратный завод» является пионером в разработке технологий, получивших общемировое признание. Общесоюзное признание получили технологии с использованием электрофизических методов обработки, которые совершенствовались в Чув.ГУ [1]. По рассматриваемой тематике решались следующие вопросы: совершенствовалась технология формообразования стружечных канавок на твердосплавных резцах; отработывались технологии шлифования фасонных поверхностей на режущих инструментах, штампах и прессформах, внедрялось глубинное шлифование труднообрабатываемых материалов, совершенствовалось бесцентровое шлифование; отработывались технологии правки кругов абразивными кругами методом обката, устанавливаемыми в специальное приспособление (см. [8, 9]). Форма канавки на резцах формировалась исходя из анализа износа резцов по передней поверхности – радиусная или параболическая.

Исследованиями выявлено – при обработке вязких материалов стружечная канавка формировалась более пологая, чем при обработке конструкционных материалов. Форма естественного износа резца по передней поверхности обеспечивалась заготовкой при повороте шпиндельного узла станка на расчетный угол при расетной форме круга. Стойкость резцов с оптимальной канавкой увеличивается в 1,4-1,6 раза, износ кромки уменьшается в 1,5-2 раза. Более подробно рекомендации по внедрению рассмотрены в работах [2, 8].

Новые схемы удаления припуска при шлифовании фасонных поверхностей позволяют существенно снизить кромочный износ кругов и повысить их стойкость. Износ кругов уменьшился в 1,4-2,5 раза. Суммарная трудоемкость правки уменьшилась в 1,1-2,2 раза, а трудоемкость процесса шлифования – 1,1-1,6 раза.

Глубинное шлифование при изготовлении штампов и пресс-форм осуществлялось при правке и очистке кругов по методике [1, 8]. Оптимальное формообразование профиля круга повышает его стойкость в 1,5-2 раза и уменьшает износ в 4-5 раз.

Совершенствование бесцентрового шлифования осуществлялось при обработке прутков и пуансонов. Формообразование рабочих и ведущих кругов производилось по методике [2,8]. Время приработки кругов уменьшается в 3-5 раз, а стойкость увеличивается в 1,5-2 раза. Производительность процесса увеличивается в 1,3-1,5 раза. Тепловые дефекты при шлифовании практически отсутствуют.

Предприятия ООО «ДИСКОМ» и ООО «ИННОТЕХ» разрабатывают весьма перспективные, но труднообрабатываемые материалы. ООО «ДИСКОМ» является ведущим предприятием в России и весьма значительным и авторитетным в мире разработчиком дисперсно-упрочненных композиционных материалов (ДУКМ). Дискотом на медной и алюминиевой основах. Материалы являются труднообрабатываемыми как лезвийным, так и абразивным инструментом. Совершенствование технологии бесцентрового шлифования прутков малого диаметра на предприятиях ООО «ДИСКОМ» и ООО «ИННОТЕХ», при которых используется равноизнашиваемый рабочий круг и относительная форма ведущего круга, позволило на 25...30% увеличить производительность полуступенчатого шлифования и в 1,5...2,5 раза уменьшить расход абразива. Оптимизация геометрии сверл для сверхглубокого сверления малых отверстий диаметром от 0,5 до 3,4 мм при изготовлении токопроводящих наконечников из медных ДУКМ, позволила увеличить производительность процесса на 6...8%, увеличить стойкость инструмента на 8...12%. На научно-производственном предприятии «ИННОТЕХ», разрабатывающем труднообрабатываемые композиционные материалы на основе ДУКМ, выполнена следующая работа: опытно-промышленная проверка и внедрение процесса внутреннего шлифования технологической оснастки для гидроэкструзии порошковых материалов; сверление сверхглубоких отверстий диаметром от 0,2 до 6 мм; при отношении длины детали к диаметру отверстия – до 100 раз; бесцентровое шлифование прутков из ДУКМ. Создаваемые материалы упрочнены дисперсными тугоплавкими частицами карбидов оксидов, боридов. Остаточный ультрадисперсный углерод придает ДУКМ высокие

температуры рекристаллизации и жаропрочность. Исходя из сказанного, материалы обладают высокой износостойкостью и труднообрабатываемы.

Совместные разработки включали в себя вопросы оптимизации правки кругов [8, 9], расчета допустимых температур шлифования [4-7, 12], учет жесткости ТС при назначении режимов обработки [15], расчет формы кругов [2] и сверл [15].

Шлифование проводится кругами с зернами из карбида кремния зеленого СОЖ – «Макрокул». Сверление – цельными твердосплавными сверлами. Производительность шлифования увеличилась на $20 \div 35\%$. Расход кругов уменьшился в $1,5 \div 2,2$ раза, что связано с увеличением их стойкости. Производительность сверления сверлами оптимальной формы увеличилась в $1,4-1,8$ раза.

ЗАО «Чебокомплент» используя рекомендации [3,5-12] выполнена следующая работа: шлифование стружечных канавок на напайных резцах; врезное шлифование прямобочных и эвольвентных профилей шлицев валов; бесцентровое шлифование на проход валов, осей, пальцев, прутков; плоское глубинное шлифование стальных восстанавливаемых деталей; врезное шлифование впадин закаленных зубчатых колес; силовое шлифование стальных и чугунных литых заготовок.

Режимы резания назначались по рекомендациям [3,6-12]. При затачивании стружечных канавок производительность увеличивается в 2-3 раза, сколы на кромках отсутствуют. Правка кругов осуществлялась брусками из карбида кремния зеленого. Брусочки при правке поворачивались в специальном приспособлении. Износ кругов снизился на 10% .

Обеспечение равноизносности кругов при врезном шлифовании эвольвентных профилей осуществлялось с помощью регулирования припуска на обработку. Размерная стойкость инструмента возросла в 2-3 раза, расход кругов сократился в $1,2-1,6$ раза. При бесцентровом шлифовании правка ведущего круга – по копиру. Заборная часть рабочего круга – по эллипсу. Приработка кругов уменьшилась в 3-4 раз. Производительность процесса увеличилась на $6-12\%$. Исключен брак, возникающий из-за смещения столба заготовок.

На предприятии ЗАО «Поволжский центр тракторов и строительно-дорожных машин», используя рекомендации [1-12], выполнялась работа по следующим направлениям: плоское глубинное шлифование деталей, силовое шлифование и обдирка сварных соединений, восстановленных катков, валов, бесцентровое шлифование пальцев гусениц, обдирка траков, заточка резцов при многопроходном шлифовании. Правка кругов осуществлялась по рекомендациям [3,5-12].

При заточке инструмента поддержание работоспособности алмазных кругов проводилось методом очистки. Опыт внедрения совместных разработок используется в учебном процессе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Салов, П.М. Принципы самоорганизации износа шлифовальных кругов / П.М. Салов, Б.А. Кравченко. – Самара: Самарского государственного технического университета, 200. – 118 с.

2. Салов, П.М. Рациональное использование рабочей поверхности абразивных кругов / П.М. Салов, Д.П. Салова. – Чебоксары: Чебоксарский Политехнический институт (филиал) МГОУ, 2010. – 332 с.
3. Внутреннее шлифование с продольной подачей / П.М. Салов, Д.П. Салова, С.С. Сайкин и др. – Чебоксары: Чувашский государственный университет, 2012. Деп в ВИНТИ 22.06.2012, №296 – В2012, - 56 с.
4. Салова, Д.П. Тепловой баланс при шлифовании / Д.П. Салова, Т.Г. Виноградова, П.М. Салов // Вестник Чувашского университета: науч. Журн. – Чебоксары, 2008. №2, - с.104-108.
5. Виноградова, Т.Г. Импульсные температуры при аэробном шлифовании / Т.Г. Виноградова, Д.П. Салова, П.М. Салов // Технология машиностроения. 2011. №3, - с.11 – 14.
6. Анализ тепловой ситуации при внутреннем шлифовании с продольной подачей / Салова Д.П., Виноградова Т.Г., Салов П.М. и др. – Чебоксары: Чувашский государственный университет, 2013. Деп. в ВИНТИ 25.10.2013, №298 – В2013, - 15с.
7. Салова, Д.П. Анализ тепловых процессов при внутреннем шлифовании ответственных деталей / Д.П. Салова, Т.Г. Виноградова, П.М. Салов // Технология машиностроения. 2011. №5, - с.10-13.
8. Салов, П.М. Влияние различных условий правки на микропрофиль абразивного круга / П.М. Салов, В.С. Григорьев, Н.В. Мулюхин // Современные технологии в машиностроении в литейном производстве. Матер. 1-ой Международной научно-практ. Конф. – Чебоксары: Чувашский государственный университет - 2015, с.241-246.
9. Правка кругов при внутреннем шлифовании / Д.П. Салова, Т.Г. Виноградова, П.М. Салов, Ю.И. Воронцов - Чебоксары: Чувашский государственный университет, 2013. Деп в ВИНТИ 25.10.2013, №299 – В2013, 15 с.
10. Виноградова, Т.Г. Качество обработанных отверстий при электрокорундовом и аэробном шлифовании / Т.Г. Виноградова, П.М. Салов, Д.П. Салова // Научно-технич. вестник Поволжья, г. Казань: Научно-техн. вестник Поволжья, 2011, №1, - с.91-95.
11. Расчет податливости технологических систем внутреннего шлифования / Д.П. Салова, Н.В. Мулюхин, П.М. Салов и др. – Чебоксары: Чув. ун-т, 2013. Деп. в ВИНТИ 25.10.2013, №296 – В2013, - 16 с.
12. Повышение эффективности процесса и качества обработанной поверхности при силовом шлифовании торцом круга / П.М. Салов, Д.А. Вячеславов, М.Л. Афанасьева и др. // Высокие технологии в машиностроении. Матер. Всероссийской науч.техн. интернет-конфер, посвящ. 100-летию засл. деят. н.и т. РФ Папшева Д.Д., Отв. ред. В.Н. Трусов. – Самара: Сам.ГТУ, 2015, - с.28 – 29.
13. Lobanov, D.V. Arkhipov P.V., Yanyushkin A.S., Skeebe V.Yu. The research into the effect of conditions of combined electric powered diamond processing on cutting power / Key Engineering Materials 736 (2017), pp 81-85
14. D V Lobanov, P. V. Arhipov, A S Yanyushkin and V Yu Skeebe. Physical-chemical processes of diamond grinding / IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 87 (2017) 082029
15. Салова, Д.П. Моделирование профиля рабочей поверхности шлифовального круга с использованием принципов естественной прирабатываемости: Дис... канд. техн. наук: 05.03.01 / Самарский гос. техн. ун-т, Чувашский гос. ун-т. – Самара. 2007. - 231 с.
- 16.

АВТОРЫ

Аврелькин Владимир Александрович – министр промышленности и экономики Чувашской республики, д.т.н, профессор кафедры прикладной механики и графики Чувашского государственного университета, Россия, Чебоксары

Шалунов Евгений Петрович - к.т.н., профессор кафедры технологии машиностроения Чувашского государственного университета, Россия, Чебоксары

Илларионов Илья Егорович - д.т.н. проф., зав. кафедрой материаловедения и металлургических процессов Чувашского государственного университета, Россия, Чебоксары

Воронцов Юрий Иванович – доцент кафедры технологии машиностроения Чувашского государственного университета, Россия, Чебоксары

Григорьев Владимир Станиславович – доцент кафедры технологии машиностроения Чувашского государственного университета, Россия, Чебоксары

Никитин Денис Сергеевич – магистрант Чувашского государственного университета, Россия, Чебоксары

Салов Пётр Михайлович – д.т.н., проф., профессор кафедры технологии машиностроения Чувашского государственного университета. Россия, Чебоксары

Купцов Максим Владимирович – старший преподаватель кафедры технологии машиностроения, Россия, Чебоксары

THE AUTHORS

Avrelkin Vladimir Alexandrovich - Minister of Industry and Economics of the Chuvash Republic, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Applied Mechanics and Graphics of the Chuvash State University, Russia, Cheboksary

Shalunov Evgeny Petrovich - Ph.D., Professor, Department of Mechanical Engineering Technology, Chuvash State University, Russia, Cheboksary

Plarionov Ilya Egorovich - Doctor of Technical Sciences Prof., head. Chair of Materials Science and Metallurgical Processes, Chuvash State University, Russia, Cheboksary

Vorontsov Yuri Ivanovich - Associate Professor, Department of Mechanical Engineering Technology, Chuvash State University, Russia, Cheboksary

Grigoriev Vladimir Stanislavovich - Associate Professor at the Department of Mechanical Engineering Technology, Chuvash State University, Russia, Cheboksary

Nikitin Denis Sergeevich - graduate student of Chuvash State University, Russia, Cheboksary

Salov Petr Mikhailovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, Chuvash State University. Russia, Cheboksary

Kuptsov Maxim Vladimirovich – senior lecturer department of mechanical engineering technology, Russia, Cheboksary

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СВОЙСТВ И ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ
ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ
МАШИНОСТРОЕНИЯ**

**IMPROVEMENT OF THE PROPERTIES AND TECHNOLOGY OF
OBTAINING EPOXY COMPOSITE MATERIALS FOR ENGINEERING**

**ХАСАНОВА А.Р., ГАЛИМОВ Э. Р., ГОТЛИБ Е. М., ШАРАФУТДИНОВА
Э.Э.**

(КНИТУ-КАИ, г. Казань, Россия)

**KHASANOVA A.R., GALIMOV E.R., GOTLIB E.M.,
SHARAFUTDINOVA E.E.**

(KNITU-KAI, Kazan, Russia)

***Аннотация.** Изучено влияние структуры аминного отвердителя, а также типа поверхностно-активных веществ, которые применялись для активации поверхности минерального наполнителя на износостойкость, твердость и коэффициент статического трения эпоксиполимеров.*

***Annotation.** The influence of the amine hardener structure and the type of surfactants used to activate the surface of the mineral filler on the wear resistance, hardness, and static friction coefficient of epoxy polymers was studied.*

***Ключевые слова:** Эпоксидные полимеры, аминные отвердители, волластонит, наполнитель, модификация.*

***Keywords:** Epoxy polymers, amine hardeners, wollastonite surfactants, modification.*

Введение

К антифрикционным эпоксидным материалам для машиностроения предъявляются следующие требования: низкий коэффициент трения, отсутствие в составе дорогих компонентов, способность быстро прирабатываться и иметь низкий износ, высокая тепло-, водостойкость, не токсичность и безопасность в пожарном отношении, высокая прочность и твердость [1].

Исходя из этого, в их рецептуре перспективно применять в качестве наполнителя волластонит, обладающий целым рядом ценных свойств, а именно: низкими значениями коэффициента водопоглощения, диэлектрической постоянной, вязкости, высокими износо- и термостойкостью. Это обусловлено его микроармирующими свойствами, за счет игольчатой формы частиц [2]. Кроме того, волластонит имеет высокую твердость, низкую токсичность и не высокую стоимость. Его успешно используют в рецептуре антифрикционных эпоксидных материалов [3].

Для увеличения эффективности взаимодействия на межфазной границе полимер-наполнитель традиционным является использование поверхностно-активных веществ (ПАВ) для активации поверхности минеральных твердых добавок [4]. Обработка наполнителей ПАВ значительно улучшает их диспергирование в полимерной матрице и повышает степень совместимости компонентов.

Одними из распространенных видов ПАВ, применяемых для активации поверхности минеральных наполнителей, в том числе и волластонита, являются органосиланы [5].

Большой интерес в качестве катионных ПАВ для модификации поверхности волластонита представляют четвертичные аммонийные соли [6]. Соли четвертичных аммониевых оснований с углеводородными радикалами C12—C18 отличаются высокой поверхностной активностью как в кислой, так и в щелочной средах, а также хорошей совместимостью с веществами разной природы [7,8].

Экспериментальная часть

Антифрикционные материалы получали на основе диановой эпоксидной смолы ЭД-20 (ГОСТ 10587-84). В качестве сшивающих агентов использовались для холодного отверждения аминоалкилфенол (АФ-2) (ТУ 2494-052-00205423-2004) и горячего - гексаметилендиамин ГМДА (ТУ 6-09-36-73).

Как наполнитель использовался природный волластонит марки Миволл 10-97-метасиликат кальция (CaSiO₃) (ТУ 577-006-40705684-2003).

Дозировка отвердителя определялась, исходя из эквимолярного соотношения эпоксидных и аминных групп.

В качестве ПАВ применялись четвертичные аммонийные соли (ЧАС) (ТУ 2482-004-04706205-2005 с изм. №1-5), производства ООО Научно-производственного объединения «НИИПАВ» г. Волгодонск: алкилтриметиламмоний хлорид 50% раствор в изопропиноле с различной длиной алкильного радикала: АЛКАПАВ 1214С.50 (алкил 12-14), АЛКАПАВ 1618С.50 (алкил 16-18) и цетилтриметиламмоний хлорид 50% раствор в изопропиноле АЛКАПАВ 16С.50.

Для определения износостойкости эпоксидной композиции использовалась установка для испытания материалов на истирание [9]. В качестве контртела использовали бруски из инструментальной стали ХВГ, закаленной до твердости НРС 60-64. Были приняты следующие режимы испытания: удельное давление контртела на испытываемую поверхность образца $P = 1$ МПа, скорость скольжения $V_{ск} = 1$ м/сек, без смазки. Износостойкость образцов из эпоксидной композиции измерялась на вертикальном оптиметре ИЗВ-1 с точностью $\pm 0,001$ мм.

Антифрикционные свойства определялись на автоматизированной машине трения «Tribometer, CSM Instruments» (Швейцария), управляемой компьютером, по стандартной схеме испытания «шарик-диск» (ASTM G99-959, DIN50324 и ISO 20808). Линейная скорость при испытании составляла 8,94 см/с, частота выборки – 10 Гц, температура - 25°C, влажность – 20%.

Твердость определялась по методу Барколя в модификации "ТПБа" путем внедрения на образец твердосплавного стержня с углом 26° при вершине и минимальным диаметром 0,157 мм (ГОСТ 9013-59, ASTM B648-2000, ASTM D-2583). Суть метода заключается в определении глубины вдавливания стальной иглы в исследуемую поверхность под действием пружины и сравнение ее с твердостью стандартной плиты.

Обсуждение результатов

Срок службы антифрикционных эпоксидных материалов в узлах трения существенно зависит от износостойкости связующего, на которую влияют как тип отвердителя, так и содержание, и активность наполнителя.

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что изнашивание эпоксидных композитов с волластонитом существенно уменьшается в результате обработки этого наполнителя исследованными ПАВ (табл.1, рис 1 и 2). При этом работоспособность антифрикционных эпоксидных материалов определяется структурой ЧАС, в частности количеством углеродных атомов в их основной цепи. Наблюдается четкая закономерность, что с ростом длины алкильного радикала ПАВ износ наполненных активированным волластонитом эпоксидных материалов закономерно уменьшается.

Таблица 1

Износостойкость эпоксидных материалов

Отвердитель	Тип ПАВ	Износ, $\times 10^{-6}$, м
АФ-2	без наполнителя	19
	не активированный волластонит	12
	АЛКАПАВ1214С.50	16
	АЛКАПАВ1618С.50	11
	АЛКАПАВ16С.50	13
ГМДА	без наполнителя	27
	не активированный волластонит	15
	АЛКАПАВ1214С.50	12
	АЛКАПАВ1618С.50	9
	АЛКАПАВ16С.50	13

Примечание: содержание волластонита составляет 10 мас.ч на 100 мас.ч ЭД-20

Этот эффект наблюдается при отверждении обоими типами исследованных аминов. При этом износостойкость материалов существенно ниже при отверждении ГМДА. Это может быть связано с более низкой прочностью отверждаемых им эпоксидных композиций, вследствие введения этого отвердителя в растворе пластификатора ЭДОС.

Из литературных данных известно, что пластификаторы увеличивают износ эпоксидных материалов [10-12]. Кроме того, интересно отметить, что степень снижения износа при использовании активированного волластонита значительно больше при применении в качестве сшивающего агента гексаметилендиамина. Так при использовании АЛКАПАВ 1618С.50 износ эпоксидных материалов с ГМДА уменьшается в три раза (рис.2) [13-15].

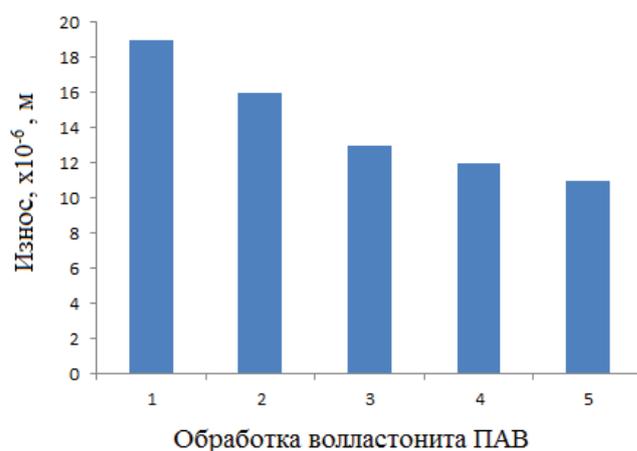


Рис. 1. Зависимость изностойкости эпоксидных материалов, отвержденных АФ-2, от структуры используемых для обработки волластонита ПАВ: 1 – без наполнителя; 2-волластонит (АЛКАПАВ1214С.50); 3 – волластонит (АЛКАПАВ1618С.50); 4 – волластонит (АЛКАПАВ16С.50); 5 –волластонит.

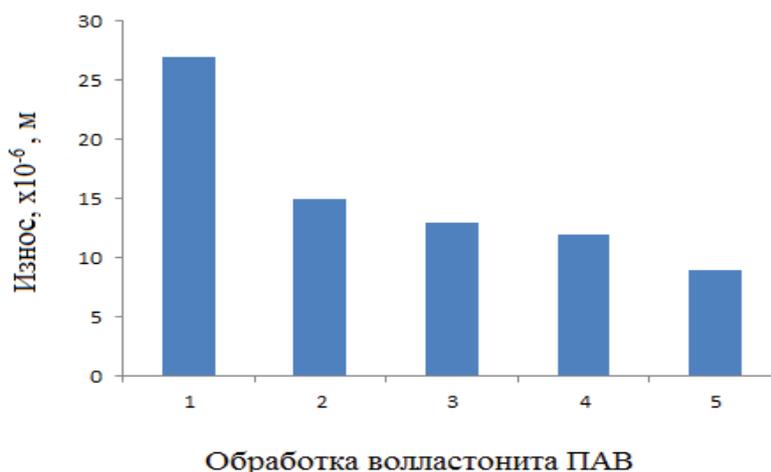


Рис. 2. Зависимость изностойкости эпоксидных материалов, отвержденных, ГМДА, от структуры используемых для обработки волластонита ПАВ: 1 – без наполнителя; 2 - волластонит (АЛКАПАВ1214С.50); 3 – волластонит (АЛКАПАВ1618С.50); 4 – волластонит (АЛКАПАВ16С.50); 5 – волластонит.

В то же время, активация поверхности волластонита ЧАС не оказывает положительного влияния на коэффициент статического трения этих эпоксидных композиций (рис.3, рис.4), независимо от длины алкильного радикала используемых ПАВ. Наоборот, коэффициент статического трения при обработке поверхности волластонита исследованными ЧАС увеличивается.

В то же время, при применении в качестве отвердителя амина фенола АФ-2 активация поверхности волластонита АЛКАПАВ 1618С.50 и АЛКАПАВ 16С.50 почти вдвое снижает этот важный показатель качества антифрикционных материалов.

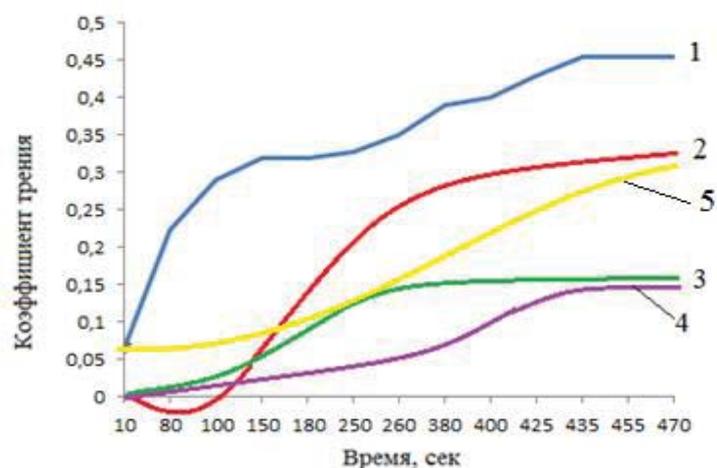


Рис. 3. Зависимость коэффициента статического трения от времени формирования контакта с эпоксиполимером, отвержденным АФ-2, и наполненным 10 масс.ч волластонита:

1 – без наполнителя; 2-волластонит (АЛКАПАВ1214С.50);
3 – волластонит (АЛКАПАВ1618С.50); 4 – волластонит (АЛКАПАВ16С.50); 5 –волластонит.

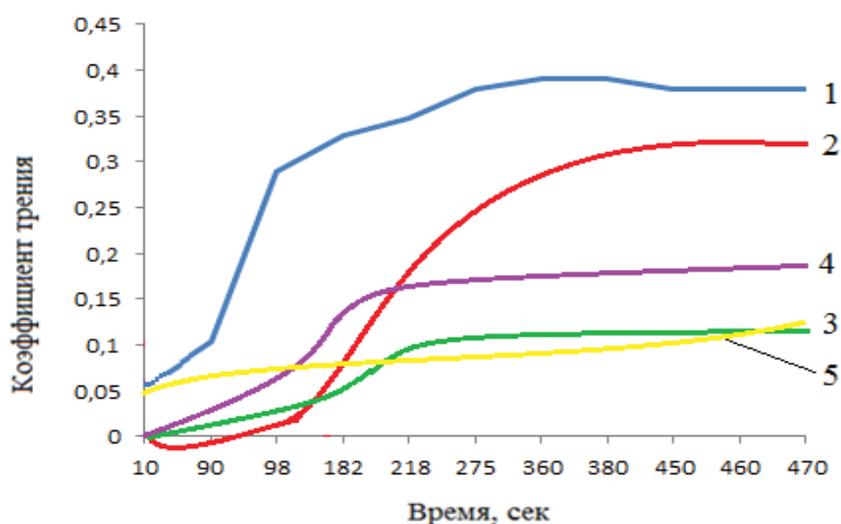


Рис. 4. Зависимость коэффициента статического трения от времени формирования контакта с эпоксиполимером: отвержденным ГМДА, и наполненным 10 масс.ч волластонита:

1 – без наполнителя; 2-волластонит (АЛКАПАВ1214С.50);
3 – волластонит (АЛКАПАВ1618С.50); 4 – волластонит (АЛКАПАВ16С.50); 5 –волластонит.

Обработка волластонита ЧАС увеличивает твердость наполненных им эпоксидных композиций, по сравнению с использованием в рецептуре природного метилсиликата кальция. Этот эффект наблюдается при отверждении как ГМДА, так и АФ-2 (табл. 2). Причем, он существенно выше при применении гексаметилендиамин. Наибольший рост твердости, независимо от структуры аминного сшивающего агента, имеет место при использовании АЛКАПАВ 16С.50.

Твердость эпоксидных материалов, наполненных 10 мас.ч. волластонита

Отвердитель	Тип ПАВ	Твердость, НВа
АФ-2	без наполнителя	30,8
	не активированный волластонит	41,4
	АЛКАПАВ1214С.50	43
	АЛКАПАВ1618С.50	44
	АЛКАПАВ16С.50	45,6
ГМДА	без наполнителя	9,8
	не активированный волластонит	17,2
	АЛКАПАВ1214С.50	24,2
	АЛКАПАВ1618С.50	18,6
	АЛКАПАВ16С.50	32,6

ВЫВОД

Активация поверхности природного волластонита ПАВ класса четвертичных аммонийных солей обуславливает улучшение ряда эксплуатационных характеристик наполненных им эпоксидных материалов. Так, растет твердость композиций, увеличивается их износостойкость, а при отверждении АФ-2 снижается также коэффициент статического трения. Можно предположить, что ЧАС действуют как катализаторы отверждения эпоксидных материалов. Уменьшение износа и возрастание твердости, по-видимому, связано с увеличением степени сшивки композиций, а длина цепи ЧАС, возможно, влияет на расстояние между узлами сетки. Большой эффект исследованного класса ПАВ при отверждении ГМДА обусловлен, на наш взгляд, большей активностью ЧАС при повышенных температурах.

При этом более перспективно использование алкилтриметиламоний хлорида с более длинным алкильным радикалом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колесников В.И., Мигаль Ю.Ф., Мясников Н.А., Колесников В.И. Антифрикционные композиционные полимерные материалы для узлов трения // Вестн. Юж. науч. центра. 2004. №1. С. 13-16.
2. Тюльнин В.А., Ткач В.Р., Эйрих В.И. Волластонит – уникальное минеральное сырье многоцелевого назначения. М.: Руда и металлы, 2003. 144 с.
3. Антипова Е.А., Короткова Н.П., Лебедев В.С. Современные полиуретановые, эпоксидные, ПУ-акрилатные и эпоксиакрилатные связующие для промышленных ЛКМ производства ООО «НПП «МАКРОМЕР» //Лакокрасочные материалы и их применение. 2012. №9. С. 14-19.
4. Полимерная фрикционная композиция (варианты): пат. 2090578 Рос. Федерации. № 93034917/04; заявл. 05.07.1993; опубл. 20.09.1997, Бюл. N 23 (II ч.). 6 с.
5. Бондалетова Л.И., Бондалетов В.Г. Полимерные композиционные материалы: учеб. пособие. М.: Издательство Томского политехнического университета, 2013. 114 с.
6. Сагитова Г.Ф., Даулетбаева И., Шегебаева А. Применение поверхностно-активных веществ (ПАВ) из отходов для активации минеральных наполнителей: учеб. пособие. М.: Издательство Южно-Казахстанского государственного университета им. М. Ауезова, 2007. 69 с.
7. Ланге К.Р. Поверхностно-активные вещества: синтез, свойства, анализ, применение. М.: Профессия. СПб, 2007. 240 с.

8. Ильичева Е.С. Резины на основе каучуков общего назначения, наполненных волластонитом: автореф. дис. канд. тех. наук, Казань, 2014. 23 с.
9. Бутенко В.И. Исследование качества поверхностного слоя обрабатываемой стали //Известия ВУЗ. Машиностроение. 1979. №4. С. 101-104.
10. Шкуракова О.Э. Разработка составов, изучение структуры и свойств антифрикционных композитов с добавками модифицированного лигнина: автореф. дис. канд. тех. наук, Новочеркасск, 2012. 38 с.
11. Тюльнин, В.А. Волластонит – уникальное минеральное сырье многоцелевого назначения / В.А. Тюльнин, В.Р. Ткач, В.И. Эйрих, Н.П. Стародубцев. – М.: Издательский дом «Руда и металлы», 2003. - 144 с.
12. Готлиб, Е.М. Эпоксидные клеи, модифицированные циклокарбонатами / Е.М. Готлиб, Д.Г. Милославский, К.А. Медведева, Е.Н. Черезова, А.Р. Хасанова // Вестник Казанского технологического университета. - 2015. Т.18, №21, с.74-76.
13. Готлиб, Е.М. Антифрикционные эпоксидные материалы, наполненные активированным волластонитом / Э.Р. Галимов, А.Р. Хасанова, Е.С. Ямалеева // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета, т.19, №3, 2017, с.7-10.
14. Липатов, Ю. С. Межфазные явления в полимерах / Ю. С. Липатов – Наукова Думка, Киев, 1980. – 260 с.
15. Готлиб, Е.М. Пластификация полярных каучуков, линейных и сетчатых полимеров / Е.М. Готлиб //Монография, Казань, КГТУ. - 2008, 286 с.

АВТОРЫ

Хасанова Альмира Рамазановна (Казань, Россия) – аспирант кафедры материаловедения, сварки и производственной безопасности КНИТУ-КАИ.

Галимов Энгель Рафикович (Казань, Россия) - доктор технических наук, профессор, академик РЭА, заведующий кафедрой материаловедения, сварки и производственной безопасности КНИТУ-КАИ.

Готлиб Елена Михайловна (Казань, Россия) - доктор технических наук, профессор кафедры технологий синтетического каучука КНИТУ.

Шарафутдинова Эльмира Энгелевна (Казань, Россия) – кандидат психологических наук, доцент кафедры экономической теории и управления ресурсами КНИТУ-КАИ.

ABOUT THE AUTHORS

Gotlib Elena Mikhailovna (Kazan, Russia) - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Synthetic Rubber Technologies, KNITU.

Galimov Engel Rafikovich (Kazan, Russia) - Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of REA, Head of the Department of Materials Science, Welding and Production Safety, KNITU-KAI.

Khasanova Almira Ramazanovna (Kazan, Russia) - postgraduate student of the Department of Materials Science, Welding and Production Safety, KNITU-KAI.

Sharafutdinova Elmira Engeljovna (Kazan, Russia) - Candidate of Psychological Sciences, Associate Professor, Chair of Economic Theory and Resource Management, KNITU-KAI.

**К ВОПРОСУ О ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ
С ЗАДАНЫМ РЕСУРСОМ**

**TO THE QUESTION OF MANUFACTURING ENGINEERING PRODUCTS
WITH THE TARGET LIFE**

КОСТЕНКО А.В.

(КамчатГТУ, Петропавловск-Камчатский, Россия)

KOSTENKO A.V.

(KamchatSTU, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia)

Аннотация. В работе приведена система выражений, описывающая модель технологических преобразований. Модель позволяет решить задачу производства агрегатов с заданным ресурсом.

Annotation. The paper presents a system of equations describing the model of technological transformations. The model allows to solve the problem of production of aggregates with a target life.

Ключевые слова: технологическое преобразование, модель, заданный ресурс, множество параметров.

Keywords: technological transformation, model, target life, set of parameters.

В работе [1] представлена модель технологических преобразований, позволяющая реализовывать общий подход при производстве деталей какого-либо агрегата (рис.).

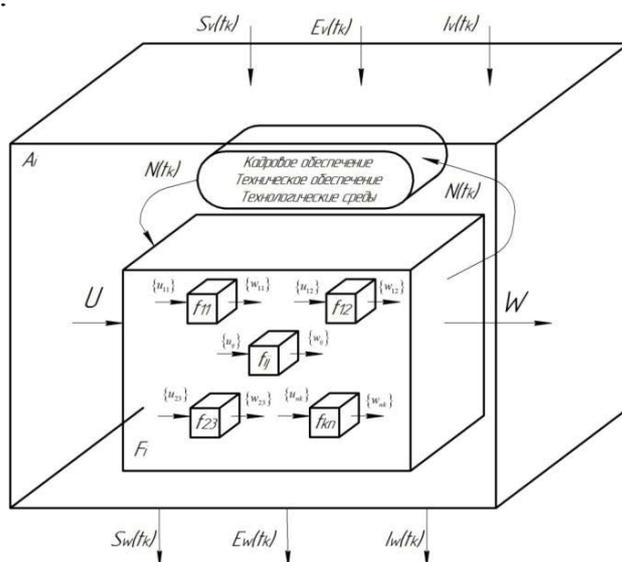


Рис. Модель технологических преобразований

Преобразование свойств заготовки в эксплуатационные свойства детали происходит при помощи технологических воздействий. В каждой ячейке системы происходит преобразования исходных свойств в показатели качества [2].

Ячейка соответствует определенному функциональному элементу в зависимости от глубины технологии [3]: всего изделия в целом, частей изделия, составляющих частей изделия, зон, макрозон, микрозон, нанозон.

Производство связано с решением ряда оптимизационных задач [4,5]:

- 1) на стадии проектирования увязать требования производства и эксплуатации;
- 2) на стадии производства стоит задача снижения затрат материалов и энергии и одновременно обеспечить требуемое качество изделия;
- 3) на стадии эксплуатации необходима минимизация эксплуатационных расходов и установление оптимального срока эксплуатации с обеспечением необходимого уровня надежности.

Подавляющее количество научных работ и исследований по технологии машиностроения, которые отражены в кандидатских и докторских диссертациях, направлены на повышение надежности, долговечности и т.п.

Подобный подход, обеспечивая решения поставленных задач, приводит к неоправданному завышению ресурса деталей и агрегатов [6], что отражается на увеличении затрат энергии и материалов в целом, если учитывать жизненный цикл изделия [7,8], а также к недоиспользованию ресурса деталей.

В условиях рыночной экономики большое значение имеют возможности потребителя. Рыболовные компании, которые решая непосредственные задачи по вылову рыбы, занимаются техническим обслуживанием и ремонтом судов, применяя при этом стратегию ремонта [9] по наработке, когда изделия, в том числе и судовые дизели, эксплуатируются определенный срок, затем происходит либо замена агрегата, либо капитальный ремонт. Потребитель приобретает изделие и эксплуатирует его тот срок, который нужен, затем выполняется профилактическое обслуживание и ремонт (не используется ресурс) или производит замену.

Эксплуатационное качество характеризуется такими свойствами двигателей, с помощью которых потребитель производит такое количество продукции (вылов рыбы), которое позволит ему не интересоваться дальнейшим состоянием дизеля в случае возникших неисправностей, т. к. он будет иметь возможность [10]: приобрести новый двигатель, обменять отработавший дизель на новый или оплатить ремонт в межсезонный период.

Технология машиностроения наряду с решением фундаментальных проблем, связанных с поиском новых технологий, способов и методов обработки и их совершенствования, должны решать прикладные задачи, направленные на удовлетворение потребности потребителей машиностроительной продукции.

Одной из таких задач является создание агрегатов с заданным ресурсом, что предполагает равнопрочность элементов, входящих в техническую систему (судовой дизель). Сложность заключается в том, что судовой дизель состоит из большого количества деталей, изготовленных из различных материалов и работающих в различных условиях [11].

Очевидно, что условия эксплуатации предъявляют требования к качеству деталей, а технологические воздействия, соответственно, реализуют в деталях требуемые параметры качества. Поэтому необходим сбор информации о

неисправностях, дефектах, условиях эксплуатации, выходов из строя и т.д. прочее. К сожалению, в настоящее время такая работа зачастую не ведется: крупные компании выполняют профилактическое обслуживание и ремонт, снижая вероятность поломки, и имеют возможность замены агрегата или деталей в случае поломки; более мелким компаниям не хватает финансовых средств, чтобы вести подобную работу.

С точки зрения теории надежности, свойства материалов и поведение механических объектов при эксплуатации являются случайными процессами. Однако, оговорив условия эксплуатации, создавая заданные свойства объекта, можно сформулировать условия нахождения случайного вектора, характеризующего свойства объекта в заданной области пространства эксплуатационных режимов [12,13]. При этом отказы и предельные состояния будут ограничивать эту область.

Представим требования потребителя к изделию в виде вектора X :

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_N), \quad (1)$$

где x_i – количественные и качественные характеристики.

Условия эксплуатации, определяющие необходимые эксплуатационные свойства можно представить в виде вектора Y :

$$Y = (y_1, y_2, \dots, y_K), \quad (2)$$

где y_i – параметры, характеризующие эксплуатационные режимы.

Векторы X и Y при помощи логической операции конъюнкции образуют множество G , характеризующее весь набор требований к изделию:

$$G = Y \wedge X. \quad (3)$$

С другой стороны существует множество L , содержащие все значения параметров, характеризующих режимы эксплуатации изделия. Выделим в этом множестве подмножество V , содержащие только те режимы, которые могут возникнуть при эксплуатации изделия:

$$V \subset L. \quad (4)$$

В пространстве параметров подмножество V ограничено предельными состояниями и для нормальной работы изделия необходимо «удерживать» вектор состояний технического объекта в этой области.

Тогда, в завершение, можем записать систему выражений, характеризующую модель технологических преобразований, представленную на рис. 1:

$$\begin{cases} \varphi: G \rightarrow V; \\ O_0(t_i) = \{(s_{iv}, e_{iv}, i_{iv}) | s_{iv} \in S_w(t_i) \wedge e_{iv} \in E_w(t_i) \wedge i_{iv} \in I_w(t_i)\}. \end{cases} \quad (5)$$

Первое выражение системы (5) показывает отображение требований по параметрам качества к изделию машиностроения в соответствующую область эксплуатационных свойств. Второе выражение системы (5) описывает любое технологическое воздействие на заготовку [14,15]. Для этого следует в соответствии со способом обработки задать соответствующий кортеж $(s_i, e_i$ и $i_i)$, элементы которого будут соответствовать режиму обработки $(S_w(t_i), E_w(t_i)$ и $I_w(t_i)$ – множества элементов технологического воздействия материального, энергетического и информационного характера в момент времени t_i).

ЛИТЕРАТУРА

1. Костенко А.В. Общий подход при проектировании технологий изготовления деталей судовых агрегатов / А.В. Костенко А.Н. Михайлов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2018. – №1 (60). – С. 44-49.
2. Михайлов А.Н. Основы проектирования и автоматизации производственных процессов на базе технологий непрерывного действия / А.Н. Михайлов. – Донецк : ДонНТУ, 2006. – 421 с.
3. Михайлов А.Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения / А.Н. Михайлов. – Донецк : ДонНТУ, 2009. – 346 с.
4. Петрушин С.И. Принципы оптимизации жизненного цикла изделий машиностроения / С.И. Петрушин, Р.Х. Губайдулина // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321, № 6. – С. 96-100.
5. Губайдулина Р.Х. Выбор оптимального срока эксплуатации изделий машиностроения / Р.Х. Губайдулина, С.И. Петрушин, А.В. Лихолат // Наука и Мир. – 2015. – Т. 1, № 9 (25). – С. 37-39.
6. Пахомова Н.В. Оценка ресурса сопряжения «цилиндрическая втулка- поршневое кольцо» судовых малоразмерных дизелей / Н.В. Пахомова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2013. – т. 15, №6 (2). – С. 448-452.
7. Суслов А.Г. Научные основы технологии машиностроения / А.Г. Суслов, А.М. Дальский. – М.: Машиностроение, 2002. – 684 с.
8. Говоров И.В. Организационное обеспечение рациональной долговечности деталей машин на этапах жизненного цикла / И.В. Говоров // Вестник ОрелГАУ. – 2010. – № 1 (22). – С. 2-5.
9. Кокорев Г.Д. Стратегии технического обслуживания и ремонта автомобильного транспорта / Г.Д. Кокорев, И.А. Успенский, И.Н. Николотов // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ. – 2009. – № 3. – С. 72-75.
10. Дорохов А.Ф. Качество и надежность судовых дизелей / А.Ф. Дорохов // Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технологии. – 2015. – №2. – С. 48-53.
11. Костенко А.В. Общий подход при проектировании технологий изготовления деталей судовых агрегатов / А.В. Костенко А.Н. Михайлов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2018. – №1 (60). – С. 44-49.
12. Судов Е.В. Менеджмент качества, управление конфигурацией и интегрированная логистическая поддержка – взаимосвязь управленческих технологий / Е.В. Судов, А.И. Левин [Электронный ресурс]. – URL: http://cals.ru/sites/default/files/downloads/conf/conf-11-niccals_sudov_levin.pdf (дата обращения 25.08.2018).
13. Надежность машин. Т.IV-3 / В.В. Ключев, В.В. Болотин, Ф.Р. Соснин и др.; под общ. ред. В.В. Ключева. – М.: Машиностроение, 2003. – 592 с.
14. Михайлов А.Н. Структура функционально-ориентированного процесса / А.Н. Михайлов, А.В. Костенко // Механики XXI века. – 2018. – №17. – С. 206-210.
15. Михайлов А.Н. Основы синтеза поточно-пространственных технологических систем непрерывного действия. – Донецк: ДонНТУ, 2002. – 379 с.

АВТОР

Костенко Андрей Викторович, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Технологические машины и оборудование», Камчатский государственный технический университет.

AUTHOR

Kostenko Andrei Viktorovich, candidate of technical Sciences, associate professor, Head of the department «Technological machines and equipment», Kamchatka State Technical University.

РАЗРАБОТКА ПОЛЯРИЗОВАННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО РЕЛЕ НА ОСНОВЕ РЕСУРСΟΣБЕРЕГАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ

DEVELOPMENT OF A POLARIZED ELECTROMAGNETIC RELAY BASED ON RESOURCE-SAVING TECHNOLOGY

АНДРИАНОВ Б.А., ТИМОФЕЕВ И.А., ШУМИЛОВ В.Ф.

(Чувашский государственный педагогический университет им. И. Я. Яковлева)

ANDRIANOV V. A., TIMOFEEV, I. A., SHUMILOV V. F.

(Chuvash state pedagogical University. I. Ya. Yakovlev)

Аннотация. Показан новый подход к созданию поляризованных реле на основе Наноструктурных материалов. Приближенный скоростной расчет позволил изготовить и исследовать серийное гибридное реле с соударяющимися якорями, что позволило в каждом из взаимодействующих 2-х реле исключить по одной обмотке. Технический результат: экономия меди, уменьшение габаритов, массы, трудозатрат, обеспечение перекрытия включающих и размыкающих контактов.

Abstract. A new approach to the creation of polarized relays based on nanostructured materials is shown. An approximate speed calculation made it possible to manufacture and investigate a serial hybrid relay with colliding anchors, which made it possible to exclude one winding in each of the interacting 2 relays. **EFFECT:** saving of copper, reduction of dimensions, mass, labor costs, ensuring overlapping of the making and breaking contacts.

Ключевые слова: поляризованное реле, реле с соударяющимися якорями, наноматериалы, экономия, перекрытие контактов.

Keywords: polarized relay, relay with colliding anchors, nanomaterials, saving, contact overlapping.

Поляризованный электромагнит, входящий в состав реле, это сложное устройство по сравнению с промежуточным электромагнитом, представляет собой комплексную магнитную систему, в которой кроме основного магнитного потока, создаваемого катушкой, действует поляризующий магнитный поток, который создается установленным в нем постоянным магнитом. Процесс намагничивания такой гибридной магнитной системы значительно усложняется с одной стороны особенностью намагничивания магнитной цепью с переменной магнитной проницаемостью, а с другой вовлечением в функционирование электромагнита постоянного магнитного потока от магнитно-твердого материала.[2,3,4,6]

Для упрощения расчета гибридной магнитной системы сопротивлением ферромагнитных участков можно пренебречь. Практика проектирования

электрических аппаратов показала, что такое допущение вполне уместно, т.к. не оказывает решающего влияния на расчет электромагнитов.

Для расчета такого сложного электромагнитного механизма, как правило, используют эквивалентные электрические схемы замещения магнитной цепи, при построении которых берут за основу геометрические размеры электромагнита, магнитный поток, намагничивающую силу, а также магнитное сопротивление. Однако во многих случаях удобнее участок магнитной цепи характеризовать не активным сопротивлением, а индуктивным сопротивлением.

Такой упрощенный расчет поляризованного электромагнита вполне допустимых пределах позволяет быстро рассчитать развиваемое усилие и скорость передвижения якоря поляризованного электромагнита и прикинуть в первом приближении габариты электромагнита.

Таким образом, было создано изобретение электромагнитного реле с ударяющимися якорями. Целью исследования было уменьшение габаритов электромагнита и расширение функциональных возможностей реле.

Эти технические результаты достигнуты на усовершенствованном серийном реле РЭПЗЗ (выпускает ВНИИР).

Целью исследования являлось усовершенствование серийного реле с улучшением конструкции и технологии изготовления с экономией дефицитной обмоточной меди, снижение конструктивной массы магнитомягкого и твердого материала магнитопровода и уменьшение габаритов поляризованного электромагнитного реле в целом.

Указанная цель достигается тем, что две П-образные магнитные системы имеющиеся в серийном реле РЭПЗЗ) с включающими обмотками и с якорями, фиксирующимися в замкнутом положении контактов на магнитопроводящих упорах, установлены на общем основании так, что они имеют один общий упор и на нем установлена свободно скользящая в противоположных направлениях пластина и выступающая за пределы упора на 0,2–0,3 мм. Отключающая контакты обмотка в обоих электромагнитах отсутствует. Для перехода любого якоря в замкнутое на электромагнит состояние и размыкания в связи с этим контактов, необходимое усилие обеспечивается через скользящую пластину кинетической энергией (ударом) другого якоря, замыкающего контакты. Так как трогание с места размыкающего контакта якоря начинается в конце срабатывания замыкающего контакты якоря после удара по якорю скользящей пластиной, то происходит задержка размыкания контактов. Согласно вышесказанному, таким образом обеспечивается перекрытие контактов и оно равняется примерно 1,5–1,7 величин провалов, и зависит от конкретного изделия. Видоизменение и разнообразие порядка замыкания и размыкания или размыкания и замыкания или другого алгоритма получается путем расположения на противоположных траверсах «замыкающих-размыкающих», «замыкающих-замыкающих», «размыкающих-размыкающих», «размыкающих-замыкающих» контактов.

По предложенному изобретению изготовлены макетные образцы. Испытание образцов показало время перекрытия между контактами в пределах 1,6–2 мс.

Исключение одной обмотки в предложенной магнитной системе обеспечивает экономию меди в 2 раза, уменьшение габаритов примерно в 1,5–1,7 раза, массы в 1,4 раза и уменьшает трудозатраты.

Техническим результатом данного изобретения является экономия меди, уменьшение массы габаритов и трудоемкости изготовления и обеспечение перекрытия включающих и размыкающих контактов, расположенных на противоположных траверсах по заданному алгоритму.

ЛИТЕРАТУРА

1. Левинский Ю. В. Теоретические основы процессов спекания металлических порошков :учеб. пособие для вузов по направлению «Металлургия». – М.: Научный Мир, 2014. – 371 с.
2. Электрические аппараты :учебн. пособие для студ. учреждений сред. Проф. Образования / О.В. Девочкин, В.В. Лохнин, Р. В. Меркулов и др. – М.: Издательство центр «Академия», 2011,-240 с.
3. Электрические и электронные аппараты : учебник / под ред. Ю. К. Розанова. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 520 с.
4. Шоффа, В. М. Анализ полей магнитных систем электрических аппаратов / В.М. Шоффа. – М. : Изд-во МЭИ, 1994. – 315 с.
5. Апполонский, С.В. Надежность и эффективность электрических аппаратов : учебное пособие / С. М. Аполлонский, Ю. В. Куклев. – СПб. : Лань, 2011. – 448 с.
6. Чунихин, А. А. Электрические аппараты / А.А. Чунихин – М.: ООО «ИД Альянс», 2008. – 720с.

АВТОРЫ

Андрианов Бронислав Аристархович - 428000, Чувашская Республика, г. Чебоксары, ул. Пролетарская, 27-197 +7 919 668 88 69 iatimofeeff2011@yandex.ru
Тимофеев Игорь Александрович - 428023, Чувашская Республика, г. Чебоксары, ул. Максимова, 7-70 +7 987 739 94 50 iatimofeeff2011@yandex.ru
Шумилов Владиян Федорович - 428022, Чувашская Республика, г. Чебоксары, ул. Прибрежная, 40 +7 917 679 49 45 SVLadian@mail.ru

THE AUTHORS

Andrianov Bronislav Aristarkhovich - 428000, Chuvash Republic, Cheboksary, ul. Proletarskaya 27-197 +7 919 668 88 69 iatimofeeff2011@yandex.ru
Timofeev Igor Alexandrovich - 428023, Chuvash Republic, Cheboksary, ul. Maksimova, 7-70 +7 987 739 94 50 iatimofeeff2011@yandex.ru
Shumilov Vladiyan Fedorovich - 428022, Chuvash Republic, Cheboksary, ul. Coastal, 40 +7 917 679 49 45 SVLadian@mail.ru

**ПРОТИВОКОРРОЗИОННАЯ АМИДОБОРАТНАЯ ПРИСАДКА К
МОЮЩИМ СРЕДСТВАМ ДЛЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

**ANTIBORROSION AMIDOPORATE ADDITIVE TO
DETERGENT FOR MACHINE INDUSTRY**

¹ИЛЛАРИОНОВ И.Е., ¹САДЕТДИНОВ Ш.В., ²ГИЛЬМАНШИНА Т.Р.,
(¹ФГБОУ ВПО ЧГУим. И.Н.Ульянова, г.Чебоксары, Россия,
²ФГБОУ ВО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия)

¹ILLARIONES I.E., ¹SADETDINOV Sh.V., ²GILMANSHINA T.R.,
(¹ FGBOU VPO ChGUim. I.N. Ulyanova, Cheboksary, Russia,
² Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia)

Аннотация. Изучена система $H_3BO_3 - N_2H_4CO - H_2O$ при 25°C и установлено образование нового двойного соединения состава $2H_3BO_3 \cdot N_2H_4CO$ (диортобораткарбамид). С целью улучшения противокоррозионных свойств моющих средств исследовано влияние двойного соединения диортобораткарбамида ($2H_3BO_3 \cdot N_2H_4CO$) на коррозионную стойкость стали Ст. 10 в водных растворах МЛ-52, МС-8 и Лабомида-203. Показано, что диортобораткарбамид существенно снижает скорость коррозии и увеличивает коэффициент запаса циклической прочности стали в исследуемых средах.

На основе полученных данных сделан вывод о возможности применения синтетических моющих средств МЛ-52, МС-8 и Лабомида-203 с присадкой диортобораткарбамид в качестве новых эффективных моющих средств для очистки узлов и агрегатов автотранспортных средств от масляно-эмульсионных загрязнений и смазок.

Annotation. The $H_3BO_3 - N_2H_4CO - H_2O$ system was studied at 25 ° C and the formation of a new double compound of the composition $2H_3BO_3 \cdot N_2H_4CO$ (diorthoborate carbamide) was established. In order to improve the anticorrosive properties of detergents, the effect of the double compound of diorthoborate ($2H_3BO_3 \cdot N_2H_4CO$) on the corrosion resistance of steel Art. 10 in aqueous solutions of ML-52, MS-8 and Labomida-203. It has been shown that diorthoboratarbamide significantly reduces the corrosion rate and increases the safety factor of the cyclic strength of steel in the studied environments. Based on the data obtained, it was concluded that ML-52, MS-8 and Labomid-203 synthetic detergents can be used with diorthoborate carbamide additive as new effective detergents for cleaning motor vehicle components and assemblies from oil-emulsion contaminants and lubricants.

Ключевые слова: борная кислота, карбамид, диортобораткарбамид, синтетические моющие средства, МЛ-52, МС-8, Лабомида-203, коррозия, циклическая прочность, узлы и агрегаты автотранспортных средств.

Key words: boric acid, carbamide, diorthoborate, detergents, ML-52, MS-8, Labomida-203, corrosion, cyclic strength, components and assemblies of vehicles.

Во многих технологических процессах машиностроения, судостроения, автомобилестроения, а также в ремонтном производстве на предприятиях автотранспортного комплекса, для очистки металлической поверхности от масляно-эмульсионных загрязнений и смазок используются пожароопасные, токсичные органические растворители. Использование нефтепродуктов (бензина, керосина и др.) в качестве моющих средств является устаревшей технологией, приводящей к загрязнению окружающей среды и нерациональному использованию ресурсов. Более эффективно использовать для этих целей специальные моющие растворы [1,2].

Наибольшее распространение во всех процессах очистки получили такие синтетические моющие средства (СМС), как МЛ-52, МС-8 и Лабомид-203. Однако они вызывают коррозию изделий и поэтому к ним добавляют ингибиторы коррозии для снижения коррозионной активности [3-6].

В связи с недостаточностью эффективных ингибиторов коррозии металлов были исследованы противокоррозионные свойства амидоборатного соединения в составе синтетических моющих сред.

Новое амидоборатное соединение было получено в результате изучения системы борная кислота – карбамид – вода при 25°C методами физико-химического анализа, описанными в работах [7,8]. Полученные данные по растворимости и твердым фазам в системе $H_3BO_3 - N_2H_4CO - H_2O$ при 25°C приведены в таблице 1 и на рисунке 1.

Таблица 1

Данные по растворимости в системе $H_3BO_3 - N_2H_4CO - H_2O$ при 25°C

Состав жидкой фазы, мас. %		Твердый остаток, мас. %		Твердые фазы
H_3BO_3	N_2H_4CO	H_3BO_3	N_2H_4CO	
5,60	-	100	-	H_3BO_3
4,92	5,16	89,86	3,15	$mH_3BO_3 \cdot nN_2H_4CO$
4,08	11,23	68,03	10,90	$mH_3BO_3 \cdot nN_2H_4CO$
3,70	19,24	64,76	20,08	$mH_3BO_3 \cdot nN_2H_4CO$
3,08	25,22	62,06	28,14	$mH_3BO_3 \cdot nN_2H_4CO$
2,69	28,23	67,28	32,68	$2H_3BO_3 \cdot N_2H_4CO$
2,68	36,60	67,30	37,60	$2H_3BO_3 \cdot N_2H_4CO$
2,64	40,42	67,39	37,62	$2H_3BO_3 \cdot N_2H_4CO$
2,60	48,40	67,34	36,68	$2H_3BO_3 \cdot N_2H_4CO$
2,62	53,44	67,26	36,60	$2H_3BO_3 \cdot N_2H_4CO$
2,60	53,48	34,42	57,96	$N_2H_4CO + 2H_3BO_3 \cdot N_2H_4CO$
2,56	53,53	15,36	68,02	$N_2H_4CO + 2H_3BO_3 \cdot N_2H_4CO$
2,52	53,51	0,42	99,16	N_2H_4CO
-	54,80	-	100	N_2H_4CO

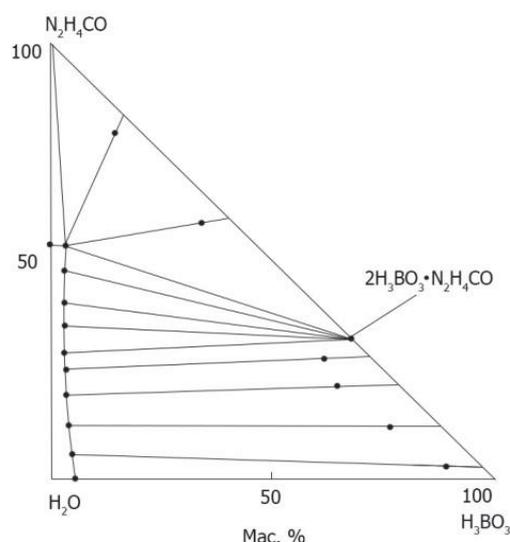


Рисунок 1 – Диаграмма растворимости системы $\text{H}_3\text{BO}_3 - \text{N}_2\text{H}_4\text{CO} - \text{H}_2\text{O}$ при 25°C

Диаграмма растворимости системы борная кислота – карбамид – вода при 25°C представлена двумя ветвями. Первая длинная ветвь изотермы растворимости, идущая со стороны мочевины отвечает кристаллизации фаз переменного состава. Лучи Скрейнемакера от этой ветви идут веерообразно. Образование твердых растворов связано с изоморфным увлечением мочевины борной кислотой. Вблизи эвтонической точки на диаграмме фиксируется участок кривой, отвечающий выделению двойного соединения состава $2\text{H}_3\text{BO}_3 \cdot \text{N}_2\text{H}_4\text{CO}$ (диортобораткарбамид). По характеру строения кристаллов твердые растворы приобретают тип кристаллической решетки в виде гексагональных призм. Двойное соединение содержит 67,28% H_3BO_3 и 32,68% $\text{N}_2\text{H}_4\text{CO}$. Для двойного соединения была определена в параксилоле и криоскопическом бензоле плотность, которая оказалась равной (в среднем) $1,628 \text{ г/см}^3$. Используя экспериментальную величину плотности для двойного соединения, были вычислены молекулярный и удельный объемы. Которые оказались равными: $V \text{ м.о.} = 112,79 \text{ см}^3/\text{моль}$ и $V \text{ у.о.} = 0,614 \text{ см}^3/\text{г}$, соответственно.

С целью улучшения противокоррозионных свойств моющих средств было исследовано влияние двойного соединения диортобораткарбамида ($2\text{H}_3\text{BO}_3 \cdot \text{N}_2\text{H}_4\text{CO}$) на коррозионную стойкость стали Ст. 10 в водных растворах МЛ-52, МС-8 и Лабомида-203.

Оптимальную концентрацию диортобораткарбамида в растворах СМС определяли по максимальному смещению потенциала активации стали Ст.10 в потенциостатическом режиме поляризации. Без внешней поляризации стационарный потенциал стали в 3%-ных растворах МЛ-52, Лабомида-203 и МС-8 со временем разблагораживается и через 30 минут принимает значения (-0,13В); (-0,11В); (-0,07В); соответственно.

Введение в растворы СМС диортобораткарбамида способствует облагораживанию потенциала стали и при концентрации $2\text{H}_3\text{BO}_3 \cdot \text{N}_2\text{H}_4\text{CO}$ 5 г/л его значение равно:

- в растворе МЛ-52 + $2\text{H}_3\text{BO}_3 \cdot \text{N}_2\text{H}_4\text{CO}$ – (-0,06В);
- в растворе Лабомид-203 + $2\text{H}_3\text{BO}_3 \cdot \text{N}_2\text{H}_4\text{CO}$ – (-0,04В);
- в растворе МС-8 + $2\text{H}_3\text{BO}_3 \cdot \text{N}_2\text{H}_4\text{CO}$ – (-0,02В).

Дальнейшее увеличение концентрации амидобората уже не оказывает существенного влияния на изменение стационарного потенциала исследуемого образца. В связи с этим последующие исследования скорости коррозии стали Ст.10 в растворах СМС проводили в присутствии диортобораткарбамида концентрации 0,5%.

Исследования скорости коррозии стали проводили по общепринятым методам исследования [9]. Для этого образцы стали Ст.10 погружали в 3%-ные водные растворы МЛ-52, МС-8 и Лабомид-203 и выдерживали в течении 10 часов при температуре 70-80°C, после чего их извлекали и оставляли на воздухе на 24 часа, что составляло один цикл испытаний. Испытания проводили в течение 5 циклов (120 часов). После каждого цикла 3 - 5 опытных образцов обрабатывали, взвешивали и вычисляли скорость коррозии согласно [10].

Коррозионные испытания показали (рис. 2), что скорость коррозии стали Ст.10 в растворе МЛ-52 после 24 и 120 ч. испытания составляла 0,068 г/(м²·ч) и 0,025 г/(м²·ч); в растворе Лабомид-203 – 0,060 г/(м²·ч) и 0,021 г/(м²·ч); в растворе МС-8 – 0,038 г/(м²·ч) и 0,008 г/(м²·ч) соответственно.

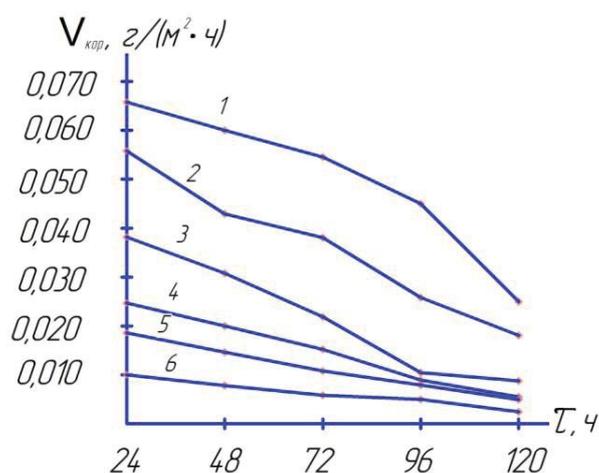


Рисунок 2 – Влияние диортобораткарбамида на скорость коррозии стали Ст.10:
 1 – 3%-ный раствор МЛ-52; 2 – 3%-ный раствор Лабомид-203;
 3 – 3%-ный раствор МС-8; 4 – 3%-ный раствор МЛ-52+5 г/л $2\text{H}_3\text{BO}_3 \cdot \text{N}_2\text{H}_4\text{CO}$;
 5 – 3%-ный раствор Лабомид-203+5 г/л $2\text{H}_3\text{BO}_3 \cdot \text{N}_2\text{H}_4\text{CO}$;
 6 – 3%-ный раствор МС-8+5 г/л $2\text{H}_3\text{BO}_3 \cdot \text{N}_2\text{H}_4\text{CO}$.

В присутствии диортобораткарбамида скорость коррозии стали в растворах изучаемых моющих средств понижалась (рис. 2). Степень защиты составляет от 82% до 90% и коэффициент торможения от 5 до 7 (после 120 часов испытания).

Методом снятия потенциодинамических поляризационных кривых проведено сравнительное изучение влияния диортобораткарбамида на коррозионно-электрохимическое поведение стали Ст.10 в СМС. Средства МЛ-52, МС-8 и Лабомид-203, содержащие 5 г/л диортобораткарбамида, характеризуются большей ингибирующей способностью, чем эти же СМС без амидоборатной присадки. При этом противокоррозионные действия уменьшаются в следующей последовательности: МС-8 >Лабомид-203 >МЛ-52.

На рис. 3 приведены анодные и катодные потенциодинамические поляризационные кривые стали Ст.10, из которого следует, что в присутствии диортобораткарбамида (кривые 4, 5, 6 и 4', 5', 3') потенциалы растворения металла смещаются в положительную сторону относительно потенциала коррозии ($E_{кор.}$) в фоновом электролите.

Результаты электрохимических исследований коррелируют с данными полученными гравиметрическим методом и диортобораткарбамид преимущественно замедляет анодный процесс.

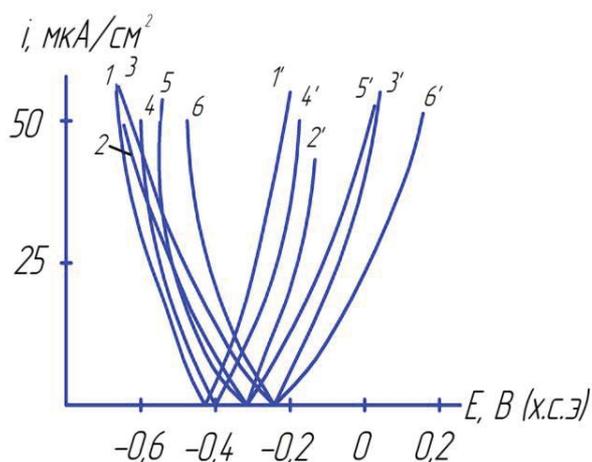


Рисунок 3 – Анодные и катодные потенциодинамические поляризационные кривые стали Ст.10:

- 1 и 1' – в 3%-ном растворе МЛ-52; 2 и 2' – в 3%-ном растворе Лабомид-203;
- 3 и 3' – в 3%-ном растворе МС-8;
- 4 и 4' – в 3%-ном растворе МЛ-52 + 5 г/л $2\text{H}_3\text{BO}_3 \cdot \text{N}_2\text{H}_4\text{CO}$;
- 5 и 5' – в 3%-ном растворе Лабомид-203 + 5 г/л $2\text{H}_3\text{BO}_3 \cdot \text{N}_2\text{H}_4\text{CO}$;
- 6 и 6' – в 3%-ном растворе МС-8 + 5 г/л $2\text{H}_3\text{BO}_3 \cdot \text{N}_2\text{H}_4\text{CO}$.

Коррозионные и коррозионно-механические поражения уменьшают циклическую прочность стали. Наличие ингибитора может оказывать влияние на оба разрушающих фактора, вызывающих снижение прочности металла [11]. По этой причине изучение влияния диортобораткарбамида на коррозионную усталость стали Ст.10 в моющих средствах представляет особый интерес.

Для дальнейших испытаний выбрали моющее средство МС-8, как наиболее эффективное из проверенных ранее СМС. Форма и размеры образцов, характер их подготовки к испытаниям, методика коррозионных и коррозионно-усталостных исследований описаны в [12]. База испытаний $N = 2 \cdot 10^6$ циклов.

Результаты усталостных и коррозионно-усталостных испытаний в растворе МС-8 с добавкой и без добавки диортобораткарбамида представлены на рис. 4 (кривые 1, 2, 3).

Для установления природы разрушающих факторов, вызывающих уменьшение циклической прочности стали, снимали усталостные кривые на воздухе после предварительной выдержки металла в коррозионных средах (кривые 4, 5).

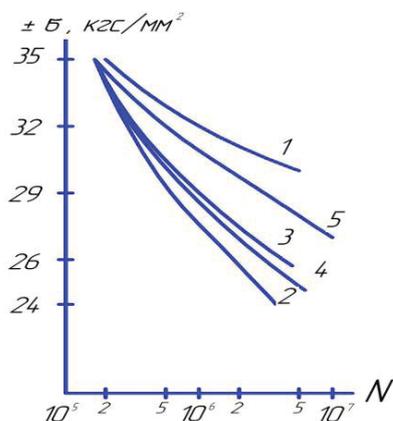


Рисунок 4 – Кривые усталости и коррозионной усталости стали Ст.10:

- 1 – на воздухе; 2 – в 3%-ном растворе МС-8; 3 – в 3%-ном растворе МС-8 + 5 г/л $2\text{H}_3\text{BO}_3 \cdot \text{N}_2\text{H}_4\text{CO}$; 4 – воздух после предварительной выдержки в 3%-ном растворе МС-8; 5 – воздух после предварительной выдержки в 3%-ном растворе МС-8 + 5 г/л $2\text{H}_3\text{BO}_3 \cdot \text{N}_2\text{H}_4\text{CO}$

Полученные данные свидетельствуют о том, что суммарная потеря циклической прочности исследуемой стали в 3%-ном растворе МС-8 на базе испытания $N = 2 \cdot 10^6$ циклов согласно кривым 1 и 2 составляет $5,4 \text{ кгс/мм}^2$. Сравнение кривых 1, 2 и 4 показывает, что чисто коррозионные поражения ($\sigma_N^{\text{ч.к.}}$) равны $4,0 \text{ кгс/мм}^2$ или 74,1%, а на коррозионно - механические поражения ($\sigma_N^{\text{к.м.}}$) приходится $1,4 \text{ кгс/мм}^2$, что составляет 25,9%.

Добавка диортобораткарбамида в количестве 5 г/л в 3%-ный раствор МС-8 увеличивает циклическую прочность стали (сравнить кривые 2 и 3), что обусловлено снижением эффективности действия разрушающих факторов на уменьшение циклической прочности металла (кривые 1, 3 и 5). На данной базе испытания пентаборат калия примерно в равной мере уменьшает разрушающий эффект чисто коррозионных и коррозионно-механических поражений ($\Delta\sigma_N^{\text{ч.к.}}=1,7 \text{ кгс/мм}^2$, а $\Delta\sigma_N^{\text{к.м.}}=1,9 \text{ кгс/мм}^2$, что равно 47,2% и 52,8% от $\Delta\sigma_N^{\text{ч.к.}}$ соответственно).

Результаты коррозионно-усталостных испытаний свидетельствуют о том, что диортобораткарбамида, снижая эффективность действия разрушающих факторов на уменьшение циклической прочности, увеличивает коэффициент запаса циклической прочности стали в исследуемой среде.

Полученные данные, наряду с литературными [13,14], позволяют рекомендовать изученные моющие средства с присадкой диортобораткарбамида в качестве новых эффективных моющих средств для очистки узлов и агрегатов автотранспортных средств от масляно-эмульсионных загрязнений и смазок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Козлов, Ю.С. Очистка изделий в машиностроении / Ю.С. Козлов, О.К. Кузнецов, А.Ф.Тельнов. – М.: «Машиностроение», 1982. – 264 с.
- 2.Фадеев, И.В. Разработка синтетических моющих средств на основе боратов для очистки поверхности металла. Монография /И.В.Фадеев, Ш.В.Садетдинов, И.Е.Илларионов // Чебоксары. 2016. – 185 с.
- 3.Фадеев, И.В. Моющие и противокоррозионные свойства синтетических моющих средств для узлов и деталей в присутствии некоторых боратов /И.В.Фадеев. А.Н.Ременцов, Ш.В.Садетдинов// Грузовик. 2017. № 1. С.17-20.
- 4.Фадеев, И.В. Влияние моноборатов лития, натрия, калия на моющие и противокоррозионные свойства синтетических моющих средств / И.В.Фадеев, Ш.В.Садетдинов// Приволжский научный журнал. 2015. № 2(34). С.86-90.
- 5.Илларионов, И.Е. Влияние фосфатборатных соединений на противокоррозионную устойчивость углеродистой стали в нейтральных водных средах / И.Е. Илларионов, Ш.В.Садетдинов, И.А.Стрельников, В.А. Гартфельдер // Черные металлы. 2018. №5. С. 47-53.
6. Эшмаматова Н., Тиллаев Р.С., Акбаров Х.И., Холиков А.Ж. Ингибирование коррозии углеродистой стали в нейтральных средах // «Биология ва кимёнинг долзарб муаммолари», Ёш олимларнинг илмий-амалий конференцияси материаллари. Тез. Тўплами. –Тошкент, 2008. –Б.286-288.
- 7.Аносов, В.Я. Основы физико–химического анализа / В.Я. Аносов, М.И.Озерова, Ю.Я. Фиалков. – М.: Наука. 1976. – 504 с.
- 8.Шварц, Е.М. Исследование синтетических боратов / Е.М. Шварц//Рига: Изд–во Латв. Ун–та. 1981. – С. 25–43.
- 9.Юркинский , В.П. . Коррозионная стойкость сталей в расплаве NaOH /В.П.Юркинский, Е.Г.Батурова, Е.Г.Фирсова//Черные металлы, 2014. –№4. – С.73-77.
10. Jiang, X. Effect of flow velocity and entrained sand on inhibition performances of two inhibitors for CO₂ corrosion of N80 steel in 3% NaCl solution // X.Jiang, Y.G.Zheng, W.Ke //Corrosion Science. – 2005. – No.47.-P. 2636-2658.
11. Козлов, В.Г. Методы борьбы с коррозией металлов / В.Г.Козлов, И.В.Титова, А.Н.Коноплин и др. // Фундаментальные исследования. –2017. –№ 6. – С. 53-57.
12. Фадеев, И.В. Повышение коррозионной стойкости стали 10 / И.В. Фадеев, Ш.В. Садетдинов // Вестник МАДИ. – 2015. – №2 (41). – С. 107 – 114.
13. Шемякин А.В., Терентьев В.В., Кузин Е.Г. Очистка двигателей сельскохозяйственных машин перед ремонтом (экспериментальные исследования) // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2017. – № 1 (37). – С. 171-175.
14. Шемякин А.В., Терентьев В.В., Андреев К.П., Кузин Е.Г. Современные способы повышения эффективности процесса очистки сельскохозяйственных машин. // Международный научный журнал. – 2017. – № 2. – С. 95-99.

АВТОРЫ

- Илларионов И.Е. – д.т.н., профессор. Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, г. Чебоксары.
Садетдинов Ш.В. – д.х.н., профессор. Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, г. Чебоксары.
Гильманшина Т.Р. – к.т.н., доцент. Сибирский федеральный университет, г. Красноярск.

AUTHORS

- Illarionov I.E. - Doctor of Technical Sciences, Professor. Chuvash State University named after I.N. Ulyanova, Cheboksary.
Sadetdinov Sh.V. - Doctor of chemical sciences, professor. Chuvash State University named after I.N. Ulyanova, Cheboksary
Gilmanshina T.R. - Ph.D., associate professor. Siberian Federal University, Krasnoyarsk.

**СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ
ТЕРМОФРИКЦИОННЫХ ИНСТРУМЕНТОВ**

**METHOD FOR INCREASING WEAR RESISTANCE OF
THERMOFRICTION TOOLS**

ШЕРОВ К.Т., ТУСУПОВА С.О.
(КарГТУ, Караганда, Казахстан)

SHEROV K.T., TUSUPOVA S.O.
(KSTU, Karaganda, Kazakhstan)

***Аннотация.** В данной статье приводятся результаты исследования наплавки чашечного ротационно-фрикционного резца наплавочным материалом STOODYM7-G.*

***Summary.** This article presents the results of the study of the surfacing of a cup rotary-friction cutter with a STOODY M7-G filler.*

***Ключевые слова.** Наплавка, ротационно-фрикционный резец, износостойкость.*
***Keywords.** Surfacing, rotary friction cutter, wear resistance.*

Одной из актуальных задач современного машиностроения является постоянное совершенствование технологии изготовления деталей, создание высокоэффективного импортозамещающего инструмента. В связи с этим на кафедре «Технологическое оборудование, машиностроение и стандартизация» Карагандинского государственного технического университета (КарГТУ) разработана технология термофрикционной обработки металлических заготовок на малых скоростях [Патенты РК: №22998; №25649; №31934; №32933]. Известно [1,2,3,4], осуществление термофрикционной обработки по традиционному способу связано с необходимостью достижения линейной скорости на периферии диска трения 100 и более м/с. При этом величина скорости скольжения на контакте периферии, диск - обрабатываемый материал, должна обеспечивать условие полного разупрочнения последнего. В то же время режущий инструмент должен отвечать требованиям, соответствующим формоустойчивости и жесткости [5,6,7,8]. Следовательно, чем выше температура плавления обрабатываемого материала, тем больше должна быть скорость скольжения в контакте. Практическая реализация процесса обработки таких материалов требует больших капитальных затрат на оборудование. Так как шпиндель станка должен иметь частоту вращения более чем 10000 об/мин, что соответственно увеличивает требования к виброустойчивости. Высокая температура в контакте, необходимая для разупрочнения обрабатываемого материала приводит к разупрочнению режущего диска. Предотвращение этого возможно за счет увеличения диаметра режущего инструмента [9,10,11,12].

Этот размер должен быть подобран таким образом, чтобы время нахождения режущей кромки инструмента в зоне реза было бы в необходимом количестве раз меньше, чем в зоне свободного пробега, в которой происходит восстановление прочностных свойств за счет охлаждения обдувом воздуха.

Разработанные способы термофрикционной обработки опираются на иной механизм резания. Сущность, которого заключается в локализации теплового и деформационного полей в заготовке, что позволяет перевести внешнее трение между инструментом и отрезаемым материалом во внутреннее. В этом случае трение происходит между слоями отрезаемого материала. Данная технология позволяет выполнять процесс резания металлических заготовок на станках обычного исполнения, имеющих шпиндельный узел с частотой вращения $n=2000-3500$ об/мин. При этом обеспечивается качество обработанной поверхности и значительно снижается себестоимость обработки. Основным различием между традиционной и предлагаемой ТФО является существенное снижение необходимого количества оборотов, что в свою очередь приводит к значительному снижению потребляемой электроэнергии. Так например применение технологии ТФО с импульсным охлаждением позволяет сократить расходы: на электроэнергию (не более 5-7 кВт), $n_{шп} = 2000-3000$ об/мин, на инструмент (диски трения изготавливаются из простых сталей).

Однако, несмотря на снижение скоростей резания, существует проблема связанная с износостойкости, жесткости и прочности режущих дисков трения [13], которые оказывают отрицательные влияния на качественные показатели термофрикционной обработки. В связи, с чем повышение износостойкости, прочности и жесткости термофрикционных режущих инструментов является актуальной задачей.

В работах [13,14] были определены направления научных исследований для повышения износостойкости, жесткости и прочности термофрикционных режущих инструментов. Одним из этих направлений является повышения износостойкости режущей части термофрикционных инструментов путем наплавки высокопрочными наплавочными материалами. Для решения данной проблемы нами предлагается упрочнение режущей части термофрикционных инструментов наплавкой, используя наплавочные материалы, обладающие высокой твердостью и температурной стойкостью. Выполненный анализ существующих наплавочных материалов показали, что нижеуказанные наплавочные материалы обладают вышеуказанными характеристиками: STOODYM7-G, STOODY102-G, OKTUBRODUR 53. На рисунке 1 показано наплавочные материалы, полученные в качестве технической помощи от ТОО «ЭСАБ Казахстан» (г. Алматы). Наплавочный материал STOODYM7-G, характеризуется высокой твердостью (от 58 до 66 HRC) и отличной износостойкостью [15]. Может использоваться при повышенных температурах до 1000F (537,78°C), в условиях умеренного теплового удара.



а) - STOODYM7-G; б) - STOODY102-G; в) - TUBRODUR 53 G M

Рисунок 1 - Наплавочные материалы

Таблица 1 – Химический состав и твердость материала STOODYM7-G, %

C	Cr	Mn	Mo	V	W	Fe	Твердость
1,0	4,0	0,4	9,0	2,0	2,0		58-66 HRC

С целью повышения износостойкости рабочей части режущего инструмента наружную поверхность пояска реборды чашечного ротационно-фрикционногорезца, изготовленного из стали HARDOX400, упрочняли наплавкой на сварочном аппарате MinarcTIG-порошковой проволокой STOODYM7-G диаметром 1,6 мм. Для определения режимов наплавки, а также качества наплавки и количество необходимого слоя наплавки, были проведены исследования на специальных образцах. Экспериментальные исследования проводилось на лабораторной базе Казахстанского института сварки при Карагандинском государственном техническом университете.

Были подготовлены образцы из стали HARDOX400. На рисунке 1 показаны образцы из стали HARDOX400.



а) – для опыта №1; б) – для опыта №2; в) – для опыта №3

Рисунок 1 - Образцы из стали HARDOX400



а) – сварочный аппарат MinarcTIG; б) – мультиплаз– 2500

Рисунок 2 - Сварочный аппарат MinarcTIG и мультиплаз– 2500



1 - однослойная наплавка; 2 - двухслойная наплавка; 3 - трехслойная наплавка

Рисунок 3 – Наплавленные образцы

Наплавку проводили в один, два и три слоя на предварительно нагретую поверхность до $T\ 300^{\circ}\text{C}$. Режимы наплавки варьировались в пределах: сварочный ток 70-75 А, напряжение 11-12 В. В результате структурного исследования образцов установлено, что для упрочнения наплавкой достаточно наплавки в два слоя.

На рисунке 4 показаны наплавленные (в два слоя) чашечные резцы.



а)

б)

Рисунок 4 - Наплавленные чашечные резцы

На рисунке 5 показаны готовые чашечные резцы после механической обработки.



1 – $\text{Ø}50\ \text{мм}$; 1 – $\text{Ø}70\ \text{мм}$; 1 – $\text{Ø}80\ \text{мм}$

Рисунок 5 - Готовые чашечные резцы после механической обработки

Наплавленный металл характеризуется высокой абразивной стойкостью в сочетании с ударными нагрузками. Результаты экспериментальных исследований проведенных в лабораторных [16] и производственных [17] условиях показали возможность использования чашечных резцов наплавленного материалом STOODYM7-G для растачивания отверстий больших размеров. При визуальной проверке чашечных резцов, после испытания, следов износа (царапины, сколы, трещины) не были обнаружено. Предварительные расчеты показали, что изготовление чашечных резцов из неинструментальных материалов, в частности с наплавкой, снижает расходы на режущий инструмент в порядке 5-7 раз и себестоимость операции в 1,5-2 раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грабик Б.Г., Подураев В.Н., Короткевич Ю.Н. Исследование процесса сверхскоростного резания и установка взрывного типа для его осуществления. Издательство МВО СССР. – Машиностроение, №11. 1964г.
2. Кузнецов В.Д. Физика резания и трения металлов и кристаллов. 1977-310с.
3. Зарубицкий Е.У., Талантов Н.В., Костина Т.П. Выбор оптимальных условий резания при термофрикционной обработке сталей. Методические указания - Ворошиловградский машиностроительный институт, 1985, 8с.
4. B.L. Juneja, G.S. Sekhon, NitinSeth, Fundamentals of metal cutting and Machine Tools, Second edition, 2005, 605с.
5. Сизый Ю.А., Савченко Э.В. Деформация диска пилы при высоко-скоростной разрезке - Вестник ХПИ. Машиностроение, 1985, №15, С. 46-49.
6. David A. Stephenson, John S. Agapiou, Metal cutting theory and practice. 1997, 883с.
7. Талантов Н.В. Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента. - М.: Машиностроение, 1992. - 240 с.
8. Борисов, Б.Я. Высокоскоростное резание металлов пилами / Б.Я. Борисов. – К.: Высшая школа, 1970.– 91 с.
9. Нефедов С.И. Резка металлов. -М.: Машиностроение.-2001.
10. Сизый Ю.А. Динамика нагрева и охлаждения фрикционного диска с учетом теплообмена с окружающей средой. - Известия вузов. Машиностроение. 1993, №7, с. 139-147.
11. Покинтелица Н.И., Плахотник В.А. Пластическое деформирование и температура в зоне резания притермофрикционной обработке материалов // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: зб. наук. пр. -Луганськ: Вид-во СЛУ, 2003.-Ч.1. - С. 196-201.
12. George W. Genevro, Stephen S. Heineman, Machine tools: processes and applications, Prentice Hall, 1991, 439с.
13. Шеров К.Т., Тусупова С.О. Исследование износа термофрикционных режущих инструментов / Механика и технологии. – Тараз: Изд-во «Тараз университеті» ТарГУ им. М.Х. Дулати, 2018.- №2(60)- С.7-16.
14. Маздубай А.В., Арапова Н.К. Об износостойкости режущих дисков трения для термофрикционной обработки на малых скоростях // Труды международной научно-практической конференции «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации». Ч.3. – Караганда: Изд-во КарГТУ, 2017. – С.256-258.
15. Тусупова С.О., Шеров К.Т. Наплавка - как технологический метод повышения износостойкости термофрикционных инструментов // Труды международной научно-практической конференции «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации» (Сагиновские чтения №10), Ч.3. – Караганда: Изд-во КарГТУ, 2018. – С.263-265.
16. Шеров К.Т., Черешка А., Доненбаев Б.С., Тусупова С.О. Исследование влияние угла установки инструмента на показатели качества при РФР отверстия / Journal of Advanced Research in Technical Science. –North Charleston, USA: SRC MS, CreateSpace. – 2018. – Issue 11. – P.17-28.
17. Шеров К.Т., Доненбаев Б.С., Тусупова С.О. Исследование способа ротационно-фрикционного растачивания отверстий больших размеров / Механика и технологии. – Тараз: Изд-во «Тараз университеті» ТарГУ им. М.Х. Дулати, 2018.- №3(61)- С.32-42.

АВТОРЫ

Шеров Карибек Тагаевич - доктор технических наук, профессор кафедры «Технологическое оборудование, машиностроение и стандартизация» Карагандинского государственного технического университета, тел. моб.: +7775-350-17-71; E-mail: shkt1965@mail.ru

Тусупова Саягуль Ораловна – докторантка кафедры «Технологическое оборудование, машиностроение и стандартизация» Карагандинского государственного технического университета, тел. моб.: +7747-904-50-15; E-mail: suleeva.s@inbox.ru

THE AUTHORS

Sherov Karibek Tagayevich - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department "Technological Equipment, Mechanical Engineering and Standardization" of Karaganda State Technical University, tel. Mobile: + 7775-350-17-71; E-mail: shkt1965@mail.ru.

Tusupova Sayagul Oralovna - doctoral student of the department "Technological equipment, mechanical engineering and standardization" of Karaganda State Technical University, tel. Mobile: + 7747-904-50-15; E-mail: suleeva.s@inbox.ru.

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГЕРМЕТИЧНОСТИ
ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ МАШИН ЛЕСНОГО КОМПЛЕКСА**

**TECHNOLOGY TO ENSURE THE TIGHTNESS OF HYDRAULIC
SYSTEMS OF MACHINES FOR FOREST COMPLEX**

ПАМФИЛОВ Е. А., ПИЛЮШИНА Г. А., КАПУСТИН В. В.
(БГТУ, г. Брянск, РФ)

PAMFILOV E. A., PILYUSCHINA G. A., KAPUSTIN V. V.
(Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia)

***Аннотация.** Рассмотрены причины потери герметичности гидравлических систем лесозаготовительных машин. Предложена упрочняющая обработка методом вибрационного накатывания для решения задачи повышения герметичности, износостойкости, усталостной прочности и других триботехнических показателей качества функциональных поверхностей изнашиваемых деталей.*

***Annotation.** The reasons of loss of tightness of hydraulic systems of logging machines are considered. The hardening treatment by the method of vibration rolling is proposed to solve the problem of improving the tightness, wear resistance, fatigue strength and other tribotechnical indicators of the quality of the functional surfaces of wear parts.*

***Ключевые слова:** износостойкость, герметичность, шероховатость, абразив, гидравлические системы, вибрационное накатывание.*

***Keywords:** wear resistance, tightness, roughness, abrasive, hydraulic systems, vibration rolling.*

Высокие требования, предъявляемые к качеству и конкурентоспособности лесозаготовительных машин, обеспечиваются не только за счёт увеличения мощности и технологических операций, выполняемых техникой, но и путём создания необходимых условий для обеспечения высокой эксплуатационной надёжности гидроприводов и их элементов. Поэтому это актуальной задачей при изготовлении деталей и узлов гидравлических систем лесных машин.

Уровень надёжности исследуемой техники в значительной степени определяется показателями износостойкости ряда деталей и узлов, лимитирующих работоспособность гидросистем.

Анализ работоспособности гидравлических систем лесозаготовительных машин показывает, что более 30% их отказов связано с нарушением работоспособности пар трения. Также экспериментально установлено, что практически на всех деталях каждой пары трения гидравлических агрегатов,

отработавших гарантийный ресурс, помимо картины износа, характерной для протекания постепенного изнашивания, наблюдаются и другие виды фрикционного повреждения рабочих поверхностей, проявляющихся в виде царапин, следов схватывания, прижогов, отслаивания упрочняющихся покрытий материала и т.д. [5]

Внешние проявления нарушения штатной работоспособности гидросистемы укрупнённо можно разделить на две группы. Это либо гидросистема просто не работает, т.е. не происходит подъем навешенного орудия, поворот трактора, включение передачи или привода. Чаще всего это является следствием нарушения циркуляции масла в соответствии с заданным режимом работы гидросистемы, по причине недопустимого износа или разрушения основных деталей гидронасоса.

Во втором случае гидросистема функционирует, однако значения основных показателей ее рабочих процессов, таких как, длительность подъема рабочего органа, способность удерживать его в транспортном положении в течение требуемого промежутка времени, длительность поворота или включения передачи гидромuftами, значительно отклоняются от номинальных значений.

Опыт эксплуатации указанной техники показывает, что надёжность гидросистемы не в полной мере удовлетворяет требованиям эффективной работы. При этом частые отказы системы вызваны, главным образом, износом трибоузлов широко используемых аксиально-поршневых насосов и моторов, что существенно влияет на работоспособность гидропривода и, соответственно, на продолжительность выполнения машиной всего цикла операций. [7]

В результате исследований подтверждено, что наибольшее влияние на надёжную работоспособность насоса или мотора оказывают пары трения поршень- втулка блока цилиндров и блок цилиндров- распределитель. [6]

В паре поршень-втулка блока цилиндров основными дефектами при эксплуатации является раздутие юбки поршня, вызванные повышенной нагрузкой, превышающие допустимые значения, и резкой остановкой вала насоса. В результате такого процесса происходит заклинивание поршня в блоке цилиндров, и, следовательно, разрушению узла, а в некоторых случаях и корпуса насоса.

Кроме того, на рабочих поверхностях поршня и втулки блока цилиндров наблюдаются прижоги, приводящие к повышенному износу в месте прижога и образованию надиров. Причиной проявления такого износа заключается в нарушении режима трения, и как следствие разрушение масляной плёнки, приводящее к локальному нагреву трущихся поверхностей и их схватыванию.

Такой механизм изнашивания наблюдается и в паре блок цилиндров- распределитель. При этом в результате образования прижогов, и как следствие надиров, происходит нарушение герметичности сопрягаемых деталей.

Анализ состояния изношенных поверхностей деталей, лимитирующих работоспособность гидросистем, позволяет предположить, что эксплуатация происходит при воздействии абразивных частиц. Причём, абразивом являются как частицы, внесенные в зону трения извне, так и частицы- продукты износа контактирующих деталей.

При этом, учитывая наличие следов на поверхностях деталей, таких как риски, царапины, задиры, следует предположить, что абразивное изнашивание осуществляется в основном частицами, жёстко или относительно свободно закреплёнными в зоне фрикционного контактирования. При этом частицы внедряясь в поверхность, при относительном перемещении деталей, производят абразивное воздействие. Это способствует увеличению зазоров между сопряжёнными деталями и, как следствие, нарушению герметичности соединений, приводящее к снижению КПД насоса, подачи и давления жидкости и. т.д.

Таким образом, перечисленные выше эксплуатационные дефекты подтверждают, что на надёжную работу насоса влияет два основных механизма изнашивания: адгезионно - механическое и абразивное.

Наиболее простым и в тоже время эффективным способом повышения качества поверхности и их долговечности, как показывают исследования российских и зарубежных авторов, является отделочно- упрочняющая обработка поверхностно пластическим деформированием. [3,4]

В результате анализа наиболее приемлемым методом поверхностно-пластического деформирования для герметичности и износостойкости исследуемых пар трения является метод вибрационного накатывания. Кроме того, вибрационное накатывание является самым простым и надёжным способом для получения регулярного микрорельефа обрабатываемых поверхностей деталей с одинаковыми по форме, высоте и взаимному расположению микронеровностями. [5,10]

На рис. 1 приведена втулка блока цилиндров с вибронакатаной цилиндрической внутренней поверхностью различным и взаимным расположением канавок.



Рисунок 1 Втулка блока цилиндров с вибронакатаной внутренней поверхностью

При обработке методом вибронакатывания происходит пластическая деформация поверхностного слоя детали, сопровождающаяся образованием и движением дислокаций. При этом структурные превращения, образующиеся в поверхностном слое, сопровождаются увеличением удельного объёма, что обуславливает образование в наклёпанной зоне остаточных напряжений сжатия, которые в зависимости от материала достигают 1200- 1550 МПа; глубина залегания напряжений обычно на 10- 15% превышает глубину слоя с повышенной твёрдостью. [1, 2]

Механизм формирования остаточных напряжений происходит при взаимодействии деформационных и тепловых процессов. При этом каждый участок поверхностного слоя подвергается многократному деформированию,

фприводящему к упрочнению и повышению температуры. Наиболее упрочнённой оказывается верхняя часть пластически деформированного слоя, при этом повышается твёрдость, предел прочности и предел текучести поверхностного слоя материала детали. Таким образом, создание контролируемых сжимающих остаточных напряжений, способствуют повышению эксплуатационных свойств.

Кроме того, процесс обработки детали характеризуется небольшим натягом и сопровождается незначительным изменением размеров. Это связано со снятием микронеровностей и пластической объёмной деформацией детали. Таким образом, точность обработанной детали будет зависеть от ее конструкции и конструкции инструмента, режимов обработки, а также от точности размеров, формы и качества поверхности детали. При обработке тонкостенных деталей точность их размеров можно повысить на 10- 20 %, а отклонение формы при этом составит 10- 30 мкм. [2]

Вибронакатывание также способствует образованию новой поверхности с шероховатостью, зависящей от основных параметров обработки, таких как, рабочее усилие или натяг, подача, исходная шероховатость, материал, конструкция инструмента и т.д. Параметры шероховатости обрабатываемой поверхности Ra 0,2...0,8 мкм достигаются при исходных значениях этих параметров 0,8...6,3 мкм.

Кроме того, метод вибрационного накатывания позволяет в значительной мере улучшать такие показатели качества поверхностей, как, плавность хода, бесшумность, контактную жесткость, сопротивление усталости, коррозионную стойкость, прочность неподвижных соединений и т.д.

В результате упрочнения поверхностного слоя, наряду с увеличением износостойкости и герметичности соединений, увеличивается и усталостная прочность на 15-20%. При этом упрочнённый поверхностный слой препятствует росту существующих и возникновению новых усталостных трещин. При наличии упрочняющего слоя усталостные трещины зарождаются не в поверхностном слое, а в глубине детали. Появление таких трещин и дальнейшее их развитие возможно при больших циклах нагружения, чем при отсутствии упрочнения. [1]

Таким образом, метод вибрационного накатывания при изготовлении деталей пар трения аксиально- поршневых насосов является наиболее актуальным, обеспечивающим повышенную герметичность, износостойкость и другие показатели качества поверхностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жарский, И.М. Технологические методы обеспечения надёжности деталей машин: учеб. пособие / И.М. Жарский [и др]. - Мн.: Выш. шк., - 2005. - 299с.
2. Миранович, А. В. Обработка заготовок деталей машин: учеб. пособие /А. В. Миранович [и др.]; под ред. Ж. А. Мрочака. – Мн: Выш. шк., - 2014. – 172 с.
3. Памфилов, Е.А. Возможности и перспективы повышения работоспособности машин и оборудования лесного комплекса/Е.А. Памфилов, Г.А. Пилюшина// Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. - 2013. - № 5 (335). - С. 10-13.
4. Пилюшина, Г.А. Восстановление подшипников скольжения методом газопламенного напыления [Текст] / Г.А. Пилюшина, Д.Н. Грибенников //Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – Воронеж. - Т. 4. - № 5-4 (25-4), - 2016. - С. 88-94.

5. Родионов Д.Н. Оптимизация параметров грузоподъемных механизмов автомобильных гидроманипуляторов [Текст]/ Д.Н. Родионов, [и др.] // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования. - Воронеж. - Т. 3. - № 3, - 2016. - С.278-282.
6. Колесников П.Г., Полетайкин В.Ф. Комбинированные манипуляторы лесосечных и лесотранспортных машин. Динамика элементов конструкции Красноярск: СибГТУ, 2014. – 174 с.
7. Никитин О.Ф., Надежность, диагностика и эксплуатация гидропривода мобильных объектов. // Никитин О.Ф. Учеб.пособие. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2007. -312 с.
8. Мышкин, Н.К. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии / Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец. – М.: Физматлит, 2007. – 368с.
9. Демкин, М.Н. Зависимость эксплуатационных свойств фрикционного контакта от микрогеометрии контактирующих поверхностей / М.Н. Демкин, В.В. Измайлов // Трение и износ. – 2010. – Т. 31. – № 1. – С. 68-77.
10. Пенкин, Н.С. Основы трибологии и триботехники / Н.С. Пенкин, А.Н. Пенкин, В.М. Сербин - М.: Машиностроение, 2008. - 206с.
11. Сорокин, Г.М. Трибология сталей и сплавов: учеб. пособие/Г.М. Сорокин [и др.]. - М.: ОАО «Издательство «Недра», 2000. - 317 с.
12. Tribocorrosion of passive metals and coatings / Edited by Dieter Landolt and Stefano Mischler. - UK, Cambridge: Woodhead Publishing Limited, - 2011. – 579 p.
13. Pilyushina G.A., Pyrikov P.G., Rukhlyadko A.S. Improving the performance of machining tools for nonmetallic materials//Russian Engineering Research. - 2013. - Т. 33. -№ 9. - С. 532-535.
14. Пилюшина, Г.А. Особенности ремонта аксиально-поршневых насосов/ Г.А. Пилюшина, В.В. Капустин // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования. 2017. Т. 4. № 1 (7). С. 209-215.
15. Хрущев, М.М. Абразивное изнашивание/ М.М. Хрущев, М.А. Бабичев – М.: Металлургия, 1983. – 445 с.

АВТОРЫ

Памфилов Евгений Анатольевич – зав. кафедрой «Триботехническое материаловедение и технологии материалов», доктор технических наук, профессор научно-исследовательской лаборатория инженерии материалов и адаптивных технологических систем, старший научный сотрудник, ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», г. Брянск.

Пилюшина Галина Анатольевна - кандидат технических наук, доцент ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», г. Брянск.

Капустин Владимир Васильевич – аспирант, научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории инженерии материалов и адаптивных технологических систем ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», г. Брянск.

THE AUTHORS

Pamfilov Evgeny Anatolyevich - Head. Department of “Tribotechnical Materials Science and Technology of Materials”, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Research Laboratory of Materials Engineering and Adaptive Technological Systems, Senior Researcher, Bryansk State Technical University, Bryansk.

Pilyushina Galina Anatolievna - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Bryansk State Technical University, Bryansk.

Kapustin Vladimir Vasilievich - graduate student, researcher at the research laboratory of materials engineering and adaptive technological systems FSBEI HE "Bryansk State Technical University", Bryansk.

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ПРАВКИ СВОБОДНЫМ АБРАЗИВОМ АЛМАЗНЫХ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ

SELECTION OF PARAMETERS OF PROCESS OF TRUEING OF DIAMOND GRINDING WHEELS BY FREE ABRASIVE

ГУСЕВ В.В., ЛАЗАРЕВ Д.С., МОИСЕЕВ Д.А.
(ГОУВПО «ДонНТУ», г. Донецк, ДНР)

GUSEV V.V., LAZAREV D.C., MOISEEV D.A.
(SEEHPE «DonNTU», Donetsk, DNR)

Аннотация: В работе рассмотрен вопрос повышения режущей способности алмазных кругов за счет выбора исходных параметров и режимов правки свободным абразивом.

Summary: The question of increase of cutting capacity of diamond wheels is considered owing to the choice of initial parameters and modes of trueing by free abrasive.

Ключевые слова: алмазный шлифовальный круг, свободный абразив.

Keywords: diamond grinding wheel, free abrasive.

Выходные показатели технологической системы алмазного шлифования технической керамики – точность, качество обработанной поверхности, энергоемкость, производительность, расход инструмента определяется характеристикой инструмента и изменением состояния рабочей поверхности круга (РПК) в процессе обработки. При шлифовании режущая способность шлифовального круга (ШК) уменьшается, силы резания возрастают в 1,7-2,5 раза, что приводит к снижению точности обработки и ухудшению структуры дефектного слоя и, как следствие, к снижению прочности изделий [1-3]. Для управления рабочей характеристикой шлифовального круга используют различные методы правки с целью восстановления его режущих способностей и требуемой геометрии инструмента (рис. 1).

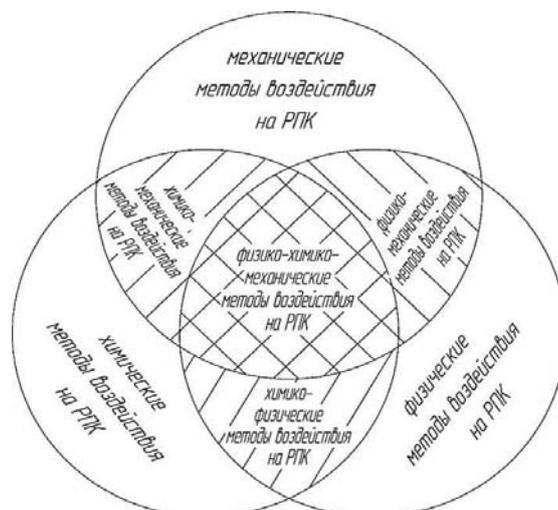


Рис.1. Методы управляющих воздействий на РПК

Правке подвергаются как вновь устанавливаемые на станок инструменты, так и затупившиеся в процессе работы. На правку расходуется от 45% до 80% полезного объема шлифовального круга. Затраты на правку могут достигать до 40% штучного времени обработки и более. Методы правки кругов на металлической связке по характеру воздействия на РПК делятся на [4]: механические, химические, физические и комбинированные. Связь между этими методами представлена на рис. 1. В настоящее время разрабатываются новые технологии правки, так как существующие методы правки не всегда удовлетворяют требованиям по производительности и качеству РПК.

Наиболее простым и эффективным управляющим воздействием является разновидность механического метода, к которому относится правка свободным абразивом [5-7]. Этот метод отличается, по сравнению с другими механическими методами правки, более мягким воздействием на алмазные зерна круга и большей избирательностью воздействия на связку круга. Метод правки свободным абразивом исследуется на кафедре «Мехатронные системы машиностроительного оборудования» ГОУВПО «ДонНТУ».

Процесс управляющих воздействий свободного абразива на РПК можно представить как совокупность процессов абразивного износа связки ШК и притира. Сущность метода состоит в следующем. К вращающемуся на рабочей скорости кругу подводят до касания притир. Притиру задают возвратно-поступательное движение вдоль образующей инструмента. В зону контакта инструмента и притира подают свободный абразив, который путем шаржирования в притире и перекачивания по поверхности контакта в направлении вектора скорости вышлифовывает материал притира и связки инструмента. Интенсивность шлифования связки инструмента и материала притира определяется размером, подаваемых абразивных частиц и величиной зазора между инструментом и притиром. Длительность воздействия на РПК и его состояние зависит от правильного выбора начальных параметров и режима правки.

Цель исследований: установление входных параметров для правки свободным абразивом шлифовального круга на металлической связке.

Основное содержание.

Систему управления РПК можно представить состоящей из следующих подсистем: станка, шлифовального круга, устройства для правки, зоны контакта и подсистемы подачи в зону контакта СОТС. Подсистема СОТС оказывает влияние на температурный режим правки, физико-химические процессы в зоне контакта, которые в дальнейшем не будем рассматривать. Так как при воздействии на РПК абразивных зерен, температура в зоне контакта незначительна, то в дальнейшем тепловые процессы при правке не будем учитывать. Подсистема станка предназначена для размещения системы управления РПК и оказывает влияние на процесс взаимодействия инструмента и притира через жесткость шпиндельного узла с кругом и угловую скорость последнего.

В качестве входных параметров подсистемы ШК перед правкой выступают геометрические размеры круга (радиус $R_{кр}$ и высота $B_{кр}$), параметры характеризующие исходное состояние РПК: характеристика круга (из которой прежде всего оказывают влияние твердость связки HV_K и средний размер алмазных зерен \bar{d}_a), средняя высота вылета зерен из связки РПК $\Delta\bar{R}_0$, среднее число зерен на единице поверхности, плотность распределения вершин зерен по высоте РПК, а также режущая способность инструмента W_0 . Состояние круга перед правкой определяется режимом шлифования заготовки, ее физико-механическими свойствами и объемом удаленного припуска [8, 9].

При воздействии свободного абразива на алмазный круг имеют место четыре процесса, оказывающих влияние на состояние РПК: истирание алмазных зерен по поверхности притира с образованием площадок износа, хрупкое разрушение микроскалыванием зерен, вырывание зерен из связки, вышлифовывание связки абразивными зёрнами. Удаление связки, а также наиболее слабо удерживаемых в связке алмазных зерен, приводит к изменению количества алмазных зерен на единице поверхности РПК и плотности распределения вершин зерен по ее высоте $\Delta R(\tau)$, которая также изменяется.

К входным параметрам для правки свободным абразивом относятся: форма и размеры притира, материал, из которого он изготовлен, размер абразивных зерен, характеризуемый средним размером зерна $\bar{d}_{аб}$ и плотностью их распределения по диаметру $f(d_{аб})$, состав абразивной смеси (концентрация абразива $K_{аб}$, прочность абразивной смеси $\sigma_{аб}$). В качестве абразивных зерен был выбран карбид кремния черный [10]. Средний размер зерна и плотность их распределения по диаметру определяются по данным завода-производителя [11]. Абразивная смесь выбиралась в соответствии с результатами исследований, приведенных в работе [12]. Зернистость абразивного порошка необходимо выбирать в зависимости от размера зерна алмазного круга. Как показали экспериментальные исследования (рис. 2), от соотношения между зернистостями круга и абразивного порошка зависит как режущая способность, так и вылет алмазных зерен из связки после правки. Для повышения режущей способности и вылета алмазных зерен из связки необходимо, чтобы зернистость абразивного порошка превышала зернистость алмазного круга на 20...30%.

Не менее важно выбрать правильно материал притира. В процессе перекачивания в рабочей зоне зерна свободного абразива шаржируются в притир и удаляют связку круга. Результаты исследования показали, что вероятность шаржирования зерен в поверхность притира зависит от материала притира и силы, прикладываемой к притиру. Наибольшая вероятность шаржирования абразивных зерен в поверхность притира достигается при использовании в качестве притира чугуна серого СЧ-15, СЧ-20 [13]. При увеличении вероятности шаржирования, как показали исследования, величина выступания зерен ΔR из связки также возрастает.

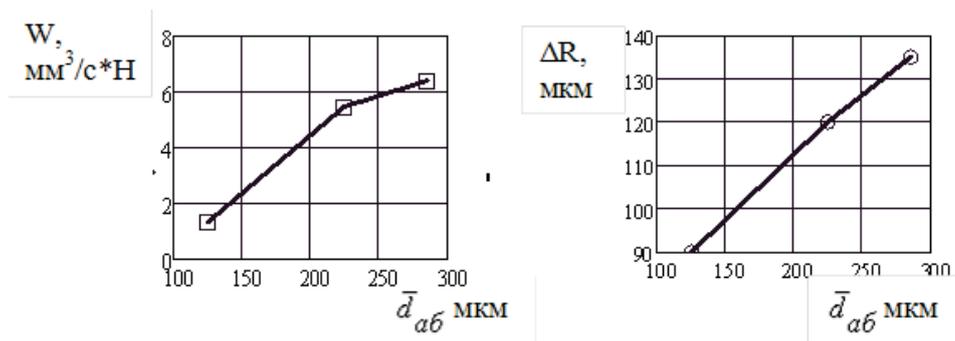


Рис. 2. Влияние среднего размера зерна свободного абразива на режущую способность и максимальное расстояние от вершины зерен до связки ΔR на круге 1A1 200x10x5x76 250/200 AC32-4-M2-01

Частота f_o и амплитуда A_o осцилляции притира, радиальная относительно РПК скорость движения притира V_{np} , интенсивность подачи абразивной смеси V_{ab} являются входными параметрами устройства для подачи свободного абразива в зону правки. Амплитуда осцилляционного движения A_o и частота f_o выбирались из условия обеспечения прямолинейного профиля круга после правки.

Для выбора скорости движения притира V_{np} , интенсивности подачи абразивной смеси V_{ab} при проведении экспериментальных исследований был использован композиционный рототабельный план вида 2^2 . Диапазон варьирования $V_{np} = 15..22$ мкм/с, а $V_{ab} = 100..250$ мкм/с. Этот план позволяет получить модель, способную предсказать значение искомого параметра с одинаковой точностью (независимо от направления) на равных расстояниях от центра плана и имеет преимущество перед некомпозиционными планами в отсутствии взаимодействия между квадратичными членами и свободным членом уравнения регрессии. Уравнение регрессии было получено в следующем виде:

$$W_{np} = 0,17(1 - 0,01V_{ab})V_{ab} + (10 - 0,16V_{np} + 0,0058V_{ab})V_{np} - 98. \quad (1)$$

Максимальное значение режущей способности соответствует скорости подачи притира $V_{np} = 17,5$ мкм/с и скорости подачи абразива $V_{ab} = 200$ мкм/с.

В качестве управляющей подсистемы для правки выступает устройство правки ШК, на вход которого поступает вектор управляющей информации, в качестве которой выступает длительность T_{np} и периодичность T воздействия устройства восстановления режущей способности алмазного круга [14].

Воздействие свободного абразива на РПК необходимо прекращать, когда режущая способность круга достигнет определенного заданного уровня, что позволит исключить чрезмерный расход алмазов и нерациональный расход правящего абразива. Длительность правки определяется величиной удаления объема

Режущая способность круга увеличивается в результате воздействия свободного абразива от времени по следующей зависимости

$$W(\tau) = \frac{1}{a \cdot \exp(-b \cdot \tau - c)} + \frac{1}{W_{np}}, \quad (2)$$

где a – коэффициент, зависящий от обрабатываемого материала и характеристики инструмента, определяет нижнюю границу режущей способности ШК при принятых условиях обработки;

b – коэффициент, зависящий от технологического регламента правки, определяет интенсивность правки;

c – коэффициент, зависящий от исходного состояния РПК перед правкой, определяет длительность времени правки для достижения предельной режущей способности кругом, чем выше режущая способность круга перед началом правки, тем меньше времени необходимо затратить на процесс правки;

W_{np} – предельная режущая способность круга при принятых условиях ее определения, зависящий от характеристики круга и физико-механических свойств обрабатываемого материала.

Во время правки на РПК происходит удаление зерен из связки ШК и дробление алмазных зерен прочно удерживаемых связкой, что приводит к линейному износу круга. Как показали теоретические исследования [15], максимальная глубина заглабления алмазных зерен при глубинном плоском врезном шлифовании керамики (при варьировании глубины до 0,1..0,15 мм) не превышает 20 мкм для кругов зернистостью 200/160, 250/200 и 315/250. Однако для достижения максимальной режущей способности круга после правки свободным абразивом необходимо обеспечить линейный износ алмазного круга $(0,2..0,25) \cdot \bar{d}_{\alpha}$, что превышает максимальное заглабление зерен в материал припуска. Это связано с тем, что при шлифовании керамики абразивным потоком (СОТС с разрушенным материалом припуска) повреждаются зерна, непосредственно не участвующие в его удалении.

ВЫВОДЫ

На основании экспериментальных исследований в работе предложена модель, описывающая изменение режущей способности ШК при правке свободным абразивом.

Полученные экспериментальные результаты позволяют осуществлять выбор параметров правки свободным абразивом по техническим критериям в зависимости от применяемого алмазного круга и условий обработки технической керамики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов, С.А. Алмазно-абразивная обработка металлов и твердых сплавов / С.А.Попов, Н.П. Малевский, Л.М. Терещенко – М.: Машиностроение, 1977. – 263 с.
2. Никитков, В.Б. Скоростная алмазная обработка деталей из технической керамики / Н.В. Никитков, В.Б. Рабинович, В.Н. Суботин, Н.Н. Шепилов. Под.ред. З.И. Кремня. – Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1984. – 131 с.
3. Малкин, С. Механизмы образования стружки и снижение прочности керамики при шлифовании /С. Малкин, Дж. И.Риттер // Конструирование и технология машиностроения. Труды американского общества инженеров-механиков. – 1990. – № 3. – С. 115-124.

4. Полтавец, В.В. Повышение степени управляемости технологической системой шлифования кругами из сверхтвердых материалов за счет воздействий на характеристики инструмента / В.В. Полтавец // Научные труды ДонНТУ. Серия Машиностроение и машиноведение. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – Вып. 6 (54). – С. 79-86.
5. А.с. 967784 СССР, МКИ В24В 53/00. Способ правки алмазно-абразивного инструмента / В.В. Бурмистров; заявитель Донецкий технический университет. – №3296283/25; заявл.08.06.81; опубл. 23.10.82, Бюл. № 39. – 4 с.
6. А.с. 1839393 СССР А1, МПК МКИ В 24 В 53/50. Способ правки абразивного инструмента / В.В. Бурмистров, А.В. Байков, А.Н. Емельянов, Л.П. Калафатова, А.Д. Хроменко; заявитель Донецкий технический университет. – №4765299. Заявлено 14.12.89; опубл. 27.08.95, Бюл. № 47-48. – 2 с.
7. Пат. 4712334 USA, В 24 В 55/02. Anti-clogging device for grinding wheel / Yasuo Ikezaki, Tadashi Matsuoka, Kazuyuki Mitani; Заявитель и патентообладатель Toshiba Tungaloy Co., Ltd.; Science&Creative Co., Ltd., Toyomitsu Kogyo Co., Ltd. – 901198; заявлено 28.08.1986; опубл. 15.12.1987. – 3 с.
8. Федорович, В.А. Динамика изменения параметров рабочей поверхности круга при шлифовании СТПМ // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков: ХГПУ, 2000. – Вып. № 56 – С. 154-163.
9. Сизый, Ю.А. Предельная глубина заделки абразивного зерна в связке шлифовального круга/ Ю.А. Сизый, Д.В. Сталинский, А.Ю. Пирогов // Сучасні технології у машинобудуванні. – Том 1. – Харків: НТУ «ХПИ», 2006. – С. 193-211.
10. Богомоллов, Н.И. О связи механических и эксплуатационных свойств абразивных и алмазных материалов // Синтетические алмазы – ключ к техническому прогрессу. – К.: Наукова думка, 1977. Ч.1. – С. 99-104.
11. Каталог продукции ПАО «Запорожский абразивный комбинат». – Режим доступа: abrasives-corundum.ru/katalog-produktsii-31.html
12. Гусев, В.В. Влияние прочности удержания абразивных зерен в связке бруска для правки на режущую способность алмазного шлифовального круга / В.В. Гусев, Л.К. Савченко, А.Л. Медведев // Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. Серія: Машинобудування та транспорт. – Севастополь: СевНТУ, 2011. – Вип. 118. – С. 27-31.
13. Гусев, В.В. Выбор материала притира при правке свободным абразивом / В.В. Гусев, Лазарев Д.С., Моисеев Д.А// Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2018. – Вып. № 1 (60). – С. 25-29.
14. Матюха, П.Г. Определение оптимального интервала времени между электроэрозионными воздействиями на рабочую поверхность круга при алмазном шлифовании твердого сплава / П.Г. Матюха, В.В. Полтавец, В.Б. Стрелков // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2006. – Вып. 31. – С. 203-209.
15. Гусев, В.В. О распределении параметров срезов при глубинном круглом шлифовании периферией круга // Резание и инструмент в технологических системах: Межд. научн.-техн. сборник. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2003. – Вып. 65. – С. 37-46.

АВТОРЫ

Гусев В.В., 283005, г. Донецк-5, ул. Пухова, 35, кв. 86; зав. кафедрой «Мехатронные системы машиностроительного оборудования» ДонНТУ; тел. +380990776274; e-mail: vladilgusev@mail.ru.

Лазарев Д.С., 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, магистр кафедры «Мехатронные системы машиностроительного оборудования» ДонНТУ; тел. +380623010807; e-mail: mc@mech.dgtu.donetsk.ua

Моисеев Д.А., 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, аспирант кафедры «Мехатронные системы машиностроительного оборудования» ДонНТУ; тел. +380623010807; e-mail: mc@mech.dgtu.donetsk.ua

THE AUTHORS

Gusev V.V., 283005, Donetsk-5, Puhova str., 35, Apt. #86; head of department «Mechatronic systems of engineering equipment», tel. +380990776274; e-mail: vladilgusev@mail.ru.

Lazarev D.S., 283001, Donetsk, Artema str., 58, magister of department «Mechatronic systems of engineering equipment» DonNTU; tel. +380623010807; e-mail: mc@mech.dgtu.donetsk.ua

Moiseev D.A., 283001, Donetsk, Artema str., 58, graduate student of department «Mechatronic systems of engineering equipment»; tel. +380623010807; e-mail: mc@mech.dgtu.donetsk.ua

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛА ПРОЧНОСТИ СТАЛЕЙ В УСЛОВИЯХ ШЛИФОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДИКИ Л.В. АНДРЕЮКА

DETERMINATION OF STEEL MAXIMUM STRENGTH AT GRINDING CONDITIONS THROUGH THE USE OF L.V. ANDREYUK PROCEDURE

ПОЛТАВЕЦ В.В.

(ГОУВПО «ДонНТУ», г. Донецк, ДНР)

POLTAVETS V.V.

(SEEHPE «DonNTU», Donetsk, DPR)

Аннотация: Показана возможность определения предела прочности стали при шлифовании с использованием формулы Л.В. Андреюка путём введения поправок, учитывающих скорость деформации при обработке резанием.

Summary: Possibility of determination of steel maximum strength at grinding with use of L.V. Andreyuk formula is proved by addition of correction rates, considering deformation speed at cutting.

Ключевые слова: сопротивление деформированию, шлифование, скорость деформации.

Keywords: strain resistance, grinding, strain rate.

Введение

Для прогнозирования энергосиловых параметров процесса и показателей качества механически обрабатываемых изделий машиностроения важное значение имеет определение сопротивления обрабатываемого материала деформированию в фактических (традиционно называемых «истинными») условиях деформирования. Графические, графоаналитические и численные модели сопротивления металлов деформированию учитывают четыре основных фактора: химический состав металла, температуру, степень и скорость деформации [1-3]. Наиболее детализированные методики определения истинного сопротивления деформации, пределов текучести и прочности, учитывающие перечисленные факторы и основанные на результатах математической обработки большого количества экспериментальных данных, разработаны для условий холодной и горячей прокатки металлов и сплавов [3].

При технологической подготовке прокатного производства широко используются методики Зюзина В.И. [4, 5], Третьякова А.В. [6], Андреюка Л.В. [7-9], Шиды С. (Shida S.) [10]. Основная сложность применения всех указанных методик для определения сопротивления обрабатываемого материала деформированию в условиях обработки резанием состоит в том, что скорости деформации, характерные для процесса обработки металлов резанием (при лезвийной обработке в зоне резания скорость деформации достигает 10^6 с^{-1} , а

при шлифовании – 10^7 с^{-1}) при пластометрических исследованиях недостижимы [11] и, соответственно, в результаты расчетов необходимо вносить поправки, которые учитывают отличие скоростей деформации при обработке резанием от значений, принятых при выводе расчётных зависимостей авторами методик.

В связи с непрерывным совершенствованием технологии и оборудования обработки давлением постоянно ведутся исследования по совершенствованию методик определения сопротивления материала деформированию и уточнению условий их применения [12]. Так, в работе [13] предложена модификация расчётной модели Шиды С., состоящая в повышении верхней границы диапазона изменения скоростей деформирования до значения 3000 с^{-1} , а в работах [14, 15] формула Андреюка Л.В. дополнена коэффициентом влияния фазовых превращений и коэффициентом коррекции по скорости и степени деформации.

В работе [16] исследована возможности распространения методики Зюзина В.И. и Третьякова А.В., основанной на определении термомеханических коэффициентов, на область изменения температурно-скоростных факторов при обработке резанием на примере труднообрабатываемых средне- и высоколегированных хромоникелевых сталей и предложены поправки к расчётным формулам на условия деформирования при шлифовании. Целью данной работы является исследование точности расчёта сопротивления сталей деформированию при обработке шлифованием по оригинальной формуле Л.В. Андреюка и по той же формуле, включающей современные дополнения к ней, а также определение поправок к соответствующим расчётным формулам, учитывающих скорости деформации при обработке шлифованием.

Сущность методики Л.В. Андреюка и дополнений к ней

Для определения истинного сопротивления деформации Л.В. Андреюком предложена зависимость:

$$\sigma_u = S \cdot \sigma_{0d} \cdot u^a \cdot (10\varepsilon)^b \cdot (T/1000)^c, \quad (1)$$

где σ_{0d} – среднее или базисное сопротивление деформации σ_{0d} ; в работах [8, 9] принято при следующих термомеханических параметрах: $u = 1 \text{ с}^{-1}$, $\varepsilon = 0,1$ и $T = 1000 \text{ °C}$;

u – скорость деформации; ε – относительная деформация; T – температура деформации;

S , a , b , c – постоянные числа, определяемые для каждой марки стали по результатам испытаний на пластометре.

В соответствии с положениями теории прокатки истинное сопротивление деформации в русскоязычной технической литературе определяется как «истинный предел текучести» σ_m [15, 17], в англоязычной – как «среднее напряжение текучести» (Mean Flow Stress, MFS) [18].

В работе [8] предложены зависимости для расчёта постоянных чисел в формуле (1) по химическому составу сталей и сплавов. В этих зависимостях учтены 13 основных легирующих и микролегирующих элементов. Диапазон

практического применения формулы (1) по трём оставшимся факторам составляет: $u = 0,01-150 \text{ с}^{-1}$; $\varepsilon = 0,05-0,3$; $T = 800-1300 \text{ }^\circ\text{C}$.

В работе [15] с целью применения методики Л.В. Андреюка для моделирования прокатки при температуре ниже $800 \text{ }^\circ\text{C}$ в уравнение (1) добавлен коэффициент K_s , учитывающий влияние фазовых превращений в стали.

С учетом указанного дополнения формула (1) принимает вид:

$$\sigma_{\dot{\varepsilon}} = \frac{S \cdot \sigma_{0\ddot{a}}}{K_s} \cdot u^a \cdot (10\varepsilon)^b \cdot \left(\frac{T}{1000} \right)^c, \quad (2)$$

где

$$K_s = \begin{cases} 0,4619 + 0,1327 \frac{T}{100} & \text{при } T < 700^\circ \text{C}; \\ 2,0265 \frac{T}{100} - 12,749 & \text{при } 700 \leq T \leq 750^\circ \text{C}; \\ 21,835 - 2,5307 \frac{T}{100} & \text{при } 750 \leq T \leq 800^\circ \text{C}; \\ 4,632 - 0,667 \frac{T}{100} + 0,0305 \left(\frac{T}{100} \right)^2 & \text{при } T > 800^\circ \text{C}. \end{cases}$$

Коэффициент, учитывающий погрешности значений степени и скорости деформации относительно средних значений этих же параметров, в работе [15] предлагается рассчитывать по регрессионным зависимостям, полученным либо при конечно-элементном моделировании процесса прокатки на широкополосном стане горячей прокатки, либо при уточнении результатов моделирования с использованием экспериментальных данных о параметрах процесса, полученных из АСУ ТП стана прокатки крупногабаритных листов из низколегированной стали. На основании того, что конечно-элементное моделирование процесса прокатки проводилось для значений термомеханических параметров, характерных для процесса горячей прокатки и существенно отличающихся от значений аналогичных параметров процесса обработки резанием, для дальнейшего исследования примем формулу (2), включающую коэффициент K_s .

Анализ результатов расчётов по формуле Л.В. Андреюка и определение соответствующих поправок

Возможность применения методики Л.В. Андреюка для определения механических характеристик сталей при резании проверим на примере сталей марок 30ХГСНА, 18Х2Н4ВА.

Значения постоянных величин уравнения (1) для указанных марок сталей приведены в табл. 1.

Таблица 1. Значения постоянных величин для определения сопротивления сталей деформации по уравнению (1) [9]

Марка стали	S	σ_0 , МПа	a	b	$-c$
30ХГСНА	1,051	97,6	0,116	0,140	3,42
18Х2Н4ВА	0,971	107	0,117	0,165	2,73

Возможная ошибка определения сопротивления деформации по зависимости (1) оценивается как $\pm 4\%$ с доверительной вероятностью 0,95 [9].

Уравнение (1) для стали 30ХГСНА получим по данным табл. 1, приняв максимальную из диапазона применения формулы (1) степень деформации $\varepsilon = 0,30$, скорость деформации $\dot{\varepsilon} = 100 \text{ с}^{-1}$. Таким образом, зависимость предела текучести стали 30ХГСНА от температуры будут иметь вид (по оригинальной формуле Л.В. Андреюка):

$$\begin{aligned}\sigma_m &= 1,051 \cdot 97,6 \cdot 100^{0,116} \cdot (10 \cdot 0,3)^{0,140} \cdot (T/1000)^{-3,42}; \\ \sigma_m &= 204,10 \cdot (T/1000)^{-3,42};\end{aligned}\quad (3)$$

Сопоставим значения предела текучести, рассчитанные по уравнению (3), с данными С.Н. Корчака [19] для разрушающего напряжения стали 30ХГСНА в температурно-скоростных условиях процесса шлифования (табл. 2).

Таблица 2. Пределы текучести стали 30ХГСНА, рассчитанные по формуле Л.В. Андреюка, и разрушающее напряжение стали 30ХГСНА при шлифовании

Температура T , К	Предел текучести стали 30ХГСНА σ_m , МПа (формула Л.В. Андреюка [9])	Разрушающее напряжение в условиях шлифования стали 30ХГСНА σ_b , МПа (по данным С.Н. Корчака [19])	Разность значений механических характеристик стали 30ХГСНА в условиях шлифования $\Delta\sigma$, МПа
873	1171	1927	756
973	691	1590	899
1073	438	1253	815
1173	293	1189	896
1273	204	1125	921
1373	147	1011	864
1473	109	896	787

Аппроксимируем разность значений механических характеристик стали 30ХГСНА показательной зависимостью вида

$$\Delta\sigma = d \cdot m^T, \quad (4)$$

где d и m – постоянные коэффициенты.

Значения постоянных коэффициентов зависимости (4), определённых с помощью функции экспоненциальной аппроксимации ЛГРФПРИБЛ () табличного процессора Excel, составляют: $d = 0,9999$, $m = 979$.

Таким образом, при введении поправки вида (4) зависимость разрушающего напряжения стали 30ХГСНА от температуры при скорости деформации в условиях шлифования можно представить в следующем виде:

$$\sigma_{\sigma} = 204,10 \cdot (T/1000)^{-3,42} + 979. \quad (5)$$

Определим погрешность расчета разрушающего напряжения по зависимости (5) по сравнению с экспериментальными данными С.Н. Корчака (рис. 1).

Как видно из рис. 1, в температурном диапазоне 600-1200 °С применение формулы Л.В. Андреюка с учетом принятой поправки позволяет определять значения механических характеристик стали 30ХГСНА в условиях деформирования при шлифовании, которые весьма близки к экспериментальным данным С.Н. Корчака.

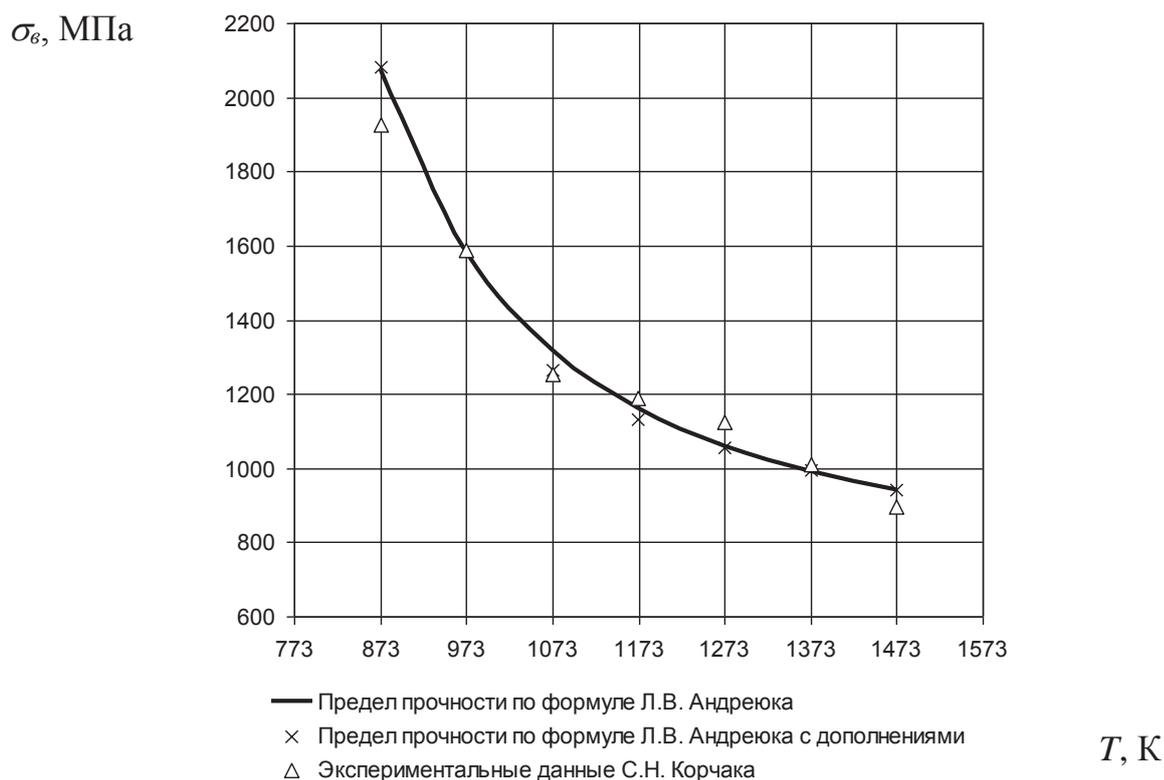


Рисунок 1. Разрушающее напряжение (предел прочности) стали 30ХГСНА, определённое по формуле Л.В. Андреюка, в температурно-скоростных условиях шлифования

Максимальная погрешность определения разрушающего напряжения (предела прочности) при этом не превышает 8%. Введение дополнительного коэффициента K_s , учитывающего влияние фазовых превращений в стали, не приводит к повышению точности расчёта предела прочности (максимальная погрешность определения σ_{σ} во всех исследованных точках при использовании дополненной формулы Л.В. Андреюка находится в пределах до 8 %).

Уравнение (1) для стали 18Х2Н4ВА получим по данным табл. 1, приняв степень деформации и скорость деформации аналогичными указанным ранее. Зависимость предела текучести стали 18Х2Н4ВА от температуры будет иметь вид (по оригинальной формуле Л.В. Андреюка):

$$\begin{aligned} \sigma_m &= 0,971 \cdot 107 \cdot 100^{0,117} \cdot (10 \cdot 0,3)^{0,165} \cdot (T/1000)^{-2,73}, \\ \sigma_m &= 213,47 \cdot (T/1000)^{-2,73}. \end{aligned} \quad (6)$$

Сравним значения предела текучести, рассчитанные по уравнению (6) с данными С.Н. Корчака [19] для разрушающего напряжения стали 18Х2Н4ВА в температурно-скоростных условиях для процесса шлифования (табл. 3).

Таблица 3. Пределы текучести стали 18Х2Н4ВА, рассчитанные по формуле Л.В. Андреюка, и разрушающее напряжение стали 18Х2Н4ВА при шлифровании

Температура T , К	Предел текучести стали 18Х2Н4ВА σ_m , МПа (формула Л.В. Андреюка [9])	Разрушающее напряжение в условиях шлифования стали 18Х2Н4ВА σ_s , МПа (по данным С.Н. Корчака [19])	Разность значений механических характеристик стали 18Х2Н4ВА в условиях шлифования $\Delta\sigma$, МПа
873	861	3747	2886
973	565	2866	2301
1073	393	1985	1592
1173	285	1701	1416
1273	213	1417	1204
1373	165	–	–
1473	130	–	–

Аналогично ранее рассмотренному случаю исследования сопротивления деформации стали 30ХГСНА зависимость разрушающего напряжения стали 18Х2Н4ВА от температуры при скорости деформации в условиях шлифования при введении поправки вида (4) представим следующим образом (рис. 2):

$$\sigma_s = 213,47 \cdot (T/1000)^{-2,73} + 10653 \cdot 0,9978^T. \quad (7)$$

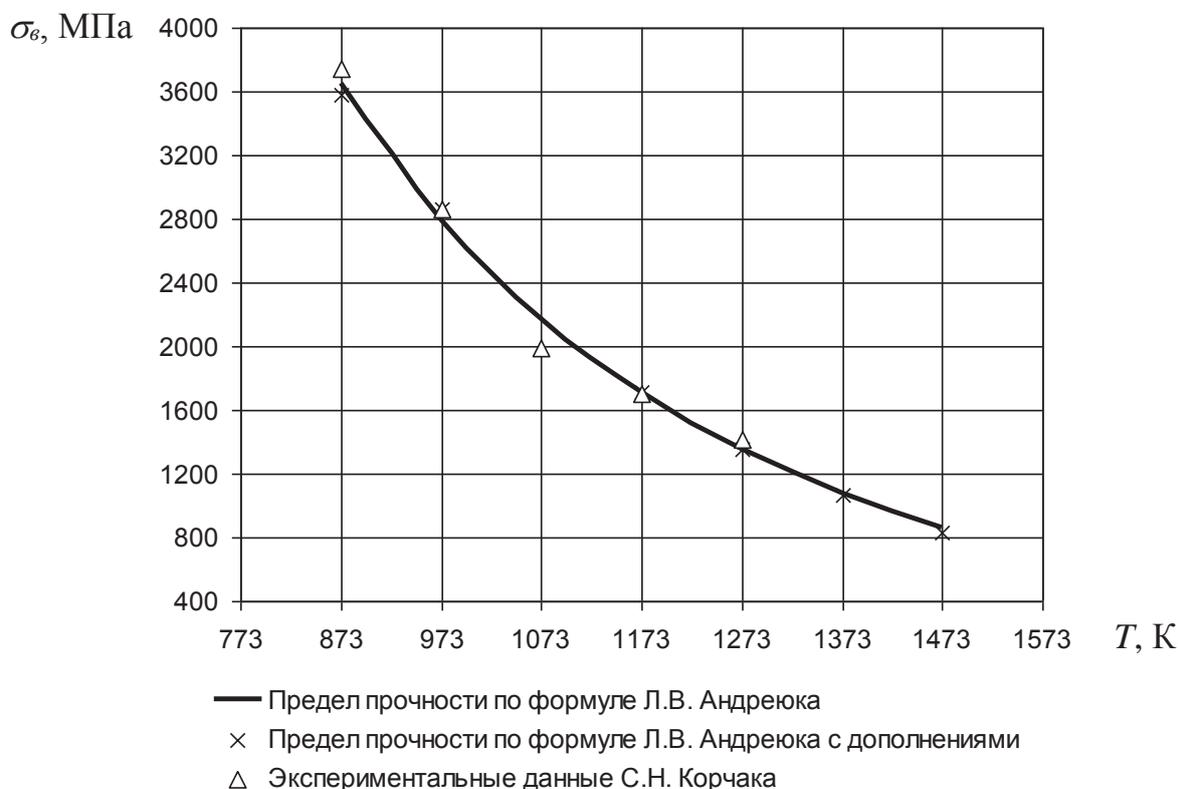


Рисунок 2. Разрушающее напряжение (предел прочности) стали 18Х2Н4ВА, определённое по формуле Л.В. Андреюка, в температурно-скоростных условиях шлифования

Определим погрешность расчета предела прочности по зависимости (7) по сравнению с экспериментальными данными С.Н. Корчака. Как и в предыдущем случае, в соответствии с рис. 2 в температурном диапазоне 600-1200°C применение формулы Л.В. Андреюка с учетом принятой поправки позволяет определять значения механических характеристик стали 18Х2Н4ВА в условиях деформирования при шлифовании с достаточной для практических целей точностью. Максимальная погрешность определения разрушающего напряжения (предела прочности) по сравнению с экспериментальными данными С.Н. Корчака составляет 10%. Введение дополнительного коэффициента K_s приводит к некоторому повышению точности расчёта (максимальная погрешность определения σ_s во всех исследованных точках при использовании дополненной формулы Л.В. Андреюка не превышает 5 %).

ВЫВОДЫ

1. Показана возможность определения сопротивления деформации средне- и высоколегированных конструкционных сталей в условиях шлифования с использованием формулы Л. В. Андреюка путём введения поправок, учитывающих отличие в скорости и степени деформации при обработке шлифовальным инструментом.

2. Погрешность определения разрушающего напряжения (предела прочности) при использовании формулы Л. В. Андреюка находится в пределах 8-10 % по сравнению с экспериментальными данными, полученными для температурно-скоростных условий шлифования.

3. Использование дополнений к формуле Л.В. Андреюка, учитывающих влияние фазовых превращений в стали на её сопротивление деформации, не является принципиальным для повышения точности расчёта разрушающего напряжения (предела прочности в температурно-скоростных условиях шлифования); вопрос о целесообразности применения указанного дополнения следует рассматривать по отдельности для каждой марки стали или группы сталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Целиков, А.И. Основы теории прокатки / А.И. Целиков. – М.: Металлургия. 1965. – 247с.
2. Хензель, А. Расчёт энергосиловых параметров в процессах обработки металлов давлением / А. Хензель, Т. Шпиттель. – М.: Металлургия, 1982.–360 с.
3. Коновалов, Ю.В. Расчет параметров листовой прокатки. Справочник / Ю.В. Коновалов, А.Л. Остапенко, В.И. Пономарев. – М.: Металлургия, 1986. – 430 с.
4. Зюзин, В.И. Исследование сопротивления деформации сталей при горячей прокатке / В.И. Зюзин // Сб. научн. тр. ВНИИМетмаш. – № 8. – М.: ВНИИМетмаш, 1963. – С. 74-89.
5. Зюзин, В.И. Сопротивление деформации сталей при горячей прокатке / В.И. Зюзин, М.Я. Бровман, А.Ф. Мельников. – М.: Металлургия, 1964. – 270 с.
6. Третьяков, А.В. Механические свойства металлов и сплавов при обработке металлов давлением: Справочник / А.В. Третьяков, В.И. Зюзин. – М.: Металлургия, 1973. – 224 с.
7. Андреюк, Л.В. Сопротивление деформации сталей и сплавов / Л.В. Андреюк, Г.Г. Тюленев // Теория и практика металлургии: Науч. тр. НИИМ. Сб. № 11. – Челябинск: Южно-Уральское книж. изд.-во, 1970. – С. 101-123.

8. Андреюк, Л.В. Аналитическая зависимость сопротивления деформации сталей и сплавов от их химического состава / Л.В. Андреюк, Г.Г. Тюленев, Б.С. Прицкер // *Сталь*. – 1972. – № 6. – С. 522-523.
9. Андреюк, Л.В. Аналитическая зависимость сопротивления деформации металла от температуры, скорости и степени деформации / Л.В. Андреюк, Г.Г. Тюленев // *Сталь*. – 1972. – № 9. – С. 825-828.
10. Shida, S. Effect of Carbon Content, Temperature and Strain Rate on Compressive Flow Stress of Carbon Steels / Hitachi Research Laboratory Report. – 1974. – P. 1-9.
11. Лабер, К.Б. Влияние температурно-скоростных условий на сопротивление деформации углеродистой низколегированной стали / К.Б. Лабер, Х.С. Дья, А.М. Кавалек, А.А. Богатов, Д.Ш. Нухов // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. – 2016. – Том 59. № 9. – С. 610 – 614.
12. Johnson, G.R. A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates, and High Temperatures / G.R. Johnson, W.H. Cook // *Proceedings 7th International Symposium on Ballistics, The Hague, 19-21 April 1983*. – P. 541-547.
13. Lee, Y. A study for the constitutive equation of carbon steel subjected to large strains, high temperatures and high strain rates / Y. Lee, B.M. Kim, K.J. Park, S.W. Seo, O. Min // *Journal of Materials Processing Technology. Volumes 130-131, 20 December 2002*. – P. 181-188.
14. Самохвал, В.М. Аналіз математичних моделей опору деформуванню для умов високошвидкісних блоків дротових станів / В.М. Самохвал, М.М. Штода, К.К. Марченко // *Математичне моделювання*. – 2018. – № 1 (38). – С. 46-54.
15. Румянцев, М.И. Опыт совершенствования методики Л.В. Андреюка для расчета напряжения текучести при горячей листовой прокатке / М.И. Румянцев, В.И. Белов, И.А. Разгулин // *Калибровочное бюро*. – 2015. Выпуск 5. – С. 73-85.
16. Полтавец, В.В. Определение сопротивления деформации хромоникелевых сталей в условиях шлифования с помощью термомеханических коэффициентов/ В.В. Полтавец // *Научные труды ДонНТУ. Серия Машиностроение и машиноведение. Выпуск 5 (139)*. – Донецк: ДонНТУ, 2008. – С. 68-74.
17. Чекмарев, А.П. Истинное сопротивление пластическому деформированию углеродистых сталей при высоких температурах и скоростях деформации / А.П. Чекмарев, З.А. Риднер // *В сб.: Прокатное производство*. – Киев: изд-во АН УССР, 1957. – Т. II, вып. 2. – С. 18-32.
18. Armstrong, R.W. High strain rate properties of metals and alloys / R.W. Armstrong, S.M. Walley // *Journal International Materials Reviews Volume 53, 2008*. – Issue 3. – Published online: 18 Jul 2013. – P. 105-128.
19. Корчак, С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей / С.Н. Корчак. – М.: Машиностроение, 1974. – 280 с.

АВТОРЫ

Полтавец В.В., 283001, г. Донецк, бул. Пушкина, 27, кв. 28; доцент кафедры «Мехатронные системы машиностроительного оборудования» ДонНТУ; тел. +380504712726; e-mail: vvardon@mail.ru.

THE AUTHORS

Poltavets V.V., 283001, Donetsk, Pushkina Bvd., 27, Apt. #28; assistant prof. of department «Mechatronic systems of engineering equipment» DonNTU; tel. +380504712726; e-mail: vvardon@mail.ru.

**ПРИМЕНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ СТРАТЕГИЙ ОБРАБОТКИ ПРИ
ЧИСТОВОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ ПЛОСКОСТЕЙ НА СТАНКАХ
С ЧПУ**

**THE USE OF DIFFERENT MACHINING STRATEGIES IN FINISH FACE
MILLING MACHINES WITH CHPU**

ТЕРЕНТЬЕВ Е. А.

*(Чувашский Государственный Университет им. И.Н. Ульянова, г.Чебоксары,
Российская Федерация)*

TERENTIEV E. A.

*(Chuvash State University named after I.N. Ulyanov, Cheboksary, Russian
Federation)*

***Аннотация.** Данная работа рассматривает различные стратегии обработки плоскости при постоянных режимах резания для чистовой фрезерной обработке плоских поверхностей.*

***Abstract.** This paper considers different strategies of plane machining under constant cutting conditions for finishing milling of flat surfaces.*

***Ключевые слова:** фрезерование, подача, траектория движения инструмента, САМ системы, ЧПУ*

***Keywords:** milling, filing, the tool path, Cam system, CAD, CNC*

При фрезеровании плоских поверхностей на станках с ЧПУ часто стоят задачи по высокой заданной шероховатости у обрабатываемой поверхности, достигаемой чистовым фрезерованием. Конструктивно данные плоские поверхности могут присутствовать на различных уступах детали, на ее присоединительных плоскостях или рабочей плоской поверхности детали, а так же на плоскости дна углубления, выполненного на детали.

Для фрезерной обработки плоских поверхностей различные САМ системы предлагают различные траектории движения инструмента. В руководстве по обработке в САМ системе АДЕМ [1], данные траектории названы стратегиями. Эти стратегии хоть и не стандартизированы, и в различных САМ системах имеют разные названия, но одинаковы по принципу построения окончательной траектории движения инструмента.

При фрезеровании различают встречное фрезерование (фрезерование против подачи) показано на рис.1 а и попутное фрезерование (фрезерование по подаче) показано на рис.1 б. При встречном фрезеровании процесс резания происходит спокойнее, так как толщина среза нарастает плавно и нагрузка на станок нарастает также постепенно. При попутном фрезеровании в момент

входа зуба в контакт с обрабатываемой заготовкой сказывается удар, так как именно в этот момент будет максимальная толщина среза.

Кроме того, при попутном фрезеровании заготовка за счет силы резания прижимается к столу, а стол — к направляющим, что обеспечивает лучшее качество поверхности, выраженное параметром шероховатости [2].

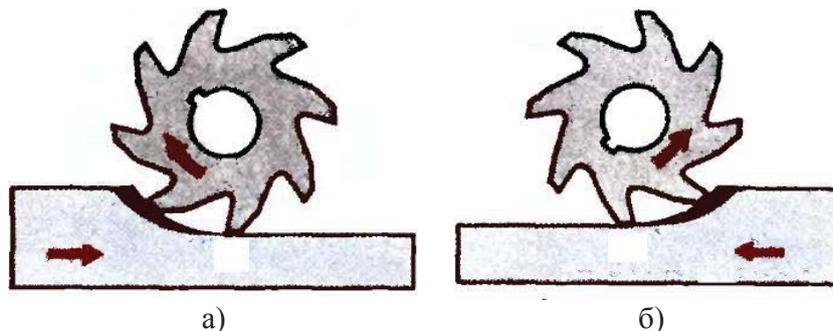


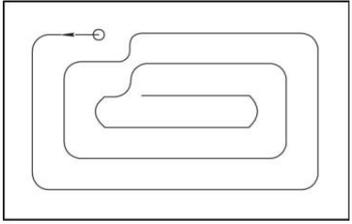
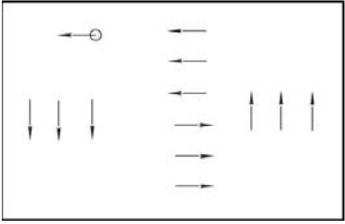
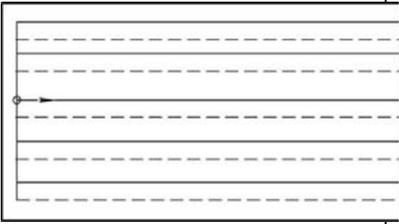
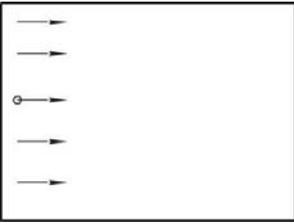
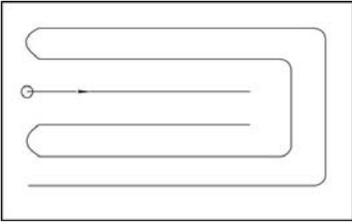
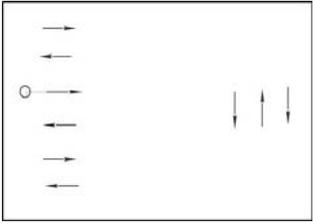
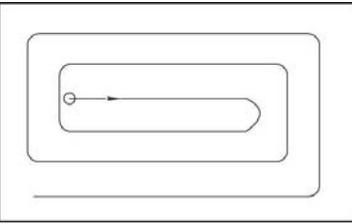
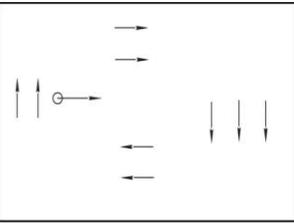
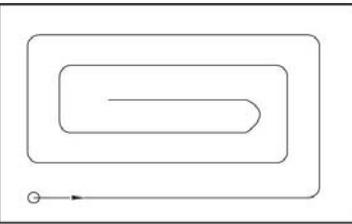
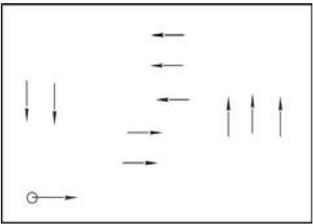
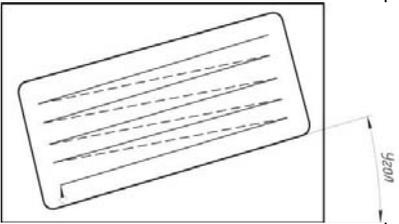
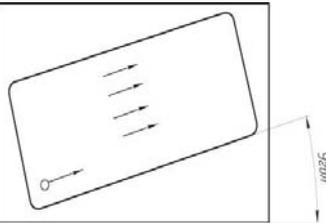
Рис. 1. Схемы фрезерования

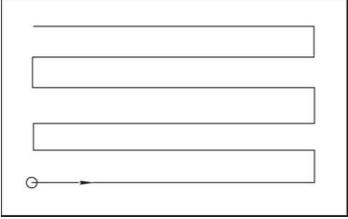
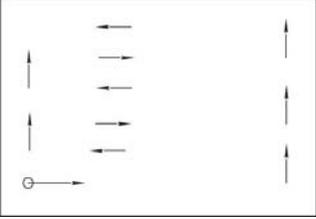
Следовательно, при одних и тех же режимах обработки, но различных типах фрезерования значение шероховатости может отличаться, что не допустимо при чистовой обработке требующей высокой класс чистоты поверхности. Чистовым фрезерованием, возможно, получить значение шероховатости равное по Ra 0.8мкм [3]. Так же будут возникать различия в направлении рисунка шероховатости, что порой так же недопустимо при чистовой обработке ответственной плоскости детали, если оно оговорено в технических требованиях к чертежу детали.

Приведем в таблице 1 несколько самых распространенных из стратегий обработки, с названиями из руководства по CAM ADEM. Так же рассмотрим направление подачи в данных стратегиях, при осуществлении движения инструмента связанного с резанием материала. Направление рабочей подачи указано стрелками, основные ходы по перемещению инструмента – основной линией, вспомогательные перемещения инструмента – пунктирной линией.

Таблица 1
Основные стратегии обработки плоских поверхностей на станках с ЧПУ,
с указанием направления рабочей подачи

Наименование стратегии обработки	Эскиз стратегии обработки плоскости	Направление рабочей подачи при применении данной стратегии	Описание данной стратегии
Эквидистантная			Эквидистантная обработка конструктивного элемента от центра к границам плоскости

<p>Обратная Эквидистан- нта</p>			<p>Эквидистант-ная обработка от границ конструктивного элемента к центру</p>
<p>Петля эквидистан- тная</p>			<p>обработка по ленточной спирали с сохранением выбранного (встречное или попутное) направления фрезерования</p>
<p>Зигзаг эквидистан- тный</p>			<p>обработка по ленточной спирали с чередованием встречного и попутного направления фрезерования</p>
<p>Спираль</p>			<p>обработка конструктивного элемента типа плоскость по спирали от центра к границам плоскости</p>
<p>Обратная спираль</p>			<p>обработка по спирали от границ конструктивного элемента к центру</p>
<p>Петля угловая</p>			<p>обработка с сохранением выбранного (встречное или попутное) направления фрезерования.</p>

			Направление обработки задается параметром Угол, который определяет угол разворота плоскостей от оси X в градусах.
Зигзаг			обработка с чередованием встречного и попутного направления фрезерования.

Как видно из рисунков траекторий движений инструмента, приведенных в таблице 1, только некоторые стратегий обработки реализуют фрезерование всей плоскости в одном направлении, то есть с одним типом подачи. Из рассмотренных выше стратегий обработки это: петля эквидистантная и петля угловая. У петли эквидистантной коэффициент смещения от контура может иметь значение чуть менее радиуса фрезы, что приведет к обработке только одним типом фрезерования попутным или встречным. Аналогично у петли угловой параметр, задающий размер между проходами инструмента может быть задан равным немного менее радиуса фрезы, что так же приведет к обработке только одним типом фрезерования попутным или встречным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сайт ADEM презентации и обучение. <http://adem.ru/support/presentations/>
2. Барбашов Ф.А. Фрезерное дело. Высшая школа, 1973. с.13
3. Аверченков В.И. Технология машиностроения. Сборник задач и упражнений. ИНФРА-М, 2006. Приложение 27, с.244

АВТОР

Терентьев Евгений Александрович – старший преподаватель кафедры технология машиностроения ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова. 428000 г. Чебоксары пр.Тракторостроителей д.33 кв.106, телефон 89276650317, e-mail - Genya_ms@mail.ru

AUTHOR

Terentyev Evgeny Alexandrovich - Senior Lecturer of the Department of Mechanical Engineering Technology, FSBEI HE "Chuvash State University. I.N. Ulyanova. 428000, Cheboksary, tractorostroiteley., 33 sq 106, 89276650317 phone, e-mail - Genya_ms@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПРЕЦИЗИОННОЙ ЛАЗЕНОЙ МИКРООБРАБОТКИ

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR PRECISION LASER MICROPROCESSING

РАТМАНОВ В.А.¹, ГАВРИЛОВ Г.Н.²

(¹ ПАО "Завод имени Г.И. Петровского" г. Нижний Новгород, Россия

² НГТУ им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия)

RATMANOV V.A.¹, GAVRILOV G.N.²

(¹ PJSC "Zavod imeni G. I. Petrovsky", Nizhny Novgorod, Russia

² Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev,
Nizhny Novgorod, Russia)

Аннотация. Рассмотрение вопросов оптимизации режимов лазерной обработки в связи с малыми (мкм) геометрическими параметрами реза.

Abstract. Consideration of optimization of laser processing modes in connection with small (μm) geometrical parameters of the cut.

Ключевые слова: прецизионная обработка, лазер, температурный режим, коэффициент поглощения, импульс.

Keywords: precision machining, laser, temperature regime, absorption coefficient, pulse

Целью исследования являлось установление возможности изготовления сквозного паза длиной 4 мм и шириной на просвет 30 мкм (0,030 мм) в стенке толщиной 0,3 мм детали из сплава Д16Т ГОСТ 4784-97 на оборудовании для лазерной маркировки.

Данная исследовательская работа выполнялась на базе ПАО «Завод имени Г.И. Петровского» и ФГБУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева».

Анализ литературы по данному вопросу позволил получить представление о теоретических основах и принципах работы лазерного оборудования, что, в свою очередь, дало возможность определить факторы, влияющие на качество лазерной обработки. Однако в литературе в качестве оборудования для прецизионной лазерной резки рассматриваются специальные нано-, пика- или фемтосекундные лазерные комплексы с дополнительной функцией поддува защитного газа в зону обработки. Новацией в данной области является использование воздействия лазера в сочетании с подачей в зону реза водяной струи под высоким давлением (технология LaserMicroJet). Все из перечисленных технологических решений очень эффективны, и в той же мере весьма дороги, в виду высокой стоимости данного оборудования [1, 2, 3.].

При проведении исследований в рамках работы, использовался стационарный комплекс лазерной маркировки LDesigner F2 (лазерный маркер), рисунок 1. Маркер оснащен импульсным иттербиевым волоконным лазером, предназначенным производителем для маркировки изделий из металлов, твердых сплавов, пластиков, таблица 1.

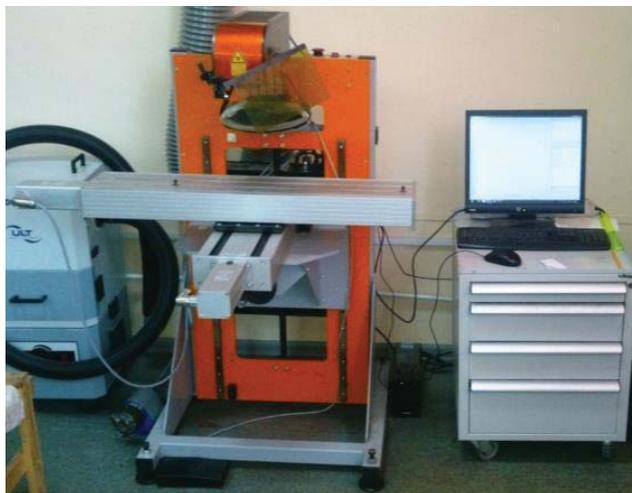


Рисунок 1 - Стационарный комплекс лазерной маркировки LDesigner F2.

Таблица 1 –Характеристики лазерного излучателя, комплекса LDesigner F2

Тип	импульсный иттербиевый волоконный лазер
Длина волны излучения	1,06...1,07 мкм
Максимальная средняя мощность излучения	100 Вт
Длительность импульса	100 нс
Частота импульсов	1,6...1000 кГц
Охлаждение	воздушное

В работе требовалось учитывать отсутствие систем подачи газа для удаления расплавленного материала и продуктов его испарения из зоны обработки при резании металла, защиты газа от окисления, и затрудненный отвод тепла в процессе обработки.

Контроль качества и размеров реза производился на оборудовании трёх типов:

- Стереоскопический микроскоп МБС-9 ТУ 3-3-1210-78;
- Универсальный цифровой микроскоп Keyence VHX-1000;
- Видеоизмерительная система Norgay NVM-3020D.

Исходя из анализа технических характеристик лазерного комплекса LDesigner F2, для обеспечения стабильности реза дополнительно рекомендуем сталь 12X18Н10Т ГОСТ 5632-72, обладающей оптимальным температурным режимом обработки и коэффициентом поглощения в зависимости от длины волны лазерного излучения.

Количество жидкой фазы пропорционально $\sqrt{a\tau}$, где a – коэффициент температуропроводности; τ – длительность лазерного импульса. Соответственно, минимальное количество жидкой фазы образуется при минимальной длительности импульса [1].

Количество жидкой фазы, удаляемой из зоны обработки (зоны реза) в ходе процесса за счет давления паров, должно быть максимальным, следовательно должно быть максимальным давление паров. Давление пара отдачи пропорционально $1/\tau$, то есть обратно пропорционально длительности импульса.

Наиболее важными параметрами лазеров являются:

- Вид воздействия – непрерывный или импульсный;
- Мощность излучения, P ;
- Длина волны, λ ;
- Длительность импульса, τ ;
- Частота следования импульсов, f ;
- Пространственные характеристики модовой структуры излучения;
- Расходимость пучка, α .

Длина волны должна лежать в области большой поглотительной способности материала, зависящей от оптических характеристик обрабатываемого материала. Для металлов – это длины волн видимой части спектра.

Длительность импульса, непосредственно влияет на качество лазерной обработки. От нее зависят следующие характеристики процесса лазерной обработки:

- Глубина проплавленного слоя, $x_{пл} \sim \sqrt{a\tau}$;
- Величина давления отдачи паров, $P_{и} \sim \frac{W_{и}}{\tau}$.

Рассмотрение вопросов оптимизации режимов лазерной обработки в связи с геометрическими параметрами реза, такими как толщина материала, точность и размер паза, сводится к тому что при выполнении работ на лазерном маркере LDesigner F2 нет возможности влиять на такие параметры установки, как тип лазера, тип оптической системы, форма и тип импульсов, однако их понимание важно для оценки влияния на качество резки других, управляемых параметров.

В результате исследовательской работы, установлены различные режимы изготовления деталей и произведены измерения, позволяющие дать оценку точности и стабильности обработки.

При проведении экспериментов, управляемые параметры комплекса для маркировки изменялись в диапазонах:

- мощность 20...100 Вт;
- скорость лазера 1...50 мм/с;
- задержка1 0,3...1,0 мс;
- задержка2 0,8...1,2 мс;
- задержка3 0,3...0,7 мс;
- частота 1600...100 000 Гц;
- коэффициент раскрутки луча 0,005...1,000; без раскрутки луча;
- количество импульсов 1...100 000;
- количество проходов 5...40.

Некоторые из экспериментов представлены на рисунках 2 и 3.

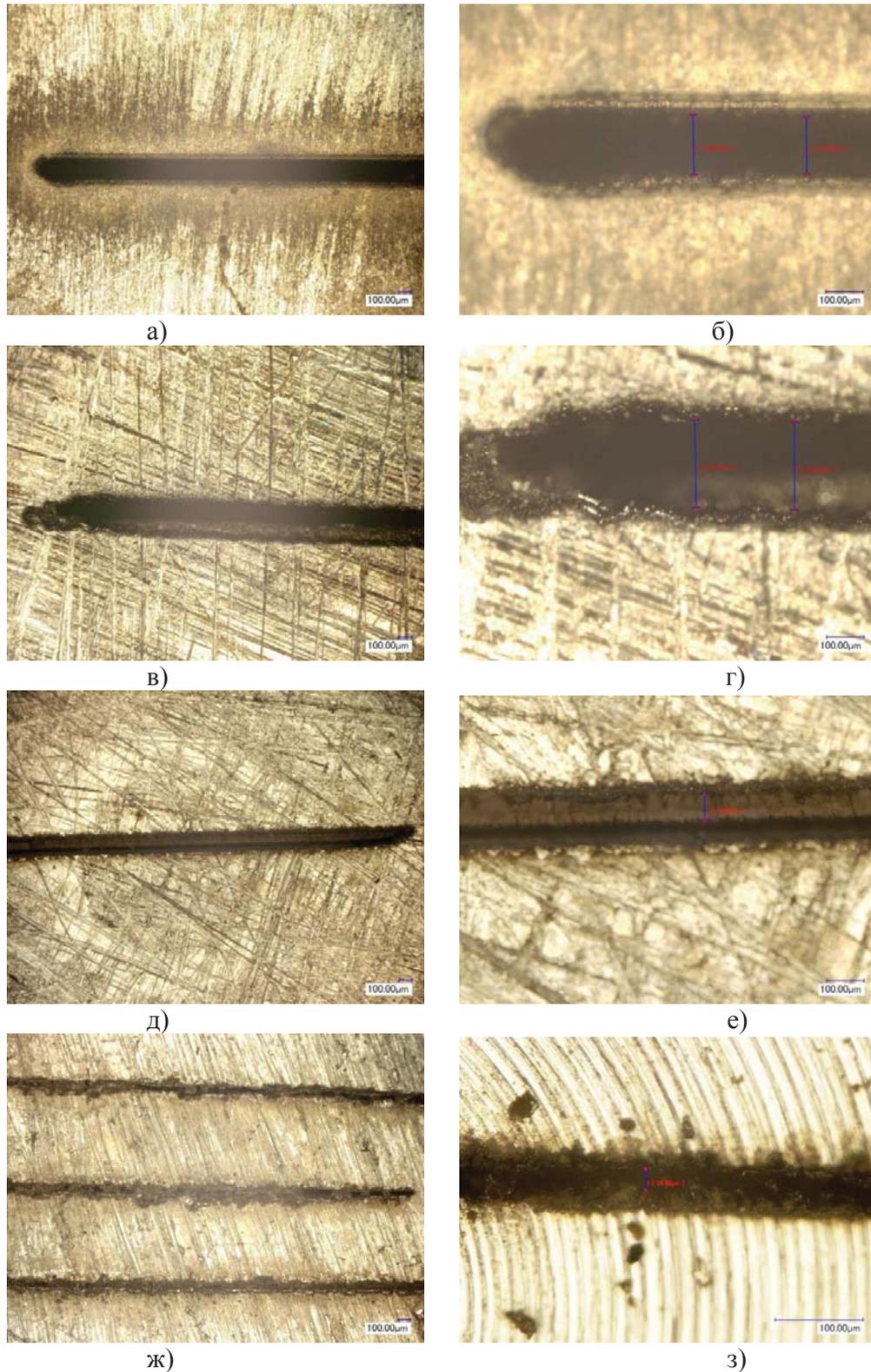


Рисунок 2 - Измерение реза в сплаве Д16Т ГОСТ 4784-97, измеритель - Кеупенс VHX-1000:

- а) $\times 100$, б) $\times 300$, вход луча, ширина 160,46 мкм, ровные кромки паза;
- в) $\times 100$, г) $\times 300$, вход луча, ширина 233,67 мкм, не ровные кромки паза;
- д) $\times 100$, е) $\times 300$, вход луча, ширина на просвет 72,56 мкм, тонкие спайки внутри паза;
- ж) $\times 100$, вход луча, нет чистоты реза, образование окислов на поверхности паза;
- з) $\times 700$, выход луча, min ширина 24,95 мкм, образование окислов внутри паза.

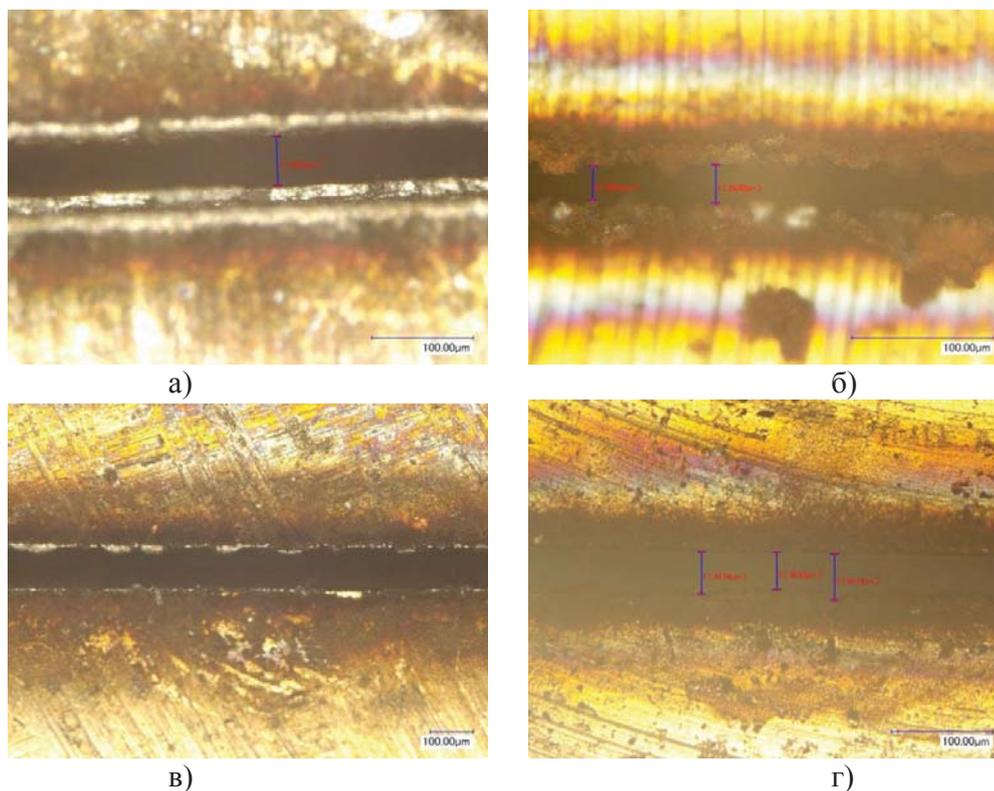
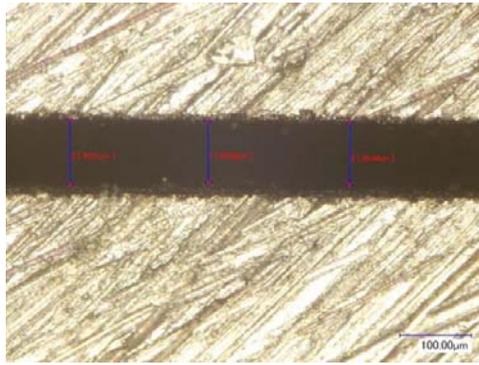


Рисунок 3 - Измерение реза в стали 12X18H10T ГОСТ 5632-7,
измеритель - Keyence VHX-1000:

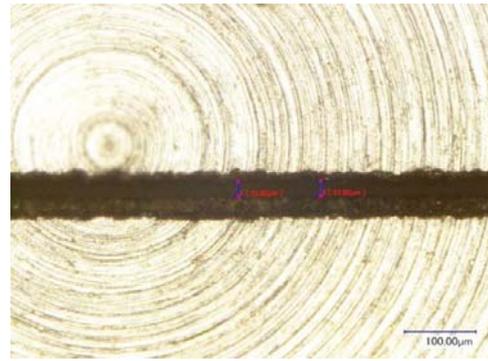
- а) $\times 700$, вход луча, дугообразные стенки по глубине паза, ширина на просвет 49,03 мкм;
- б) $\times 1000$, выход луча, min ширина 24,61 мкм, образование окислов в пазе;
- в) $\times 300$ вход луча, г) $\times 700$, выход луча, ширина 36,83-45,74 мкм, верхняя кромка паза ровная, нижняя кромка пилообразная.

Параметры универсального режима, для достижения приемлемого качества реза как в сплаве Д16Т ГОСТ 4784-97 рисунок 4, так и в стали 12X18H10T ГОСТ 5632-72 рисунок 5:

- мощность 80 Вт;
- скорость лазера 20 мм/с;
- задержка1 0,9 мс;
- задержка2 1,05 мс;
- задержка3 0,45 мс;
- частота 1600 Гц;
- без раскрутки луча;
- количество импульсов 1;
- количество проходов 20.

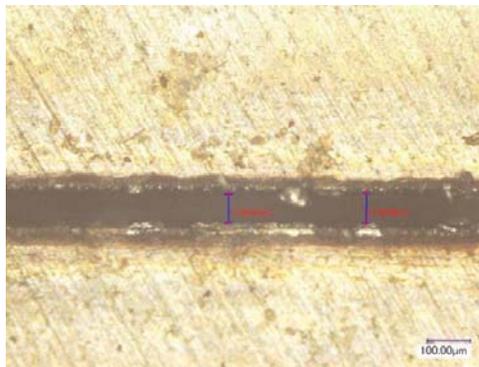


а)

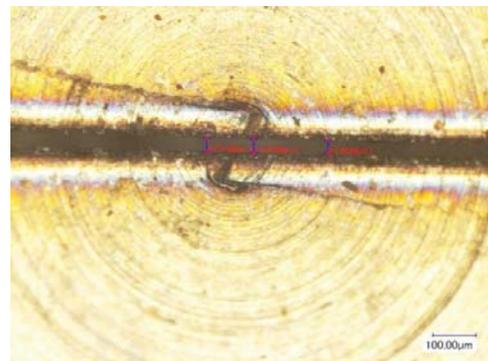


б)

Рисунок 4 - Измерение реза в сплаве Д16Т ГОСТ 4784-97, $\times 500$:
 а) вход луча, ширина 90,21 мкм, измеритель - Keyence VHX-1000;
 б) выход луча, ширина 21,82 мкм, измеритель - Keyence VHX-1000.



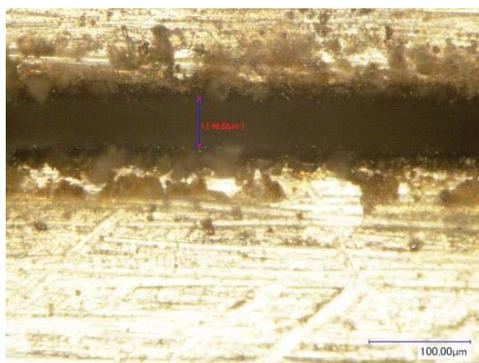
а)



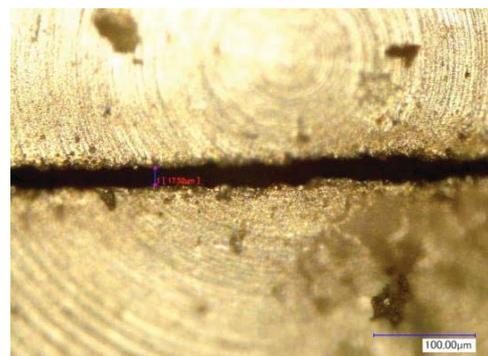
б)

Рисунок 5 - Измерение реза в стали 12Х18Н10Т ГОСТ 5632-7, $\times 300$:
 а) вход луча, ширина 68,36 мкм, измеритель - Keyence VHX-1000;
 б) выход луча, ширина 32,09 мкм, измеритель - Keyence VHX-1000.

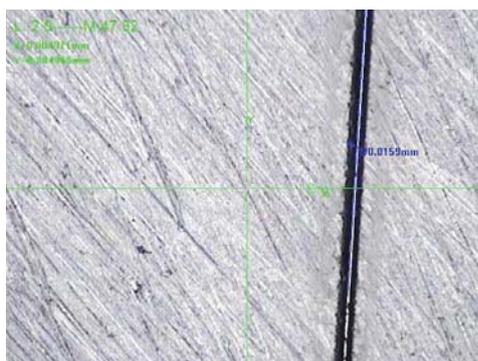
Специальный режим, для достижения минимальной ширины реза приемлемого качества в сплаве Д16Т ГОСТ 4784-97, рисунок 6.



а)



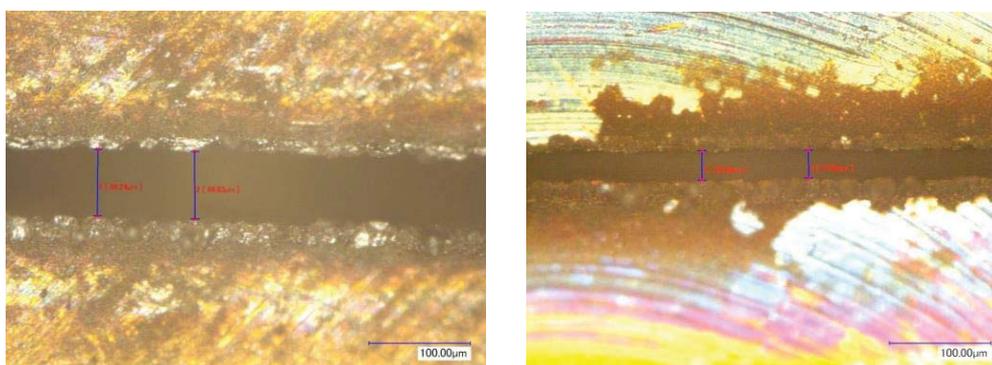
б)



в)

Рисунок 6 - Измерение реза в сплаве Д16Т ГОСТ 4784-97, $\times 700$:
 а) вход луча, ширина 46,33 мкм, измеритель - Keyence VHX-1000;
 б) выход луча, ширина 17,52 мкм, измеритель - Keyence VHX-1000;
 в) паз на просвет, ширина 15,90 мкм, измеритель - Norgay NVM-3020D.

Специальный режим, для достижения лучшего качества кромок реза в стали 12Х18Н10Т ГОСТ 5632-72, рисунок 7.



а)

б)



в)

Рисунок 7 - Измерение реза в стали 12Х18Н10Т ГОСТ 5632-7, $\times 700$:
 а) вход луча, ширина 66,83 мкм, измеритель - Keyence VHX-1000;
 б) выход луча, ширина 29,40 мкм, измеритель - Keyence VHX-1000.
 в) паз на просвет, ширина 27,50 мкм, измеритель - Norgay NVM-3020D.

Таким образом, в результате исследования доказана возможность прецизионной обработки с точностью 15,90 мкм на просвет с использованием стационарных комплексов лазерной маркировки и разработана технология, а также установлены универсальный и специальные режимы резки.

На основании статистических данных проведенного исследования, практически значимым результатом является внедрение на предприятии технологии размерной обработки геометрически малых форм (мкм). Вновь разработанная технология обладает большим экономическим эффектом за счет сокращения количества операций, снижения трудоемкости, использования оборудования меньшей стоимости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Парфенов В.А. Лазерная микрообработка материалов: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011.
2. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок / Под ред. В. Я. Панченко. М.: Физматлит, 2009.
3. Григорьянц А. Г., Жиганов И. И., Мискоров А. И. Технологические процессы лазерной обработки. М.: Изд-во МГТУ им. И. Э. Баумана, 2006.

АВТОРЫ

Ратманов Владислав Александрович - начальник бюро технологической подготовки научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок, ПАО "Завод имени Г.И. Петровского". Аспирант кафедры "Материаловедение, технологии материалов и термической обработки металлов", ФГБОУ ВПО "Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексева". Контактная информация: моб. тел.: 8-904-904-19-44; e-mail: ratmanov.vlad@yandex.ru;

Гаврилов Геннадий Николаевич - профессор кафедры "Материаловедение, технологии материалов и термической обработки металлов", ФГБОУ ВПО "Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексева". Учёная степень: д.т.н. Контактная информация: моб. тел.: 8-903-657-79-81; e-mail: gavrilov1109@mail.ru.

THE AUTHORS

Ratmanov Vladislav Alexandrovich - Head of the Bureau of Technological Preparation for Research and Development, PJSC "Plant named after G.I. Petrovsky". Postgraduate Student, Department of Materials Science, Materials Technology and Heat Treatment of Metals, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education Nizhny Novgorod State Technical University named after RE Alekseev. Contact information: mob. tel. : 8-904-904-19-44; e-mail: ratmanov.vlad@yandex.ru;

Gennady Nikolaevich Gavrilov - Professor of the Department of Materials Science, Materials Technology and Heat Treatment of Metals, FSBEI HPE "Nizhny Novgorod State Technical University named after RE Alekseev". Degree: Doctor of Technical Sciences Contact information: mob. tel. : 8-903-657-79-81; e-mail: gavrilov1109@mail.ru.

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ ЗА
СЧЕТ ПОДДЕРЖИВАНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ НАГРУЗОК**

**IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE POLISHING PROCESS FOR THE
SUPPORT OF OPTIMAL LOADS**

²ДЕНИСЕНКО А. Ф., ¹ЦАЙ В. Н., ¹ГРИГОРЬЕВ В. С., ¹САЙКИН С. С.,
¹ПЛОТНИКОВ В. В., ¹НИКИТИН Д. С., ¹НИКИФОРОВ А. С., ¹ВОЛКОВА Е. Е.,
¹ВЛАДИМИРОВА Н. А

(¹Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, г.Чебоксары, Россия
²Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия)

²DENISENKO A. F., ¹ TSAI V. N., ¹GRIGOR'EV V. S., ¹SAYKIN S. S., ¹PLOTNIKOV V. V.,
¹NIKITIN D. S., ¹NIKIFOROV A. S., ¹VOLKOVA E. E., ¹VLADIMIROVA N. A.
(¹The Chuvash state University of I. N. Ulyanov, Cheboksary, Russia
²The Samara State Technical University, Samara, Russia)

Аннотация. Целью работы являлось разработка мероприятий по уменьшению негативных явлений, возникающих при работе с продольной (поперечной) подачей, затрудняющих получение качественных деталей. К ним относятся: неравномерность нагружения и износа контактных поверхностей по краям заготовки и круга, наличие ударных и вибрационных воздействий на процессы, которые связаны с реверсированием движений и податливостью технологической системы (ТС). При решении поставленных задач использованы современные достижения науки и техники в области станкостроения и цифровой техники. Задачи сформулированы на основе глубокой проработки рассматриваемых процессов. Представленные рекомендации содержат как частные, так и общие выводы.

Annotation. The aim of the work was to develop measures to reduce the negative phenomena that occur when working with longitudinal (transverse) feed, making it difficult to obtain high-quality parts. These include: uneven loading and wear of the contact surfaces on the edges of the workpiece and the circle, the presence of shock and vibration effects on processes that are associated with the reversal of movements and compliance of the technological system (TS). In solving the tasks set, modern achievements of science and technology in the field of machine-tool construction and digital technology were used. Tasks are based on in-depth study of the processes under consideration. The recommendations presented contain both private and general conclusions.

Ключевые слова: натяг, неравномерность нагружения, удар, вибрация, краевой износ, системы ЧПУ податливость, форма.

Key words: tension, uneven loading, impact, vibration, edge wear, CНPU systems, flexibility, form.

В большинстве процессов абразивной обработки поверхности формируются за счет выборки натяга в ТС, зависящего от подачи и жесткости. Наиболее трудоемкой операцией при получении ответственных поверхностей без тепловых дефектов в условиях ограниченной жесткости (ОЖ) ТС является внутреннее эльборовое шлифование. Современные разработки в этом вопросе представлены в работах [1-6]. Доказана целесообразность использования кругов конусообразной формы. Даны методики расчета перебега круга за края отверстия при использовании цилиндрических и конусообразных кругов [7, 8]. Доказаны различия в величинах перебега по краям отверстия, что связано с перераспределением плеч приложения нагрузок, в том числе тепловых [7-12]. Даны методики управления перебегом при длительной работе в условиях самозатачивания круга. Обоснована недопустимость бочкообразности при шлифовании глухих отверстий в деталях поршневой группы [1, 2]. Даны методики правки шлифовальных кругов конусообразной формы. Разработанные технологии позволяют уменьшить припуск под обработку на 25÷40%, увеличить производительность процесса на 15÷20%, сократить расход абразива в 1,5-2 раза, снизить затраты на контроль на 200÷300% и т.п. [7, 8]. Вместе с тем обосновывается, что формообразование этих кругов и условия их эффективного использования базируются на применении высококвалифицированных специалистов. Наибольшие трудности возникают при формообразовании кругов правкой. Рекомендуемый метод обката предполагает использование относительно громоздкого специального приспособления. Поэтому на практике используют не столь эффективную правку – алмазным карандашом. При этом не контролируется площадка износа алмазного зерна, что не гарантирует стабильности процесса.

В работах [1, 2, 5, 7] подчеркивается, что применение конусообразных кругов требует периодической подналадки, что связано с определенными трудозатратами.

Анализ технологических возможностей современного оборудования с ЧПУ показывает, что для внутреннего шлифования в условиях ограниченной жесткости ТС (ОЖТС) возможно применять цилиндрические круги, которые правятся алмазными карандашами, а программируемые системы ЧПУ обеспечивают требуемое положение круга за весь цикл обработки сквозных отверстий.

На рис.1 показаны возможные положения круга и шпиндельной бабки привода главного движения (ШБ ПГД).

Исходя из рис.1, полный выход круга из контакта вглубь отверстия принимаем выходом влево, в сторону полного выхода круга из отверстия – вправо. Рассмотрим вариант, при котором круг полностью выводится из отверстия с двух сторон и он нагружается оптимальной удельной нагрузкой $\rho_{уд} = \frac{P_y}{T}$, где P_y - оптимальная радиальная нагрузка.

В условиях ОЖТС, как правило, податливость оправки круга составляет 80÷90% от общей, поэтому для предварительных расчетов податливость других элементов ТС можно не учитывать. Кроме того, в расчетах не учитывается разворот от силы P_z , что допустимо для приработанного круга.

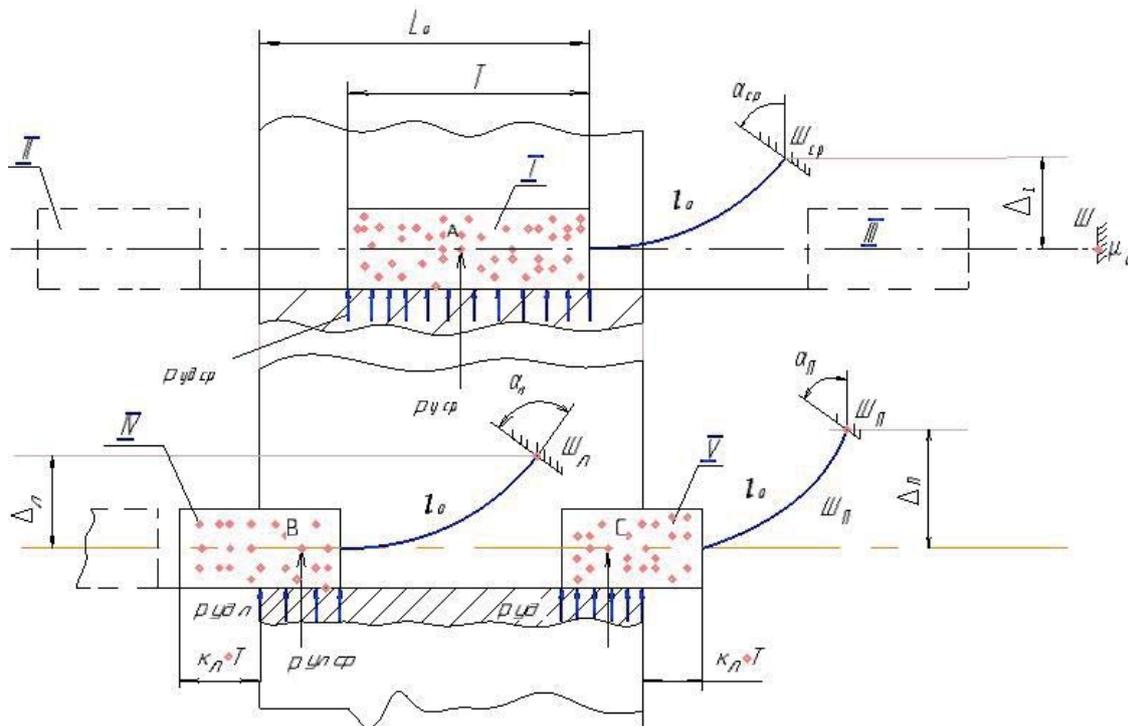


Рис.1. Расчётные схемы для определения величин натяга в ТС ПГД (Δ) и углов расчетов разворота торца шпинделя ПГД (α), обеспечивающих равномерное нагружение ($p_{уд}$) контактных поверхностей круга.

T – высота круга; L_0 – длина шлифуемой поверхности; l_0 – длина оправки с кругом, навинчиваемой до торца конца шпинделя ПГД.

Для того, чтобы обеспечить высокие требования к качеству обработанной поверхности при шлифовании с продольной подачей равноизнашиваемым кругом цилиндрической формы необходимо обеспечить полный проход кругом по всей поверхности заготовки при равной удельной нагрузке в зоне контакта. Эта задача решается так же, как и при применении кругов конусообразной формы [5] – графоаналитическим методом. Для этого необходима информация о жесткости отдельных элементов ТС, зависимости между радиальной технологической силой резания P_y и углом разворота торца круга, технологической тангенциальной силой резания P_z .

Положения круга обеспечиваются: I (шлифование всей поверхностью при удельных нагрузках $p_{уд,ср}$), расчетными величинами Δ_l и $\alpha_{ср}$; II, III и III' (круг вне контакта) – $\alpha=0$, $\Delta=0$; IV и V (круг частично вышел из контакта с заготовкой) – α_n , Δ_n и α_n , Δ_n .

Равенство удельных нагрузок при выходе круга влево и вправо на одну и ту же величину $p_{удл} = p_{удп} = p_{уд}$ обеспечивается не одинаково. Рассмотрим пример расчета для условий, когда круг выходит из отверстия на величины $T/3$, $2T/3$, T как влево, так и вправо.

При участии в работе всей поверхности круга система уравновешена при величине натяга в ТС Δ_l и развороте ШБ ПГД на угол $\alpha_{ср}$, положение точки А (точка условного приложения равнодействующей силы $P_{y,ср}$) относительно точки

Ш_{ср.} неизменно. Плечо приложения этой силы относительно заземления составляет $(l_0 + T/2)$. С момента начала выхода круга из отверстия стабильность процесса нарушается. Например, при выходе влево и вправо на величину $T/3$ усилие прижатия круга к заготовке должно составить $P_{ул} = P_{уп} = \rho_{уд.с.} \cdot \frac{2}{3} T = \frac{2}{3} P_y$.

При замене распределенной нагрузки сосредоточенной плечи приложения этих сил составляют: слева $L_{1л} = l_0 + \frac{1}{3} T$, справа $L_{1п} = l_0 + \frac{2}{3} T$. Для ориентировочных расчетов прогиба примем: при $\frac{l_0}{T} = 3 \div 5$ деформации на краю круга, лежащего на краю консоли, с учетом малых величин углов разворота ($\alpha < 2'$), в $K_g = (1,1 \div 1,2)$ раз больше, чем под сосредоточенной силой [1,5], а при $\frac{l_0}{T} = 5 \div 8$ $K_g = 1,05 \div 1,10$.

При расчете величины прогиба балки необходимо учитывать, что уравнение $y = \frac{P_y}{j}$, где j – жесткость ТС, или $y = \frac{Pl^3}{3EJ}$, где $3EJ$ – жесткость консольной балки, являются трансцендентными [5]. Уменьшение y уменьшает P и наоборот. Для их решения используют базу данных или проводят тарировку податливости элементов ТС, или, как в данной работе – метод последовательного приближения. Считаем, что за шаг деформации разгрузка в ТС не успевает происходить, затем разгружаем ТС и делаем другой шаг и т.д. (шаг слева – $l_0 + \frac{1}{3} T$, справа – $l_0 + \frac{2}{3} T$).

С учетом принятых допущений прогиб оправки y и угол разворота θ составляет в серединной части отверстия $y_{ср.} = K_g \cdot \frac{P_y(l_0 + \frac{T}{2})^3}{3EJ}$; $\theta_{ср.} = K_g \cdot \frac{P_y(l_0 + \frac{T}{2})^2}{2EJ}$, где EJ – жесткость оправки.

При выходе на $T/3$ влево $y_{л.} = K_g \cdot \frac{2P_y(l_0 + \frac{T}{3})^3}{3 \cdot 3EJ}$; $\theta_{л.} = K_g \cdot \frac{2P_y(l_0 + \frac{T}{3})^2}{3 \cdot 2EJ}$,
при выходе на $T/3$ вправо $y_{п.} = K_g \cdot \frac{2P_y(l_0 + \frac{2}{3}T)^3}{9EJ}$; $\theta_{п.} = K_g \cdot \frac{2P_y(l_0 + \frac{2}{3}T)^2}{6EJ}$.

Соотношения между соответствующими полученными величинами прогибов равны:

$$\frac{y_{л.}}{y_{ср.}} = \frac{2}{3} \frac{(l_0 + \frac{T}{3})^3}{(l_0 + \frac{T}{2})^3}; \quad \frac{y_{п.}}{y_{ср.}} = \frac{2}{3} \frac{(l_0 + \frac{2}{3}T)^3}{(l_0 + \frac{T}{2})^3}; \quad \frac{\theta_{п.}}{\theta_{л.}} = \frac{(l_0 + \frac{2}{3}T)^3}{(l_0 + \frac{T}{2})^3}.$$

Для реализации процесса необходимо выполнение условия $l_0 \geq (L_0 + T)$.

Проанализируем процесс, когда $T=30$ мм, $L_0=30$ мм, $l_0=60$ мм и $l_0=180$ мм.

При $l_0 = 60$ мм, $\frac{l_0}{T} = 2$; и $L_0 = 30$ мм имеем:

$\frac{y_{л.}}{y_{ср.}} = 0,54$ – при выходе круга влево отжатие (прогиб) оправки должен составить 0,54 от исходного в центральной части отверстия;

$\frac{y_{п.}}{y_{ср.}} = 0,80$ – при выходе вправо – 0,8 от исходной;

$\frac{y_{п.}}{y_{л.}} = 1,48$.

Вывод: при выходе круга на одну треть, при длине оправки с кругом в 2 раза большей, чем длина отверстия, при выходе вправо система обладает

большой податливостью, чем влево (в 1,48 раза), что предполагает большую удельную нагрузку для снятия того же припуска.

При $l_0 = 180$ мм, когда $\frac{l_0}{T} = 6$ и $L_0 = 150$ мм:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{y_{\text{л}}}{y_{\text{сп}}} = 0,616 \\ \frac{y_{\text{п}}}{y_{\text{сп}}} = 0,72 \\ \frac{y_{\text{п}}}{y_{\text{л}}} = 1,17 \end{array} \right\}$$

Выводы:

1. При выходе круга на одну треть при длине оправки с кругом в 1,2 раза большей чем длина отверстия, что предполагает меньшую разницу нагружений.
2. При увеличении длины шлифуемого отверстия разница в нагружениях круга при выходе слева и справа сокращаются

Выход круга влево и вправо на величину $\frac{2}{3} T$. Прилагаемые усилия $P_{\text{ул}} = P_{\text{уп}} = P_{\text{уд.сп}} \cdot \frac{1}{3} T = \frac{1}{3} P_{\text{у}}$.

Плечи приложения сил составят $L_{2\text{л}} = l_0 + \frac{1}{6} T$; $L_{2\text{п}} = l_0 + \frac{2}{3} T + \frac{1}{6} T = l_0 + \frac{5}{6} T$.

Определим прогибы и углы разворота при этих условиях:

$$y_{\text{сп}} = K_g \cdot \frac{P_y (l_0 + \frac{T}{2})^3}{3EJ}; \quad \theta_{\text{сп}} = K_g \cdot \frac{P_y (l_0 + \frac{T}{2})^2}{2EJ};$$

$$y_{\text{л}} = K_g \cdot \frac{1}{3} \frac{P_y (l_0 + \frac{1}{6} T)^3}{3EJ}; \quad \theta_{\text{л}} = K_g \cdot \frac{1}{3} \frac{P_y (l_0 + \frac{1}{6} T)^2}{2EJ};$$

$$y_{\text{п}} = K_g \cdot \frac{1}{3} \frac{P_y (l_0 + \frac{5}{6} T)^3}{3EJ}; \quad \theta_{\text{п}} = K_g \cdot \frac{1}{3} \frac{P_y (l_0 + \frac{1}{6} T)^2}{2EJ}.$$

Соотношения между полученными величинами прогибов:

$$\frac{y_{\text{л}}}{y_{\text{сп}}} = \frac{1}{3} \cdot \frac{(l_0 + \frac{1}{6} T)^3}{(l_0 + \frac{T}{2})^3}; \quad \frac{y_{\text{п}}}{y_{\text{сп}}} = \frac{1}{3} \frac{(l_0 + \frac{5}{6} T)^3}{(l_0 + \frac{T}{2})^3}; \quad \frac{y_{\text{п}}}{y_{\text{л}}} = \frac{(l_0 + \frac{5}{6} T)^3}{(l_0 + \frac{1}{6} T)^3}.$$

При $l_0 = 180$ мм, когда $\frac{l_0}{T} = 6$ и $L_0 = 150$ мм:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{y_{\text{л}}}{y_{\text{сп}}} = 0,2846; \\ \frac{y_{\text{п}}}{y_{\text{сп}}} = 0,387; \\ \frac{y_{\text{п}}}{y_{\text{л}}} = 1,16. \end{array} \right\}$$

Вывод: по мере выхода круга из отверстия разница в требуемых нагружениях слева и справа уменьшается.

Аналогичные результаты выполнены для соотношения углов разворота торца круга, равного углу разворота в пространстве оси шпиндельного узла.

На рис.2 показаны графики изменения относительных прогибов в зависимости от направления вывода круга из отверстия.

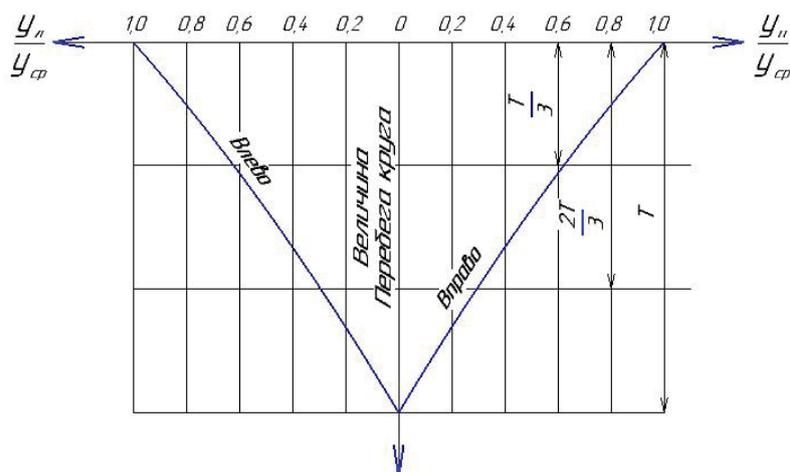


Рис.2. Тенденции изменения относительных прогибов оправки при выходе круга вглубь отверстия (на рис.1 – влево) и из отверстия (вправо) при обеспечении высокой точности

Судя по рис.2, выход происходит «жестко», т.е. не плавно. Более жестко будет происходить вход, что ставит под сомнение применение метода для «ухода» от вибраций, возникающих при обычном шлифовании из-за реверсирования. Опасения не обоснованы, т.к. кромки круга изнашиваются на порядок быстрее, чем его срединная часть. По краям круга быстро формируется заборная часть. Неизбежно ее возникновение при правке.

Методика регулирования величиной перебега дана в работах [1,2,13-15].

Основные выводы:

1. Длина оправки с кругом должна быть по-возможности минимальной. При этом следует учитывать разницу нагрузок при перебеге.
2. При отсутствии регулирования усилий при перебега перебега при выходе из отверстия цилиндрического круга должен быть больше, чем внутри.

При круглом наружном шлифовании длинных относительно нежестких валов, как с люнетом, так и без него, возникают сложности с обеспечением соосности точных поверхностей по краям. Эта задача так же может быть решена за счет использования рассматриваемого метода. Более сложной задачей является обеспечение точных плоских поверхностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Внутреннее шлифование с продольной подачей / П.М. Салов, Д.П. Салова, С.С. Сайкин и др. – Чебоксары: Чув. ун-т, 2012. Деп. в ВИНТИ 22.06.2012, №286 – В2012, - 56 с.
2. Виноградова, Т.Г. Качество обработанных отверстий при электрокорундовом и азоборном шлифовании / Т.Г. Виноградова, П.М. Салов, Д.П. Салова // Научно-технич. Вестник Поволжья, г. Казань: Научно-техн. вестник Поволжья, 2011, №1, - с.91-95.
3. Анализ тепловой ситуации при внутреннем шлифовании с продольной подачей / Салова Д.П., Виноградова Т.Г., Салов П.М. и др. – Чебоксары: Чув. ун-т, 2013. Деп. в ВИНТИ 25.10.2013, №298 – В2013, - 15с.
4. Салова, Д.П. Анализ тепловых процессов при внутреннем шлифовании ответственных деталей / Д.П. Салова, Т.Г. Виноградова, П.М. Салов // Технология машиностроения. 2011. №5, - с.10-13.

5. Расчет податливости технологических систем внутреннего шлифования / Д.П. Салова, Н.В. Мулюхин, П.М. Салов и др. – Чебоксары: Чув. ун-т, 2013. Деп. в ВИНТИ 25.10.2013, №296 – В2013, - 16 с.
6. Правка кругов при внутреннем шлифовании / Д.П. Салова, Т.Г. Виноградова, П.М. Салов, Ю.И. Воронцов. - Чебоксары: Чув. ун-т, 2013. Деп. в ВИНТИ 25.10.2013, №299 – В2013, 15 с.
7. Виноградова, Т.Г. Повышение эффективности шлифования глубоких отверстий путем управления перебегом и формой круга при учете теплонапряженности процесса: защ. 23.12.2013 г. в д.с. Д 212.217.02; 05.02.08. Самара – 2013 – 170 с.
8. Деформации в технологической системе при шлифовании / П.М. Салов, В.Н. Цай, С.С. Сайкин и др. // Научно-техн. вестник Поволжья, 2016. №3. – с.44-46.
9. Салов, П.М., Влияние различных условий правки на микропрофиль абразивного круга / П.М. Салов, В.С. Григорьев, Н.В. Мулюхин // Современные технологии в машиностроении в литейном производстве. Матер. 1-ой Международной научно-практ. конф. – Чебоксары: ЧувГУ, - 2015, с.241-246.
10. Повышение эффективности процесса и качества обработанной поверхности при силовом шлифовании торцом круга / П.М. Салов, Д.А. Вячеславов, М.Л. Афанасьева и др. // Высокие технологии в машиностроении. Матер. Всероссийской науч.техн. интернет-конфер, посвящ. 100-летию засл. деят. н.и т. РФ Папшева Д.Д. Отв. ред. В.Н. Трусов. – Самара: СамГТУ, 2015, - с.28 – 29.
11. Салова, Д.П. Тепловой баланс при шлифовании / Д.П. Салова, Т.Г. Виноградова, П.М. Салов // Вестник Чувашского университета: науч. журн. – Чебоксары, 2008. №2, - с.104-105.
12. Виноградова, Т.Г. Импульсные температуры при аэробном шлифовании / Т.Г. Виноградова, Д.П. Салова, П.М. Салов // Технология машиностроения. 2011. №3, - с.11 – 14.
13. Lobanov, D. V.; Rychkov, D. A.; Sidorenko, S. A. Efficiency upgrading of composite material product production preparation / Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science, 2017. no. 1 (74), pp. 20–29. (in Russian)
14. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Skeebe V.Yu., Gartfelder V.A., Sekletina L.S. Enhancing the effectiveness of the diamond metal bond instrument when grinding high-strength materials. Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science, 2017. no. 3 (76), pp. 17–27. doi: 10.17212/1994-6309-2017-3-17-27. (in Russian)
15. Зачистка стальных и чугунных отливок / П.М. Салов, О.А. Надеждина, А.А. Ильина и др. // матер. III-ей Всероссийск. н.-практ. конф. «Проектирование и перспективные технологии в машин. и металлургии и их кадр. обеспечение» (Чебоксары, 20-21 апрель 2017 г.). – 364 с.; Чебоксары: Чуваш. гос. ун-т, 2017. - с.265-267.
- 16.

АВТОРЫ

Денисенко Александр Фёдорович – д.т.н., проф., профессор кафедры технологии машиностроения Самарского государственного технического университета, Россия, Самара

Сайкин Сергей Семенович, к.ф.-м.н., - профессор кафедры теоретической механики и общей математики Чувашского государственного университета, Россия, Чебоксары

Цай Виктор Николаевич – профессор кафедры технологии машиностроения Чувашского государственного университета, Россия, Чебоксары

Григорьев Владимир Станиславович – доцент кафедры технологии машиностроения Чувашского государственного университета, Россия, Чебоксары

Плотников Владимир Викторович – старший преподаватель кафедры технологии машиностроения Чувашского государственного университета. Россия, Чебоксары

Никитин Денис Сергеевич – магистрант Чувашского государственного университета. Россия, Чебоксары

Никифоров Антон Станиславович - магистрант Чувашского государственного университета. Россия, Чебоксары

Волкова Екатерина Евгеньевна – студент Чувашского государственного университета. Россия, Чебоксары

Владими́рова Ната́лия Алекса́ндровна - студент Чувашского государственного университета. Россия, Чебоксары

THE AUTHORS

Denisenko Alexander Fedorovich - Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, Samara State Technical University, Russia, Samara

Saikin Sergey Semenovich, Ph.D., - Professor of the Department of Theoretical Mechanics and General Mathematics of Chuvash State University, Russia, Cheboksary

Tsai Viktor Nikolaevich - Professor, Department of Mechanical Engineering Technology, Chuvash State University, Russia, Cheboksary

Grigoriev Vladimir Stanislavovich - Associate Professor at the Department of Mechanical Engineering Technology, Chuvash State University, Russia, Cheboksary

Plotnikov Vladimir Viktorovich - Senior Lecturer, Department of Mechanical Engineering Technology, Chuvash State University.

Nikitin Denis Sergeevich - undergraduate student of Chuvash State University. Russia, Cheboksary

Nikiforov Anton Stanislavovich - undergraduate student of Chuvash State University. Russia, Cheboksary

Ekaterina E. Volkova - student of Chuvash State University. Russia, Cheboksary

Vladimirova Natalia Alexandrovna - a student of Chuvash State University. Russia, Cheboksary

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ПРИ ВНУТРЕННЕМ
ШЛИФОВАНИИ С ОСЦИЛЛЯЦИЕЙ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННОЙ
ЖЕСТКОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

**IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE PROCESS WITH INTERNAL GRINDING
WITH OSCILLATION IN CONDITIONS OF LIMITED RIGIDITY OF
TECHNOLOGICAL SYSTEMS**

²Носов Н. В., ¹Сайкин С. С., ¹Воронцов Ю. И., ¹Цай В. Н., ¹Надеждина О. А.,
¹Никитин Д. С., ¹Плотников В. В., ¹Игорев В. В.

¹Чувашский государственный университет им И. Н. Ульянова,
г. Чебоксары, Россия

²Самарский государственный технический университет,
г. Самара, Россия

²Nosov N. V., ¹Saykin S. S., ¹Vorontsov Y. U., ¹Tsai V. N., ¹Nadezhdina O. A.,
¹Nikitin D. S., ¹Plotnikov V. V., ¹Igorev V. V.

¹Chuvash State University named after I. N. Ulyanova,
Cheboksary, Russia

²Samara State University, Samara, Russia

Аннотация. В условиях крупносерийного и массового производства при внутреннем шлифовании широко используются круги, высота которых больше или близка к длине шлифуемого отверстия. Для получения высокой точности используют осцилляцию, с помощью которой реализуется взаимная прирабатываемость круга с заготовкой.

В данной работе анализируются исследования и практика шлифования колец малого диаметра. Основное внимание уделено анализу жесткости технологической системы (ТС) при условиях использования относительно широких кругов, устанавливаемых на нежестких консольных оправках.

Annotation. In the conditions of large-scale and mass production in the internal grinding circles are widely used, the height of which is greater than or close to the length of the ground hole. In order to obtain high accuracy, oscillation is used, with the help of which mutual workability of the circle with the workpiece is realized. This paper analyzes the research and practice of grinding small diameter rings. The focus is on the analysis of the stiffness of the technological system (TS) under the conditions of use of relatively wide circles installed on non-rigid cantilever mandrels.

Ключевые слова: Кольца, осцилляция, перекрытие, перебег, взаимная прирабатываемость, кромоочный износ, податливость, натяг, температура, изгиб, угол разворота, правка, конусность, износ, качество.

Key words: Rings, oscillation, overlap, overrun, reciprocal salability, edge wear, compliance, tension, temperature, bending, turning angle, straightening, tapering, wear, quality.

Применение метода врезания при шлифовании “гладких” цилиндрических поверхностей позволяет существенно увеличить производительность процесса, а при наличии осцилляции - повысить качество обработанной поверхности по сравнению с шлифованием с продольной подачей.

При шлифовании с продольной подачей максимальную удельную производительность локально можно обеспечить только в момент реверсирования, когда удельные нагрузки возрастают [1,2]. Кроме того, процесс предполагает частую настройку величины перебега, что необходимо для получения качественной геометрии отверстия [2,3].

К достоинствам шлифования широкими (высокими) кругами следует отнести большое количество поглощаемого тепла из зоны резания [3-5], отсутствие вибраций в зоне реверсирования [6-9].

Внедрение процесса эльборового шлифования сталей, при котором усилия резания и температура значительно меньше, чем при электрокорундовом [1,3,5], позволяет расширить безвибрационную обработку при большем соотношении высоты круга T к диаметру D , а также существенно уменьшить тепловые дефекты на обработанной поверхности [1-8]. При осцилляции края круга должны входить в заготовку с некоторым небольшим перекрытием, необходимым для поддержания формы круга [1]. Увеличение перекрытия, что имеет место при работе с продольной подачей, когда при перебеге круга повышаются удельные нагрузки до 1.5 раз, негативно сказывается на качестве обработанной поверхности [1-13].

Относительно большая ширина контакта предполагает значительные отжатия. В первую очередь в цепи главного движения, где податливость консольно закрепленной оправки составляет 70-90% от податливости ТС [1,6,13]. Исследования по влиянию податливости в ТС на процесс практически отсутствуют. Рассмотрим процесс шлифования 3-х типов колец на предприятии ООО ЗПП (г. Самара)

При изготовлении колец приборных подшипников высокая точность отверстий и требуемое качество поверхности обеспечивается эльборовыми кругами, высота которых больше длины отверстия. Например, наружное кольцо с диаметрами 24,01*20,75мм, высотой 6 мм шлифуют кругами высотой 8 мм. Круг совершает осциллирующие колебания с частотой 80-120 дв.х/мин при длине хода 3.5мм. Скорость эльборового круга $V_k = 41.7 \div 29$ м/с, скорость заготовки $V_z = 62$ м/мин, подача на врезание со скоростью: черновая 1.3 мм/мин, чистовая 0.15 мм/мин, на величину 0.23 мм, припуск 0.075мм. Время цикла 21с: черновой – 4с, чистовой – 10с, выхаживание – 2с (машинное время 16с), отход – 5с.

Обеспечивается 5 класс точности по ГОСТ 520-71, шероховатость поверхности Ra 0.63, непостоянство диаметра, конусообразность, разностенность – не более 0.025мм. Допуск на диаметр 0.05мм. Используется специальное оборудование БДЕ 25АРО, круг 1А1.19*8*6 ЛКВ40 63/50 СТ1-СТ2 КС10, правка алмазным карандашом, предел износа круга $\emptyset 13$, СОЖ - по ИМО.ЗПП.026К.

После операции заготовка проходит размагничивание, промывку, дополнительный воздушный отпуск в течении 7 часов, галтование.

При выходе каждый торец круга последовательно занимает положение, отстоящее от края заготовки на $(1+1.75)$ мм = 275 мм. Другой торец находится внутри кольца, на 0,75 мм от ближнего его края. $1+1.75+0.75=3.5$ мм(ход). Максимальный натяг в ТС равен $0,23 - 0,075 = 0,155$ мм.

Отверстия внутреннего кольца с диаметрами 6.1*3.91мм, высотой 4мм шлифуются кругами высотой 6мм. Осцилляция 180-220 дв.ход/мин при ходе - 2.2мм. Обеспечивается: непостоянство диаметра – 0.002мм при допуске 0.004мм, конусообразность – 0.002мм, разностенность – 0.0025мм, перпендикулярность относительно базового торца – 0.006мм. Цикл обработки в секундах: 7 – предварительное (черновое), 6 – чистовое, 4 – выхаживание, машинное время 17с, отход 4с, цикл 21с.

Обеспечивается 5 класс точности, шероховатость поверхности $Ra = 0.63$. Оборудование ЛЗ-242, Брайант В-2, круг А8. 4*6*1.8 ЛКВ40 63/50 СТ1-СТ2 КС10. Правка алмазным карандашом, предел износа круга $\varnothing 2$. СОЖ – ПОИМО ЗПП 026К. Режимы резания $V_k = 12+19$ м/с; $V_g = 49$ м/мин; Подача на врезание: 0.7 и 0.2 мм/мин на суммарную величину 0.103мм. Припуск 0.076мм, т.е. натяг в ТС $(0.103 - 0.076) = 0.027$ мм = 27мкм. Отверстия в наружных кольцах с диаметрами 6.01*4.6 высотой 2.3 мм шлифуют кругами высотой 5мм. Ход 2.7 мм, осцилляция 350-390 дв.ход/мин. Оборудование ЛЗ-242.

Обеспечивается: непостоянство диаметра, конусообразность, разностенность – до 0.03мм ($4.7^{+0.03}$). Припуск на изготовление 0.055мм. Класс точности 4,5. Шероховатость поверхности $Rz = 6.3$. Круг А8.4.5*5*1 ЛКВ4050/40 СТ1-СТ2 КС10. Предел износа круга - $\varnothing 2$. Режимы обработки $V_k = 21.2$ м/с, $V_g = 49$ м/мин; подача на врезание 0.6 м/мин на величину 0.11 мм, т.е. натяг в конце цикла равен $(0.11-0.055)$ мм = 0.055мм = 55 мкм.

Проанализируем условия работы кругов с позиций их положения в пространстве, что очень важно при обеспечении точности и шероховатости обрабатываемой поверхности. В расчетах использованы величины хода стола, которые заложены в технологии.

Принято, что при осцилляции круг равномерно выходит за края кольца и полностью входит в глубь кольца с каждой стороны с перекрытиями. Если перекрытия не будет или он будет мал, то круг не работает краями, не удаляет припуск по краям кольца, неравномерно изнашивается. При выборе величины перебега при осцилляции необходимо учитывать краевой износ, который на порядок выше, чем рабочий [1,9,10]. Согласно исследованиям [1,8,11] краевой (кромочный) износ (“осыпание”) захватывает длину, равную $1.5+2.0$ величин зерен основной фракции. Чем больше стойкость круга, тем больше будет сказываться влияние кромочного износа на геометрию отверстия.

Другим немаловажным фактором, влияющим на процесс является деформация оправки. Под воздействием технологических сил резания R_x, R_y, R_z и других причин она совершает сложные и непредсказуемые перемещения. Изгиб и разворачивание оправки под воздействием сил R_y и R_z приводит к

неравномерному нагружению круга и искажению формы отверстия. Направление перемещения круга противоположно действиям сил R_x, R_y, R_z . Круг отжимается от заготовки реакцией R_y , разворачивается и смещается ниже (выше) оси центров реакцией R_z . Силой R_x обычно пренебрегают.

При работе кругом 1A1.19*8*6, который изнашивается до диаметра 13мм, будем считать диаметр оправки на уровне опорного торца равным 13мм. Длина участка диаметра 13 мм должна быть не менее 0.75 мм. Нагружаемая длина оправки диаметром 6 мм равна 8 мм. Расчетная схема для определения податливости оправки с кругом показана на рис 1,а.

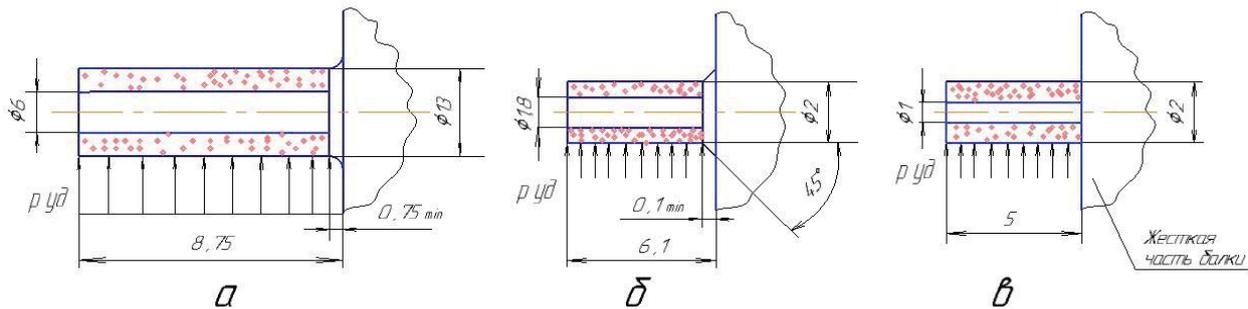


Рис. 1. Нагружение минимально коротких оправок

При работе кругом А8.4*6*1.8, который изнашивается до диаметра 2 мм, будем считать диаметром оправки на уровне опорного торца равным 2 мм.

С учетом фаски на заготовке далее должен быть конусообразный участок длиной не менее 0.1мм. Расчетная схема показана на рис 1,б.

При работе кругом А8.4.5*5*1, который изнашивается до диаметра 2 мм, будем считать диаметр оправки на уровне опорного торца равным 2 мм. Минимальная длина оправки диаметра 2 мм должна быть больше нуля, что исключает контакт по торцу оправки с заготовкой (см. рис. 1,в).

Рассчитать величину прогиба по каждой из схем рисунка 1 весьма сложно и в этом нет необходимости для доказательства значительной податливости ТС привода главного движения. Для этого достаточно рассмотреть величины отжатия в ТС.

Для первой схемы (а) натяг в ТС в конце цикла составляет 0.155 мм при суммарной подаче 0.23 мм, для второй – 0.027 мм при $S\Sigma = 0.11$ мм, что составляет соответственно 67,26 и 50% от суммарной подачи. После черновой подачи натяг увеличивается. Из чего следует, что деформации в ТС при работе весьма значительны.

Оценим ориентировочно угол разворота оправок при работе. Примем, что жесткая часть балок практически не деформируется при работе, край консоли нагружается равномерно. Тогда отношение между прогибом конца жестко заземленной балки и углом поворота торца θ , согласно [6,12] составит:

$$\theta = \frac{4}{3\ell} * y, \quad (1)$$

где θ и y – угол поворота и прогиб края консоли; ℓ – длина податливой части оправки.

Для первой схемы при $\ell_1 = 8.75$ мм имеем $\theta_1 = 0.02362$ рад, для второй схемы при $\ell_2 = 6.1$ мм – $\theta_2 = 0.0063$ рад, для третьей схемы при $\ell_3 = 5$ мм – $\theta_3 = 0.014666$ рад. При таких углах разворота круги неработоспособны, т.к. если считать, что ось оправки прямолинейна, то торец края балки будет поднят над обрабатываемой поверхностью, соответственно на $h = 206.6, 32$ и 73 мкм (см. рис. 2).

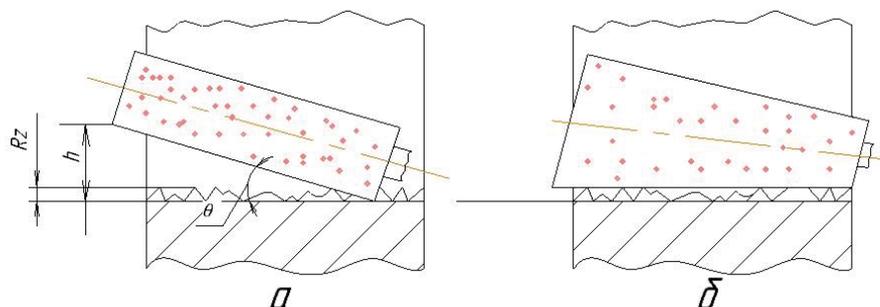


Рис. 2. Положение круга в пространстве

Фактически при изгибе оправки цилиндрического (а) и конического (б) кругов, отклонения h будут меньше, т.к. имеет место прогиб всей оправки, прогиб приспособления с заготовкой, приработка формы круга, при использовании более длинных оправок и при непрямолинейности оси оправки. При этом не учитывается изгиб оправки под воздействием силы резания R_z .

Судя по ориентировочной формуле (1) цилиндрический круг будет работать всей поверхностью при условии, когда $h \leq R_z$ (см. рис. 2). Для первого кольца $R_z = 0.63$ мкм, $T = 8$ мм, тогда допустимый угол разворота равен $\theta \leq 0.63/8000 = 0.000079$ рад. Тогда, с учетом отжатия $y = 0.155$ мм, жесткость оправки должна обеспечить требуемое при длине $\ell \geq 4/3 * y/\theta = 4/3 * 0.155/0.000079 = 1962$ мм, что выходит за рамки разумного. Следовательно, операция возможна или конусообразными кругами, или система управления станком обеспечивает разворот круга таким образом, когда натяг в ТС соответствует положению образующей переменной продольной подаче (осцилляции).

Наличие деформаций способствует увеличению съема материала со стороны входа в отверстие. При правке алмазными карандашами типа С или Ц круг формируется конусообразным, с большим диаметром на конце консоли, что уменьшает h и θ [1,6].

Перемещение алмазного карандаша по линии, скрещивающейся с осью круга, обеспечивает на нем форму однополосного гиперboloида вращения. Если линия близка к асимптоте используемой гиперболы, круг приобретает конусообразную форму [1,12]. Методы правки, приводящие к конусообразной форме кругов, изложены в работах [12-14]. При их применении необходимо учитывать деформации в ТС шлифования и правки, а также жесткость и изменение формы базисующих поверхностей в ТС [15-19].

При работе цилиндрическим кругом на заготовке будут возникать абразивные царапины, искажаться геометрия отверстия. На практике, при недостатке опыта у шлифовщика, круги после правки прирабатывают [1].

Вывод по работе: при наличии больших отжати в ТС необходимы мероприятия по управлению положением образующей круга при работе, целесообразно чтобы она была параллельна продольной подаче (направлению осцилляции).

ЛИТЕРАТУРА

1. Внутреннее шлифование с продольной подачей / П.М. Салов, Д.П. Салова, С.С. Сайкин и др. – Чебоксары: Чувашский университет, 2012 Деп. в ВИНТИ 22.06.2012, № 286-B2012, 56с.
2. Виноградова, Т.Г. Качество обработанных отверстий при электрокорундовом и аэроборном шлифовании / Т.Г. Виноградова, П.М. Салов, Д.П. Салова // Научно-технический вестник Поволжья, г. Казань: Научно-технический вестник Поволжья, 2011. №1,-с91-95.
3. Салова, Д.П. Анализ тепловых процессов при внутреннем шлифовании ответственных деталей / Д.П. Салова, Т.Г. Виноградова, П.М. Салов // Технология машиностроения. 2011.№5,-с10-13.
4. Салова, Д.П. Тепловой баланс при шлифовании /Д.П. Салова, Т.Г. Виноградова, П.М. Салов // Вестник Чувашского университета: науч. журн. – Чебоксары, 2008. №2, - с104-108.
5. Анализ тепловой ситуации при внутреннем шлифовании с продольной подачей / Салова Д.П., Виноградова Т.Г., Салов П.М. и др. – Чебоксары: Чувашский университет, 2013. Деп. в ВИНТИ 25.10.2013, № 298-B2013, - 15с.
6. Расчет податливости технологических систем внутреннего шлифования / Д.П. Салова, Н.В. Мулюхин, П.М. Салов и др. – Чебоксары: Чувашский университет, 2013. Деп. в ВИНТИ 25.10.2013, № 296-B2013, - 16с.
7. Виноградова, Т.Г. Импульсные температуры при аэробном шлифовании / Т.Г. Виноградова, Д.П. Салова, П.М. Салов // Технология машиностроения. 2011. №3, - с11-14.
8. Салов, П.М. Рациональное использование рабочей поверхности абразивных кругов / П.М. Салов, Д.П. Салова. – Чебоксары: Чебокс. политехн. ин-т (филиал) МГОУ, 2010. – 332с.
9. Повышение эффективности процесса и качества обработанной поверхности при силовом шлифовании торцом круга / П.М. Салов, Д.А. Вячеславов, М.Л. Афанасьева и др. // Сборник «Высокие технологии в машиностроении». Матер. Всероссийской научн.-техн. конф., Самара: Сам. гос. техн. ун-т, 2015. – с.28-19.
10. Салов, П.М. Влияние различных условий правки на микропрофиль абразивного круга / П.М. Салов, В.С. Григорьев, Н.В. Мулюхин // Современные технологии в машиностроении и литейном производстве. Матер. 1-ой Междунар. науч. – практ. конф. – Чебоксары: Чув.ГУ, - 2015, С.241-246.
11. Правка кругов при внутреннем шлифовании / Д.П. Салова, Т.Г. Виноградова, П.М. Салов, Ю.И. Воронцов. – Чебоксары: Чув. ун-т, 2013. Деп. в ВИНТИ 25.10.2013, № 299-B2013, 15с.
12. Ящерицын, П.И. Шлифование металлов / П.И. Ящерицын, Е.А. Жалнерович. - Минск: Беларусь, 1970. - 464с.
13. D. A. Rychkov, A.S. Yanyushkin, D.V. Lobanov and P.V. Arkhipov. Method for automation of tool preproduction / IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 327 (2018) 022089
14. P.V. Arkhipov, D.V. Lobanov, D. A. Rychkov and A.S. Yanyushkin. Determination of high-strength materials diamond grinding rational modes / IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 327 (2018) 042009
15. Denisenko A.F., Kazakova O.Y. Improving metal-cutting precision by attention to tool-replacement systems/ Russian Engineering Research. 2010. Т. 30.№ 5. С. 473-477.
16. Денисенко А.Ф., Казакова О.Ю. Повышение точности обработки на металлорежущих станках путем обеспечения эксплуатационных характеристик систем смены инструмента/ Вестник машиностроения, № 5, 2010 г., с.46-50

17. Денисенко А.Ф., Казакова О.Ю. Прогнозирование изменения формы базирующих поверхностей инструментальной системы металлорежущих станков при эксплуатации / Вестник машиностроения, № 5, 2011 г., с.54-57
18. Денисенко А.Ф., Якимов М.В. Разработка конечно-элементной модели для определения упругих характеристик шпиндельных узлов / СТИН, № 8, 2011 г., с.9-13
19. Денисенко А.Ф., Якимов М.В. Формирование точностных и жесткостных характеристик опор роторного узла при сборке / Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. «Технические науки». № 3(25), 2009, с.132-139.

АВТОРЫ

Носов Николай Васильевич - д.т.н. проф., - профессор кафедры технологии машиностроения Самарского государственного технического университета. Россия. Самара.

Сайкин Сергей Семенович - к. ф.-м. н., доцент – профессор кафедры теоретической механики и общей математики Чувашского государственного университета. Россия. Чебоксары.

Воронцов Юрий Иванович - доцент – доцент кафедры технологии машиностроения Чувашского государственного университета. Россия. Чебоксары.

Цай Виктор Николаевич - профессор кафедры технологии машиностроения Чувашского государственного университета. Россия. Чебоксары.

Надеждина Оксана Анатольевна - ст. преподаватель кафедры прикладной механики и графики Чувашского государственного университета. Россия. Чебоксары.

Никитин Денис Сергеевич - магистрант Чувашского государственного университета. Россия. Чебоксары.

Плотников Владимир Викторович - ст. преподаватель кафедры технологии машиностроения Чувашского государственного университета. Россия. Чебоксары.

Игорев Виктор Валерьевич - студент машиностроительного факультета Чувашского государственного университета. Россия. Чебоксары.

THE AUTHORS

Nosov Nikolay Vasilyevich - Dr. of Sc. Prof., - Professor, Department of Mechanical Engineering Technology, Samara State Technical University. Russia. Samara.

Saikin Sergey Semenovich - Ph. F. –M. Sc., Associate Professor - Professor of the Department of Theoretical Mechanics and general mathematics of the Chuvash State University. Russia. Cheboksary.

Vorontsov Yuri Ivanovich - Associate Professor - Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology Chuvash State University. Russia. Cheboksary.

Tsai Viktor Nikolaevich - Professor, Department of Mechanical Engineering Technology Chuvash State University. Russia. Cheboksary.

Nadezhkina Oksana Anatolievna - Art Lecturer, Department of Applied Mechanics and Graphics Chuvash State University. Russia. Cheboksary.

Nikitin Denis Sergeevich - graduate student of Chuvash State University. Russia. Cheboksary.

Plotnikov Vladimir Viktorovich, Art. Lecturer, Department of Mechanical Engineering Chuvash State University. Russia. Cheboksary.

Igorev Victor Valerievich - a student at the Faculty of Mechanical Engineering Chuvash State University. Russia. Cheboksary.

НОВЫЙ МЕТОД ШЛИФОВАНИЯ СКВОЗНЫХ ОТВЕРСТИЙ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННОЙ ЖЁСТКОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

NEW METHOD OF GRINDING THROUGH HOLES IN CONDITIONS OF LIMITED RIGIDITY OF THE TECHNOLOGICAL SYSTEM

¹ ИЛЛАРИОНОВ И.Е., ¹ ШАЛУНОВ Е.П., ¹ САЙКИН С.С.,
² НОСОВ Н.В., ² ДЕНИСЕНКО А.Ф., ¹ ПЛОТНИКОВ В.В.,
¹ ПОЛЯКОВ А.С., ¹ САЛОВ П.М.

¹Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова,

²Самарский государственный технический университет

¹ ILLARIONOV I.E., ¹ E.P. SHALUNOV, ¹ S.S. SAIKIN, ² NOSOV N.V.,
² DENISENKO A.F., ¹ PLOTNIKOV V.V., ¹ POLYAKOV A.S., ¹ SALOV P.M.

¹Chuvash State University named after I. N. Ulyanova, Russia

²Samara State University, Samara, Russia

***Аннотация.** В работе представлен метод шлифования деталей типа «Гильза», при котором шлифовальный круг полностью выходит из отверстия с двух сторон, при исключении вибрации на входе и выходе. Дана методика управления перемещениями шпиндельной бабки привода главного движения с целью поддержания продольной образующей круга параллельной вектору продольной подачи и удельные усилия резания постоянными. Производительность операции увеличивается за счет сокращения времени на промежуточный контроль. Шероховатость обработанной поверхности уменьшается за счет уменьшения вибраций при реверсировании.*

***Annotation.** The paper presents a method of grinding parts such as "sleeve", in which the grinding wheel completely exits the hole from two sides, with the exception of vibration at the entrance and exit. A method for controlling the movements of the spindle headstock of the main motion drive is given in order to maintain the longitudinal generatrix of the circle parallel to the vector of longitudinal feed and the specific cutting forces constant. The productivity of the operation is increased by reducing the time for intermediate control. The roughness of the treated surface is reduced by reducing vibrations during reversal.*

***Ключевые слова:** податливость, прирабатываемость, конусообразный круг, перебеж, управление мощностью, разворот круга, фиксирование усилий.*

***Key words:** compliance, workability, cone-shaped circle, overrun, power control, circle reversal, force fixation*

При шлифовании длинных и глубоких отверстий отжатие круга от заготовки может быть весьма значительным [1,2]. Он разворачивается относительно вектора продольной подачи, при которой часть цилиндрического круга не участвует в работе [1,2], а контактный участок (угол) глубоко врезается в заготовку, формируя на заготовке абразивную царапину или прижог [2-8]. В работах [2-5] доказана высокая эффективность применения кругов конусообразной формы, при которых не возникают эти недостатки.

Вторым недостатком традиционного метода является увеличение тепловой и силовой напряженности процесса в зоне реверсирования примерно в 1,5 раза. В этой зоне возникают дефекты поверхностного слоя [2-9] в виде прижогов, макроотклонений.

Третьим недостатком является неизбежность возникновения вибраций в технологической системе (ТС) при реверсировании продольной подачи, приводящей к увеличению шероховатости и волнистости поверхности.

Плавный, безвибрационный вход и выход круга из края отверстия и реверсирование вне зоны контакта позволяют исключить оба недостатка, связанных с реверсированием, уменьшить время на промежуточный контроль и на процесс выхаживания.

Радиальным методом обеспечения минимальной нецилиндричности отверстия являются условия шлифования, при которых удельные контактные нагрузки постоянны при полном выходе из отверстия с обеих сторон.

Метод реализуется за счет управления силой P_y и изменении положения шпиндельной бабки привода главного движения (ШБПГД). Как доказано в работах [2,10], круг, работающий в условиях ограниченной жёсткости привода главного движения, должен иметь конусообразную форму, а его образующая при относительно жёсткой заготовке развернута вдоль продольной подачи. На рис.1 показана схема работы круга в срединной части отверстия и его положение по краям.

Расчет величины конусности круга α_K , на которую он поворачивается при полной нагрузке при обработке всем профилем $\alpha_{ср} = \alpha_K$ определяется по графикам $\alpha = f(P_y)$ и $\Delta = f(P_y)$, где Δ - податливость ТС [2-8].

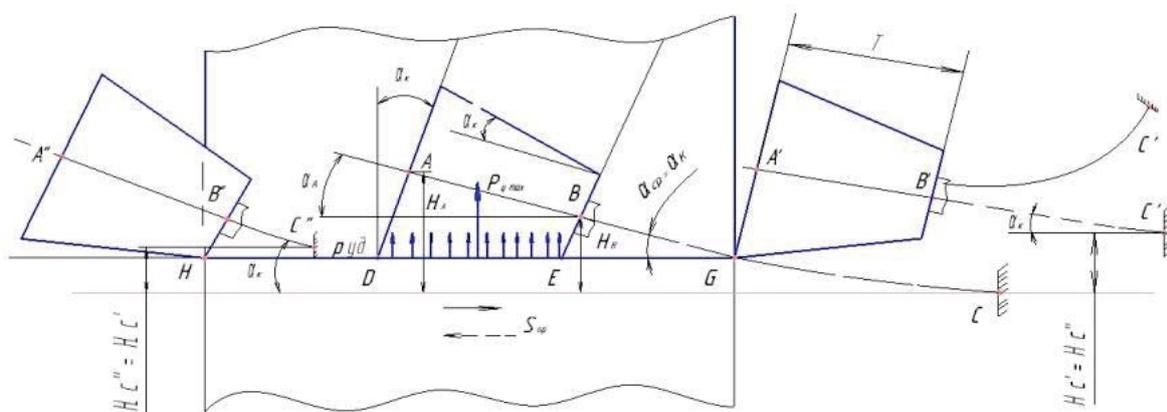


Рис.1 Работа круга с постоянной удельной нагрузкой при полном выходе его из отверстия с двух сторон

Под действием нагрузки $P_y = p_y * \frac{T}{\cos \alpha}$ ось консоли ABC с кругом развернута относительно оси шпиндельного узла на угол $\alpha_{ср}$.

Принято, что ось круга не искривляется, линия АВ – это прямая, наклоненная к вектору $S_{пр}$ под углом α_k . Точки А и В, лежащие на оси круга, отстоят от оси шпиндельного узла на расстояниях H_A и H_B . Угол $\alpha_{ср}$ – угол между касательной к кривой изгиба в точке В и направлением подачи $S_{пр}$.

Непеременным условием является перемещение образующей круга DE вдоль линии HG, формирующей отверстие. С момента начала выхода круга из отверстия нагрузка на круг должна уменьшаться в соответствии с зависимостью $P_y = p_y(T - x)$, где x – величина выхода круга. Уменьшение силы P_y должно обеспечиваться уменьшением натяга в технологической системе за счет перемещения шпиндельной бабки круга к оси отверстия и ее дополнительным поворачиванием. На рис.1 поворот осуществляется до момента, когда положение образующей круга DE будет параллельно вектору $S_{пр}$. При этом в зоне контакта должна обеспечиваться требуемая удельная нагрузка $p_{уд}$. При шлифовании натяг в ТС уменьшается, что требует дополнительного натяга в ТС и корректировки положения круга.

В момент полного выхода круга вправо точка С, расположенная в центре заделки оправки, переносится вправо на величину $T/\cos \alpha_k$, и к центру отверстия на величину H_C^I . При выходе влево – на величину H_C^{II} . При незначительной разнице в величинах натяга по краям отверстия за ход $H_C^I = H_C^{II}$.

Следует заметить, что при равенстве $P_{уд}$ в правую и левую стороны возникает разница между H_C^I и H_C^{II} , что связано с разностью плеч приложения нагрузки относительно конца защемления оправки круга.

При выходе вправо максимальное плечо приложения удельным сил приближается к $C^I G$, при выходе влево – меньше на величину, близкую к высоте круга T . На рис. 2 показаны промежуточные положения круга, когда он выходит из отверстий справа или слева на одну и ту же величину.

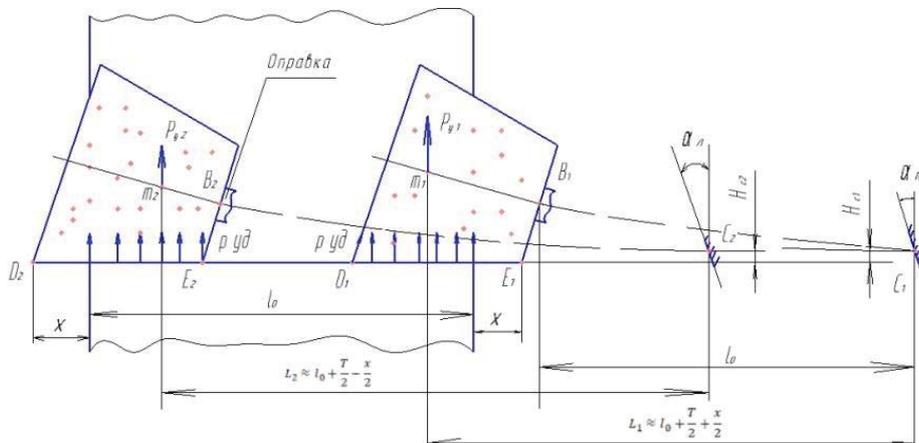


Рис. 2 Схема для расчёта усредненных плеч приложения удельных нагрузок

Как следует из расчетной схемы плечо при выходе право (в сторону шпинельного узла) на величину x больше, чем при выходе влево.

Расчет величины конусности круга α_K , на которую он поворачивается при полной нагрузке при обработке всем профилем

$\alpha_{cp} = \alpha_K$ определяется по графикам $\alpha = f(P_y)$ и $\Delta = f(P_y)$, где Δ - податливость ТС [2-8, 11-13].

$$\text{Соответственно: } L_1 = l_0 + \frac{T}{2} + \frac{x}{2} \text{ и } L_2 = l_0 + \frac{T}{2} - \frac{x}{2}.$$

Проанализируем деформацию оправки при различных условиях нагружения. Расчетные формулы для определения величин прогиба равнонагруженного конца консоли y_{max} и угла поворота O_{Π} имеют громоздкий вид. В работах [1,2,4,5] доказано, что в ориентировочных расчетах вполне допустимо оправку с кругом рассматривать как балку, нагружаемую сосредоточенными силами P_{y_1} и P_{y_2} (см. рис 2).

Для правой стороны:

$$3EY_{y_{\Pi max}} = P_{y_1} * \left(l_0 + \frac{T}{2} + \frac{x}{2}\right)^3; 2EYO_{\Pi} = P_{y_1} * \left(l_0 + \frac{T}{2} + \frac{x}{2}\right)^2;$$

Для левой стороны:

$$3EY_{y_{\Pi max}} = P_{y_2} * \left(l_0 + \frac{T}{2} - \frac{x}{2}\right)^3; 2EYO_{\Pi} = P_{y_2} * \left(l_0 + \frac{T}{2} - \frac{x}{2}\right)^2,$$

где l_0 – длина оправки от места закрепления ее на конце шпинделя до ближнего торца, EY – жесткость оправки.

Для условий, когда круг работает всей образующей:

$$3EY_{y_{cp max}} = P_{y_{max}} * \left(l_0 + \frac{T}{2}\right)^3; 2EYO_{\Pi} = P_{y_{max}} * \left(l_0 + \frac{T}{2}\right)^2.$$

Наличие больших (меньших) деформаций во время выхода круга, чем это необходимо для реализации метода, предполагает большой (меньший) отжим его от заготовки, что реализуется дополнительными перемещениями ШБПГД.

При общем уменьшении отжима, но частичном увеличении дополнительного отжима (выход вправо на рис. 2) ШБПГД перемещается в сторону центра отверстия и опорный торец с точкой $C(C_1)$ поворачивается до угла α_K , относительно точки D_1 .

При этом реализуется два вида перемещений. Первое – за счет уменьшения линии соприкосновения круга с заготовкой, второе – за счет уменьшения плеча.

При общем уменьшении отжима, в том числе частичном уменьшении дополнительного отжима (выход круга вправо), ШБПГД перемещается в сторону центра отверстия и поворачивается относительно точки E_2 до угла α_K . При этом реализуется три вида перемещений. Первое – за счет уменьшения линии соприкосновения, второе – компенсация на уменьшение плеча, третье – компенсация выхода из контакта конца круга большего диаметра, что требует дополнительного поджима для обеспечения требуемой величины p_{yd} .

В выполненном анализе не учитывается положение круга при работе относительно центра отверстия. Под действием силы P_z он опускается ниже центра, что приводит к неравномерному износу его кромок [1,2]. В большей

степени изнашивается большой диаметр круга [1-5]. Сразу после правки конической круг работает только большим диаметром. Для исключения дефектов на заготовке необходима щадящая приработка. После приработки круг приобретает несимметричную бочкообразность со скошенным краёвым износом кромок [2-7]. Его форма близка к яйцеобразной. Она может быть квазиустойчивой при работе в режиме самозатачивания и при регулярной чистке [2-5, 11-13].

Обеспечить точную геометрическую форму отверстия кругом, форма которого непостоянная, за счет управления перебегом весьма трудоёмко. При этом величины усилий P_z и P_y задаются через фиксируемую мощность резания. Взаимосвязь усилия P_y и угла повторота ШБПГД может находиться по результатам тарировки. Методика дана в работах [1,2].

Рекомендуемый метод позволяет это сделать без особых трудностей при наличии базы данных о податливости основных узлов ТС, цикле обработки, управляющей программе. При этом необходимо пересчитать угловые перемещения в линейные.

Поддерживание продольной образующей круга в положении, параллельном продольной подаче, обеспечивает взаимную прирабатываемость цилиндрической поверхности заготовки и круга.

Отсутствие перегрузки и вибраций при реверсировании – тепловой и силовой по краям отверстия [2-6] исключает дефекты на заготовке [2-8].

ЛИТЕРАТУРА

1. Расчет податливости технологических систем внутреннего шлифования / Д.П.Салова, Н.В.Мулюхин, П.М.Салов и др. – Чебоксары: Чув. ун-т, 2013. Деп. в ВИНТИ 25.10.2013, № 296-В2013, - 16 с.
2. Внутренне шлифование с продольной подачей / П.М. Салов, Д.П.Салова, С.С.Сайкин и др. – Чебоксары: Чув. ун-т, 2012. Деп. в ВИНТИ 22.06.2012, №286-В2012, - 56 с.
3. Виноградова Т.Г. Импульсные температуры при аэробном шлифовании / Т.Г.Виноградова, Д.П.Салова, П.М.Салов // Технология машиностроения, 2011. №3, - с. 11-14.
4. Салова, Д.П. Анализ тепловых процессов при внутреннем шлифовании ответственных деталей / Д.П.Салова, Т.Г.Виноградова, П.М.Салов // Технология машиностроения, 2011. №5, - с. 10-13.
5. Виноградова, Т.Г. Качество обработанных отверстий при электрокорундовом и аэробном шлифовании / Т.Г.Виноградова, Д.П.Салова, П.М.Салов // Научно-технический вестник Поволжья, г. Казань: Научно-технический вестник Поволжья, 2011. №1, - с. 91-95
6. Салова Д.П. Тепловой баланс при шлифовании / Д.П.Салова, Т.Г.Виноградова, П.М.Салов / Вестник Чувашского университета: Научный журнал – Чебоксары, 2008. №2, - с. 104-108.
7. Повышение эффективности процесса и качества обрабатываемой поверхности при силовом шлифовании торцом круга / П.М.Салов, Д.А.Вячеславов, М.Л.Афанасьева и др. // Высокие технологии в машиностроении. Науч.тех. интернет-конфер., посвящ. 100-летию засл. деят. н.и.т Папшева Д.Д. Отв. ред. В.Н.Трусов – Самара: СамГТУ, 2015, - с. 28-29.
8. Анализ тепловой ситуации при внутреннем шлифовании с продольной подачей / Д.П.Салова, Т.Г.Виноградова, П.М.Салов и др. – Чебоксары: Чув. ун-т, 2013. Деп в ВИНТИ 25.10.13, №298 – В2013, - 15 с.
9. Салов П.М. Влияние различных условий правки на микропрофиль абразивного круга / П.М.Салов, В.С.Григорьев, Н.В.Мулюхин // Современные технологии в машиностроении и

литейном производстве, матер. 1-ой междунар. науч-практ. конф. – Чебоксары: ЧувГУ, - 2015, С.241-246.

10. Правка кругов при внутреннем шлифовании / Д.П.Салова, Т.Г.Виноградова, П.М.Салов, Ю.И. Воронцов. – Чебоксары: Чув. ун-т., 2013. Деп. в ВИНТИ 25.10.2013, №299-В2013, 15 с.

11. Skeebe, V.Yu., Ivancivsky, V.V., Martyshev, N.V., Lobanov, D.V., Vakhrushev, N.V., Zhugulev, A.K. Numerical simulation of temperature field in steel under action of electron beam heating Source, Key Engineering Materials. (2016) 712, pp. 105-111.

12. V.V. Ivancivsky V.Yu. Skeebe I.A. Bataev, D.V. Lobanov, N.V. Lobanov, N.V. Martyshev, O.V. Sakha, I.V. Khlebova. The features of steel surface hardening with high energy heating by high frequency currents and shower cooling / IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 156 (2016) 012025

13. Салова Д.П. Моделирование профиля рабочей поверхности шлифовального круга с использованием принципов естественной прирабатываемости: Дис...канд.техн.наук: 05.03.01 / Самарский гос. техн. ун-т, Чувашский гос. ун-т. – Самара. 2007. – 231 с.

АВТОРЫ

Илларионов Илья Егорович – д.т.н. проф., зав. кафедрой материаловедения и металлургических процессов Чувашского государственного университета, Россия, Чебоксары

Шалунов Евгений Петрович – к.т.н., доцент – профессор кафедры технологии машиностроения Чувашского государственного университета, Россия, Чебоксары

Сайкин Сергей Семенович - к. ф.–м. н., доцент – профессор кафедры теоретической механики Чувашского государственного университета, Россия, Чебоксары

Носов Николай Васильевич - д.т.н. проф., - профессор кафедры технологии машиностроения Самарского государственного технического университета, Россия, Самара

Денисенко Александр Федорович – д.т.н., профессор – профессор кафедры технологии машиностроения Самарского государственного технического университета, Россия, Самара

Плотников Владимир Викторович - ст. преподаватель кафедры технологии машиностроения, Россия, Чебоксары

Поляков Андрей Сергеевич - студент машиностроительного факультета Чувашского государственного факультета, Россия, Чебоксары

THE AUTHORS

Illarionov Ilya Egorovich - Doctor of Technical Sciences Prof., head. Department of Materials Science and Metallurgical Processes of Chuvash State University, Russia, Cheboksary

Shalunov Evgeny Petrovich - Ph.D., associate professor - Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, Chuvash State University, Russia, Cheboksary

Saikin Sergey Semenovich - Ph. F. –M. Sc., Associate Professor - Professor of the Department of Theoretical Mechanics, Chuvash State University, Russia, Cheboksary

Nosov Nikolay Vasilyevich - Doctor of Technical Sciences Prof., - Professor, Department of Mechanical Engineering Technology, Samara State Technical University, Russia, Samara

Denisenko Alexander Fedorovich - Doctor of Technical Sciences, Professor - Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, Samara State Technical University, Russia, Samara

Plotnikov Vladimir Viktorovich - Art. Lecturer, Department of Mechanical Engineering, Russia, Cheboksary

Polyakov Andrey Sergeevich - student of engineering faculty of the Chuvash State Faculty, Russia, Cheboksary

**МОДЕРНИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ
ОПЫТНО-КОНСТРУКТОРСКОГО ПРОИЗВОДСТВА**

**MODERNIZATION OF TECHNOLOGICAL PREPARATION
EXPERIMENTAL DESIGN PRODUCTION**

ЛАЗАРЕВ А.Ю., ТРУШИН Н.Н.
(ТулГУ, Тула, Россия)

LAZAREV A.U., TRUSHIN N.N.
(TSU, Tula, Russia)

***Аннотация.** Рассматриваются особенности опытно-конструкторского машиностроительного производства в условиях ужесточения требований к техническому совершенству изготавливаемых машин. Предлагаются пути совершенствования технологической подготовки производства на основе экспертных методов и систем.*

***Annotation.** The features of experimental design engineering production are considered. Technological preparation improvement based on expert methods and systems are offered.*

***Ключевые слова:** опытно-конструкторское производство, технологическая подготовка, технологический процесс.*

***Keywords:** experimental design production, technological preparation, technological process.*

В сложившихся технико-экономических и исторических условиях, связанных с реформами в экономике, изменением форм собственности и организации финансово-хозяйственной деятельности машиностроительных предприятий меняются и требования к организации технологической подготовки производства [1].

Одной из важнейших характеристик современного машиностроительного производства является исключительно высокая динамика обновления номенклатуры выпускаемой продукции. В настоящее время доля серийного и мелкосерийного производства продукции машиностроения достигает 80 % от общего объема выпуска изделий. В сложившихся обстоятельствах увеличивается доля опытно-конструкторских работ, обусловленная частой сменой изготавливаемых изделий. Фактически опытно-конструкторское производство по своим технико-экономическим свойствам является единичным. Это обстоятельство во многом предопределяет пути модернизации научно-технической подготовки такого производства с целью оптимизации его организационно технологической структуры [2].

Отличительной особенностью многих современных производств является продолжающийся рост номенклатуры изготавливаемых деталей. При проектировании и научно-технической подготовке технологических систем для опытно-конструкторского и мелкосерийного производства необходимо в первую очередь учитывать неравномерность загрузки оборудования и большие потери по времени при многократных переналадках на выпуск изделий другой номенклатуры.

В общем случае производственный процесс изготовления деталей и определяемую им технологическую систему целесообразно рассматривать совместно с процессом подготовки производства в связи с взаимосвязанностью работ и затрат по этим процессам (рис. 1). [3]

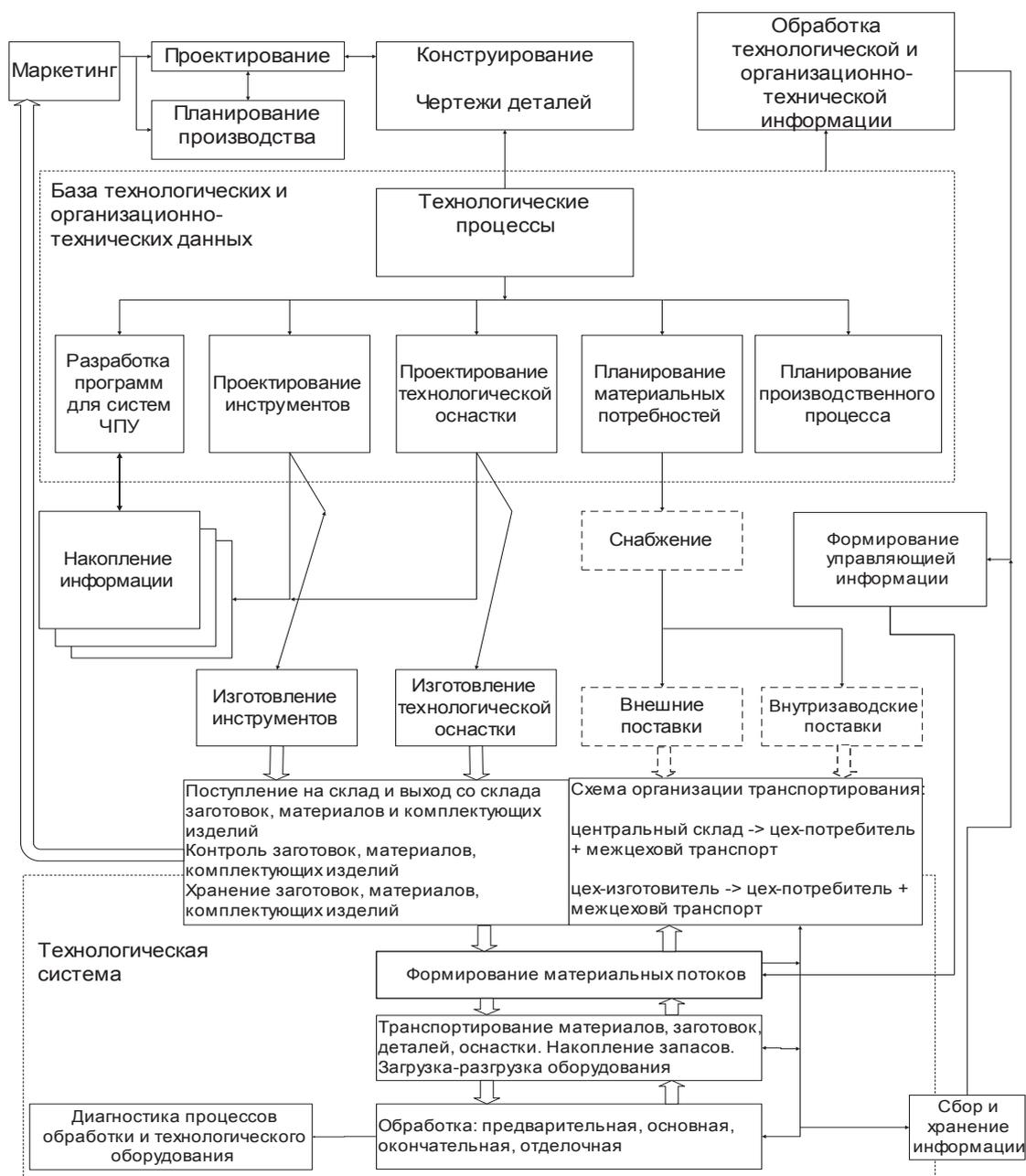


Рисунок 1 – Схема основных материальных и информационных процессов в опытно-конструкторском машиностроительном производстве

Тонкими стрелками на представленной схеме изображены информационные потоки, объемными стрелками – материальные потоки. Систематизация материальных и информационных потоков является методологической основой модернизации подготовки опытно-конструкторского производства исходя из системы сложившихся и требуемых условий производственного процесса [4].

В результате качественного анализа процесса изготовления вновь создаваемого сложного технического изделия (машины) получается комплекс вариантов технологического процесса. Анализ изменения структуры производственного процесса при этом чрезвычайно важен, так как за счёт этого изменения показатели эффективности производства растут в десятки раз быстрее, чем при совершенствовании методов обработки (тем более, что возможность совершенствования методов обработки постоянно уменьшается).

Основой построения любой технологической системы является исходный технологический процесс с максимальной степенью дифференциации. Дифференциация обработки является базой для развития любых других направлений в обработке резанием (рис. 2) [5].

Выбор оптимального соотношения между дифференциацией и концентрацией технологических операций и переходов является достаточно важной задачей, так как от результата ее решения структура технологического процесса изменяется в широких пределах. В опытно-конструкторском производстве преобладает преимущественно единичный и мелко-мелко серийный тип производства, когда размер партии деталей не намного больше 1. В данных условия дифференциация технологических операций преобладает над их концентрацией. Кроме этого, опытно-конструкторское производство характеризуется широким спектром станочного парка предприятия: здесь совместно работают и универсальные станки с ручным управлением, и станки с ЧПУ с различными уровнями автоматизации. Непрерывный поиск оптимального конструкторского решения при опытной отладке изделия неизбежно предопределяет поиск новых технологических решений с целью удовлетворения требований по качеству изделия. С изменением структуры технологических процессов ощутимо может измениться и трудоёмкость, и себестоимость изготовления деталей и сборочных единиц изделий, а также параметры качества.

Одним из аспектов рациональной организации серийного машиностроительного производства является унификация технологических процессов, состоящая в разработке и внедрении типовых и групповых технологических процессов [6]. Методологической основой типовых и групповых технологических процессов является классификация предметов производства. С одной стороны, классификация деталей и развернутая на её основе стандартизация способствуют более полному использованию преимуществ, обусловленных повторяемостью производственных процессов. Поэтому групповые технологии получили широкое применение именно в серийном производстве, но в опытно-конструкторском производстве содержание основных этапов подготовки групповой обработки для

автоматизированного технологического оборудования приобрело некоторые особенности. При обработке на современных станках с ЧПУ, особенно многооперационных, конфигурация детали уже не имеет принципиального значения, во внимание принимаются только обрабатываемые поверхности [7].

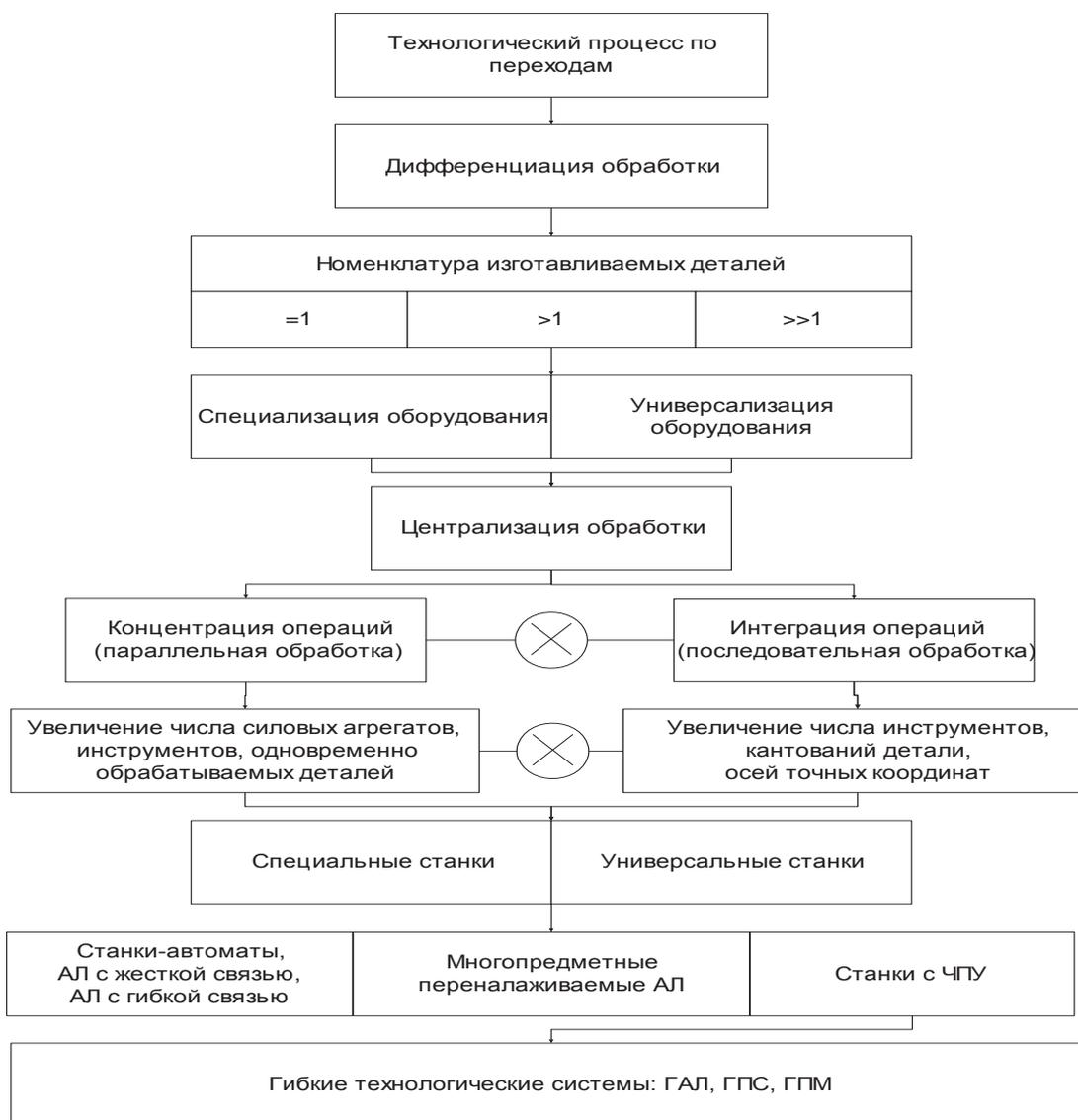


Рисунок 2 – Иерархия технологических систем механической обработки

Система инструментального обеспечения серийного машиностроительного предприятия реализуется в условиях неоднозначности протекания процессов, ситуаций реализации решений и многообразия возможных состояний, в которых в будущем может оказаться предприятие. В момент принятия решений практически невозможно получить точные и полные знания обо всех действующих или только проявляющихся внутренних и внешних факторах (состояние оборудования, время поставки, время между соседними требованиями на технологическую оснастку). В опытно-конструкторском производстве система инструментального обеспечения работает в ещё более жёстких условиях неопределённости, обусловленных жёсткими сроками

испытания опытного образца или сдачи уже готового изделия заказчику, или передачи готового изделия на другое предприятие, которое будет осуществлять его серийное изготовление. В условиях многономенклатурного опытно-конструкторского производства многообразие используемого инструмента ведет к частой его замене и увеличению, в конечном итоге, времени переналадки технологического оборудования в условиях жёстких временных ограничений.

Современное развитие механообрабатывающего технологического оборудования идет в направлении наделяния его все большими функциональными возможностями, что может приводить к снижению надёжности, как самого оборудования, так и технологических систем в целом. Общая надёжность металлообрабатывающих станков заметно выросла за последние тридцать лет. Повышению безотказности работы станков и систем управления ими способствовали упрощение кинематических связей и высокая степень интеграции электронных компонентов. Однако условия опытно-конструкторского производства диктуют необходимость создания таких методов технологической подготовки, которые позволили бы за счёт многовариантной реализации технологических процессов компенсировать недостаток потенциальной ненадёжности сложного технологического оборудования.

Одним из способов оптимизации технологического проектирования как многоуровневого процесса последовательной детализации и оптимизации является изменение традиционной схемы разработки технологического процесса механической обработки деталей (рис. 3).

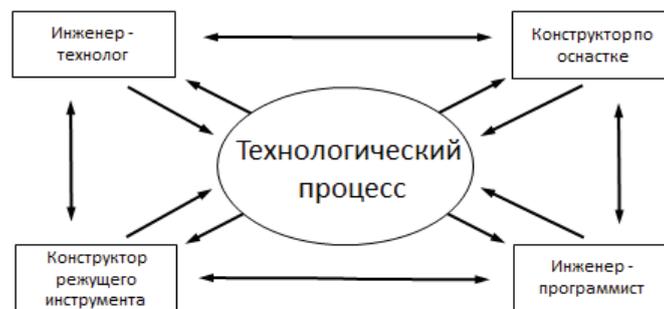


Рисунок 3 – Традиционная схема разработки технологического процесса

Выполнение одним человеком всего комплекса мероприятий по разработке и внедрению технологических процессов позволяет сократить время на подготовку, затрачиваемое обычно на анализ исходных данных и согласование принимаемых решений всеми специалистами, задействованными при разработке технологических процессов: инженером-технологом, инженером-программистом, конструкторами по оснастке и режущему инструменту. Такой подход к организации технологической подготовке опытно-конструкторского производства возможен при условии комплексной автоматизации проектных процедур на основе конструкторских и технологических баз данных и знаний.

Вопросы гибкого, комплексного подхода к разработке технологических

процессов приобретают все большую актуальность. Требование непрерывной, взаимосвязанной цепочки от разработки технологического процесса до получения готовой детали становится определяющим [8].

Совершенствование методов формирования оптимальной организационно-технологической структуры машиностроительного производственного процесса уже на ранних стадиях технологического проектирования следует рассматривать как один из важнейших факторов, определяющих в конечном итоге эффективность производственной деятельности предприятия.

Реализация методов комплексной автоматизации технологических систем внесла существенные коррективы в процессы проектирования и технологической подготовки машиностроительного производства. В отличие от традиционной практики проектирования человеко-станочных технологических систем, для которой характерно принятие укрупненных технологических решений, при создании новых и модернизации действующих автоматизированных технологических систем для опытно-конструкторского производства должен детально прорабатываться следующий ряд задач:

- глубокий анализ технологических свойств изделий с учетом перспективы изменения их номенклатуры или характеристик;
- разработка технических требований к вновь разрабатываемой или модернизируемой технологической системе и ограничений по конструкторско-технологическим характеристикам изготавливаемой в системе продукции;
- проектирование технологических процессов на все основные и вспомогательные операции производственного процесса по обработке материальных и информационных потоков в системе [9].

При комплексном подходе к выработке проектных решений различают два вида оптимизации технологических процессов, выполняемых на различных этапах технологического проектирования:

1) *структурная оптимизация*, которая заключается в выборе некоторой оптимальной структуры технологического характера: маршрута, операции, перехода, видов и методов изготовления заготовки, способов базирования, оборудования, приспособлений, инструмента и других объектов;

2) *параметрическая оптимизация*, которая состоит в определении оптимальных технологических параметров количественного характера, например, режимов обработки.

Современная теория технологии машиностроения рассматривает задачу технологического проектирования не как расчетную, а как задачу качественного характера, при решении которой значительную роль играет исследование взаимодействия элементов проектируемого объекта между собой и взаимодействия проектируемого объекта с внешней средой. При этом для решения этой задачи используется метод абстрагирования, который предполагает разложение явления на его элементы, выделение из них общих и существенных элементов отношений проектирования [10].

Существование структурного и параметрического аспектов оптимизации значительно усложняет решение технологических задач. В результате оптимальное технологическое проектирование представляет собой итерационный многоуровневый процесс последовательной детализации и оптимизации, содержанием которого являются многократное и последовательное выполнение процедур анализа, синтеза и оценки проектных решений [11].

Одной из существенных проблем технологического проектирования является неопределённость. Неопределённость в процессе изготовления машин вызывается множеством причин, все многообразие определяется факторами двух типов: физическими, обусловленными нестабильностью функционирования и свойств материальных объектов, участвующих в производственном процессе, и эпистемологическими, обусловленными субъективностью оценок и суждений, нестабильностью поведения субъектов – участников производственного процесса [12].

Неопределённость в технологических задачах может быть обусловлена и объяснена целым рядом общих причин:

- сравнительно слабой изученностью анализируемых процессов и явлений;
- отсутствием однозначного критерия качества функционирования объектов и систем;
- недостатком информации о физической сущности анализируемых процессов и объектов, как априорной, так и оперативной;
- отсутствием достаточно надежных адекватных реальности математических моделей;
- наличием существенных ошибок измерения контролируемых параметров процессов и объектов.

Ещё один аспект неопределённости – риск. Категория риска всё чаще применяется во многих областях профессиональной деятельности человека, в том числе в технологии машиностроения. В условиях риска решение принимается на основе стохастических моделей, оценивающих вероятность наступления или отсутствия тех или событий. При этом у инженера-технолога отсутствуют точные знания о проектируемом объекте и закономерностях его показателей. Принятие решений в условиях неопределённости и риска, когда трудно получить не только достоверную, но и вероятностную оценку качества проектных решений, является чрезвычайно трудной задачей.

Очевидно, в условиях опытно-конструкторского производства роль фактора неопределённости при решении технологических задач становится ещё более негативной. Всё это свидетельствует о сложности технико-экономических проблем и требует использования для их решения системного подхода, основанного на разумном сочетании современных математических методов, богатого опыта специалистов практиков и научных работников. Воплощением в данном случае системного подхода в деле модернизации технологической подготовки опытно-конструкторского производства является использование метода экспертных оценок, заключающегося в использовании

обобщенных формализованных оценок мнений коллектива специалистов по какому-либо вопросу решаемой технологической задачи [13].

Методы экспертных оценок имеют свои достоинства и недостатки. Как показал опыт, человек, принимая решение в условиях неопределённости, плохо оценивает вероятность будущих событий (большую вероятность назначает событиям, которые он лично чаще встречал), плохо оценивает априорную вероятность, практически неправильно ориентируется в условиях многокритериальной оптимизации, когда число показателей качества решения велико (три и более). В условиях неопределённости у человека проявляется плохая устойчивость (повторяемость) ответов в одной и той же ситуации. Человек во многих случаях приспособливает задачу к своим возможностям, при этом искажая ее. Ответ может зависеть также от того, как человеку подана информация [14].

В то же время опыт функционирования многих технических систем показывает, что одно из главных преимуществ человека, по сравнению с системами, реализующими автоматическое принятие решений, – возможность творческого соотнесения запрограммированных действий и операций с реальностью, их корректирование и выработка эффективных решений и способов поведения в непредвиденных, изменяющихся ситуациях. В условиях, когда критериев качества принимаемого решения много, выбор наилучшего, по мнению проектанта, решения осуществляется без полного осознания причин и правил выбора именно этого решения, понимания, насколько и почему оно лучше альтернативных [15].

Таким образом, методы экспертных оценок и глубоко автоматизированные экспертные системы и системы информационной поддержки инженера-технолога могут служить мощным инструментом разрешения неопределённостей, присутствующих в задачах технологической подготовки опытно-конструкторского машиностроительного производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Городилов А.Б., Веселовская В.С. Адаптивное управление наукоемким машиностроительным производством. – М.: РУСАЙНС, 2016. 104 с.
2. Кузнецов Б.Л., Кузнецова С.Б. Технологический менеджмент в условиях научно-технических революций XXI века. // Управленец. 2016. № 3 (61). С. 2-7.
3. Трушин Н.Н. Организационно-технологическая структура производственного процесса на машиностроительном предприятии. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2003. 230 с.
4. Подзираев О.С. Структурная модернизация машиностроительного комплекса. – М.: РГГУ, 2012. 2,6 п.л.
5. Организация производства и управление предприятием / Туровец О.Г. [и др.]. – М.: ИНФРА-Н, 2002. 485 с.
6. Насретдинов А.В., Пац И.Н., Мешков Е.В. Проектирование организационно-технологических структур производственных систем механической обработки. – Л.: Политехника, 1991. 255 с.
7. Митрофанов С.П. Групповая технология машиностроительного производства. Л.: Машиностроение, 1983. Т. 1. 404 с. Т. 2. – 376 с.
8. Базров Б.М. Модульная технология в машиностроении. М.: Машиностроение. 2001. – 368 с.

9. Амиров Ю.Д. Организация и эффективность научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. – М.: Экономика, 1974 240 с.
10. Амиров Ю.Д. Научно-техническая подготовка производства. – М.: Экономика, 1989. 230 с.
11. Dorf R.C., Kuisak A. Handbook of design, manufacturing and automation. 1994 by John Wiley & Sons, Inc. 1042 p.
12. Должиков В.П. Разработка технологических процессов механообработки в мелкосерийном производстве: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2003. 324 с.
13. Мельниченко В.В. Совершенствование управления качеством технической подготовки технологического оборудования с программным управлением. Дисс. ... канд. техн. наук. – Тула: ТулГУ, 2004. 216 с.
14. Волков В.И. Основы теории и практики экспертной деятельности – М.: Акад. менеджмента инноваций, 2003. 192 с.
15. Бубнов Д.В. Экспертные системы как средство интеллектуальной поддержки технологических решений // Вестник МГТУ Станкин. – 2011. – № 4. - С.83-86.

АВТОРЫ

Лазарев Андрей Юрьевич, аспирант, ведущий инженер-программист, lazanur@yandex.ru, Россия, Тула, АО "Конструкторское бюро приборостроения имени академика А.Г. Шипунова"

Трушин Николай Николаевич, д-р техн. наук, проф., trunikolaj@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет.

THE AUTHORS

Lazarev Andrey Urievich, industrial engineer, lazanur@yandex.ru, Russia, Tula, JSC KBP.

Trushin Nikolaj Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, trunikolaj@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФРЕЗЕРОВАНИЯ
СТЕКЛОТЕКСТОЛИТА МАРКИ СОНФМ КОНЦЕВОЙ
ФРЕЗОЙ ТИПА CBD
SONFM GRADE FIBERGLASS LAMINATE MILLING WITH THE CBD
END MILL STUDY**

ЛИСИЦИН В.Н., ТРУШИН Н.Н.
(ТулГУ, Тула, Россия)

LISITSIN V.N., TRUSHIN N.N.
(TSU, Tula, Russian Federation)

***Аннотация.** В данной работе представлены результаты экспериментального исследования влияния скорости резания и подачи на величину износа инструмента при фрезеровании стеклотекстолита марки СОНФМ. Определены эффективные значения подачи фрезы и скорости резания, получена стойкостная зависимость.*

***Annotation.** The study is an experimental research of the feed and cutting velocity impact on the tool wear for SONFM grade fiberglass laminate milling. The layered composite milling features and challenges were considered. Optimal mill feed rate and cutting velocity values were identified through direct tool wear measuring. A number of experimental data were acquired, and the wear vs. time curve was plotted.*

***Ключевые слова:** стеклотекстолит, концевая фреза, контурное фрезерование, скорость резания, стойкость.*

***Keywords:** fiberglass laminate, end mill, profile milling, cutting velocity, tool life.*

Печатные платы являются одним из основных компонентов радиоэлектронной аппаратуры самого широкого назначения. Печатные платы традиционно изготавливаются из фольгированного стеклотекстолита [1, 2]. Основными операциями обработки резанием заготовок печатных плат на металлорежущих станках являются сверлильная и фрезерная. Сверление применяется для монтажных и переходных отверстий. Фрезерованием обрабатывают плоскости, уступы, пазы, скосы и фасонные поверхности. Печатные платы со сложными контурами изготавливаются преимущественно методом контурного фрезерования концевыми фрезами [3, 4].

Фрезерная обработка композиционных материалов, к которым относится и стеклотекстолит, остаётся до настоящего времени недостаточно изученным процессом, несмотря на наличие в технической литературе рекомендаций по назначению режимов резания [5-7]. Как показывает производственный опыт, непосредственный перенос традиционных режимов обработки металлических материалов на композиты нерационален вследствие существенного различия их физических и механических свойств. Композитные материалы обладают

повышенной твердостью, что вызывает интенсивный износ режущего инструмента [8-10].

Исходя из заданных производственных условий, в качестве исходного конструкционного материала для печатных плат в экспериментах использовался стеклотекстолит марки СОНФМ [11]. СОНФМ представляет собой слоистый прессованный материал, изготовленный из стеклоткани, пропитанной связующим на основе эпоксидных смол и отвердителей, облицованный с одной или двух сторон медной электролитической гальваностойкой фольгой толщиной от 18 до 105 мкм. В ранее выполненных авторами экспериментах исследовалась фрезерная обработка стеклотекстолита СТЭФ-1 (ГОСТ 12652-74), химические и физические свойства которого отличаются от соответствующих свойств стеклотекстолита СОНФМ. В таблице 1 представлены для сравнения некоторые физические свойства обрабатываемых материалов.

Таблица 1

Основные физические свойства стеклотекстолитов

Свойства	СТЭФ-1	СОНФМ
Стойкость к кратковременному нагреву, град.	200	390
Разрушающее напряжение при изгибе перпендикулярно слоям по основе ткани, не менее МПа	390	320
Разрушающее напряжение при растяжении по основе ткани, не менее МПа	320	290
Плотность, кг/см ³	1600	1900

В качестве режущего инструмента использовалась концевая фреза типа CBD диаметром 2,5 мм, представляющая собой монолитную конструкцию из твёрдого сплава типа ВК6 (по каталогу российской компании «Остек-сервис-технология») [12]. Фрезерование опытных заготовок проводилось на специальном станке Schmoll MX с числовым программным управлением CNC-7 фирмы Exellon [13].

Выбор фрезы типа CBD для производственных экспериментов был обусловлен традиционным технико-экономическим критерием «цена-качество». Фрезы CBD (рис. 1) с малым зубом и с большими винтовыми стружечными каналами обеспечивают чистовое фрезерование контуров и пазов, за счет малой вибрации, передаваемой от заготовки к шпинделю [14]. Наличие у фрезы CBD винтовых режущих кромок, снабженных стружколомающими элементами, необходимо для надёжного удаления стружки, что является важным фактором обеспечения требуемого качества обработанной поверхности и срока службы фрезы. В ходе экспериментов параллельно исследовался также процесс отвода стружки из зоны резания, так как процесс фрезерования стеклотекстолита происходит без смазочно-охлаждающей жидкости. При этом отвод тепла из зоны резания происходит с помощью двух воздушных потоков. Первый воздушный поток создаётся от вращения шпинделя, а второй воздушный поток создаёт штатное устройство

станка отвода мелкой стружки из зоны резания. Слой фольги на стеклотекстолите обеспечивает также дополнительное рассеивание тепла с поверхности заготовки.

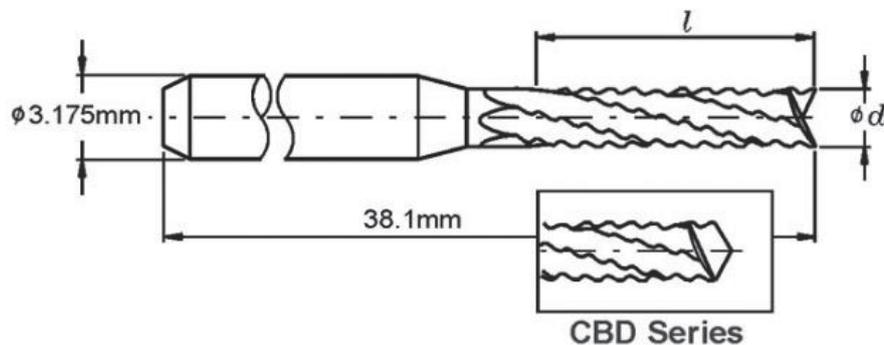


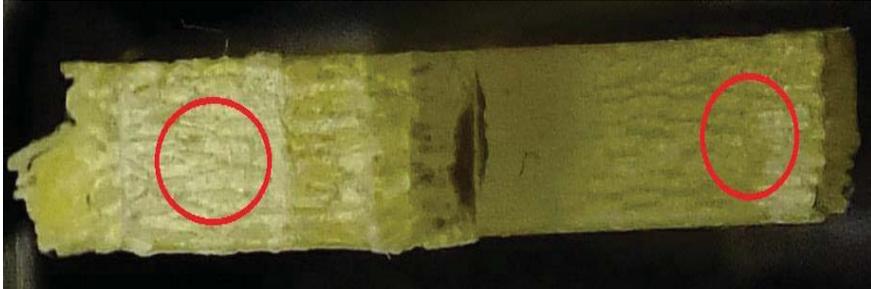
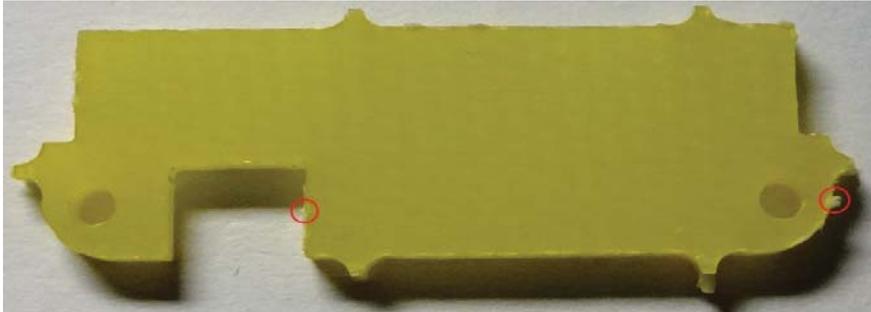
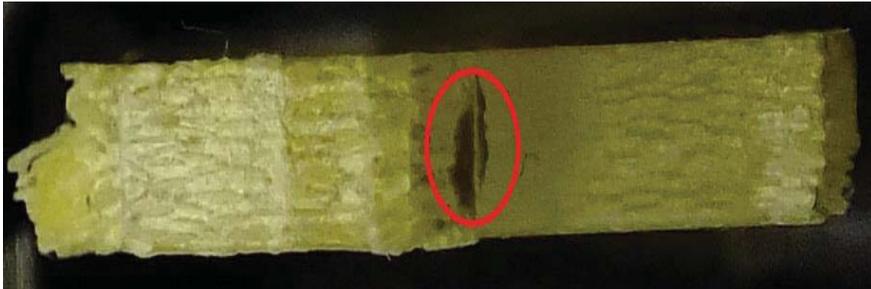
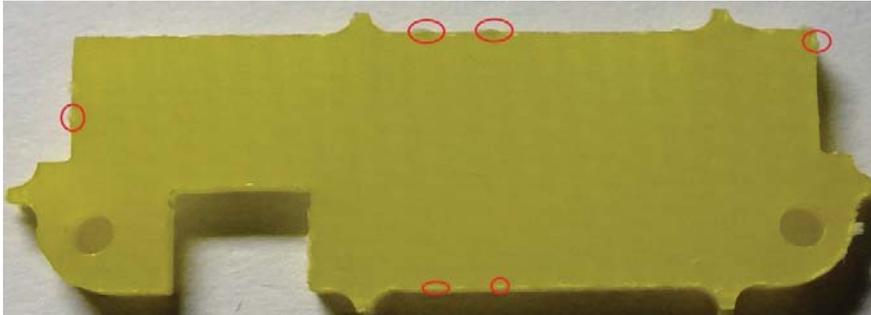
Рисунок 1 – Концевая фреза типа CBD

Изучение состояния фрез после пробных проходов осуществлялось с помощью лазерного измерительного оборудования DMG MORI, работающего под управлением программного обеспечения Microsoft Vision VIO [15].

С целью уменьшения вероятности проявления дефектов (образование кратера при первом касании инструмента заготовки, повреждение токопроводящего слоя прижимным механизмом и рабочей частью стола, что является критичным при производстве радиоэлектронной аппаратуры, разломачивания и растрескивания стеклотекстолита) был использован пакет из трёх слоев стеклотекстолитовых пластин. Обрабатываемая стеклотекстолитовая пластина толщиной 2 мм размещалась между двумя вспомогательными пластинами-прокладками из стеклотекстолита СОНФМ толщиной 1 мм. Таким образом, суммарная толщина обрабатываемого пакета составляет 4 мм. Необходимостью использования нижней прокладки является обеспечение гарантированного зазора между инструментом и столом станка. Глубина резания в экспериментальных проходах составляла 1 мм.

Ранее выполненные исследования показали, что для фрезерования стеклотекстолита необходим тщательный выбор оптимальной скорости подачи: при слишком малой подаче отдельные режущие кромки не смогут достаточно глубоко проникнуть в обрабатываемый материал, и вместо резания возникнет заглаживание материала. При этом возникает перегрев материала в зоне обработки и образование пленки нагара на режущих кромках. При слишком большой величине подачи возникает резкое снижение стойкости и увеличивается вероятность поломки фрезы. При прямом переносе режимов резания стеклотекстолита СТЭФ-1 на резание стеклотекстолита СОНФМ, изложенных в работе [14], выявлены дефекты поверхности, представленные в табл. 2.

Классификация дефектов обработанной поверхности

Вид дефекта	Наименование дефекта
	Вырывание волокон
	Разломачивание волокон
	Образование сажи
	Растрескивание верхнего слоя по контуру

В таблице 3 представлены результаты, полученные по шести пробным обработкам. Для использования данных на станке и создания таблицы программы эксперимента переведем скорость резания в частоту вращения шпинделя и скорость подачи в м/мин по формулам (1) и (2):

$$n = 1000V / \pi D, \quad (1)$$

где n - частота вращения шпинделя, мин^{-1} ; V - скорость резания, м/мин; D - диаметр фрезы, мм;

$$S_m = S_z z n, \quad (2)$$

где S_m - подача, м/мин; S_z - подача, мм/зуб; z - число зубьев фрезы.

Режимы резания для экспериментального исследования

№ п/п	Обороты шпинделя, тыс. мин ⁻¹	Подача фрезы, м/мин	Время обработки, мин.	Износ инструмента, мкм
1.	33	1,4	10	15
2.	33	0,6	10	12
3.	24	1,0	10	4
4.	30	1,4	10	10
5.	30	1,0	10	8
6.	24	1,0	44	15

При малых скоростях резания происходит вырывание волокон из материала и быстрый износ режущей части инструмента, при слишком высоких скоростях происходит образование нагара на обрабатываемой поверхности стеклотекстолита и не менее быстрый износ инструмента. При малой подаче происходит также вырывание волокон поверхности, а при слишком большой подаче происходит поломка инструмента.

На рис. 2 и 3 представлены копии экранов измерительной установки DMG MORI в процессе исследования режущей части фрезы и замера её износа после фрезерования стеклотекстолита при скорости подачи 1,0 м/мин и частоте вращения шпинделя станка 24000 мин⁻¹.

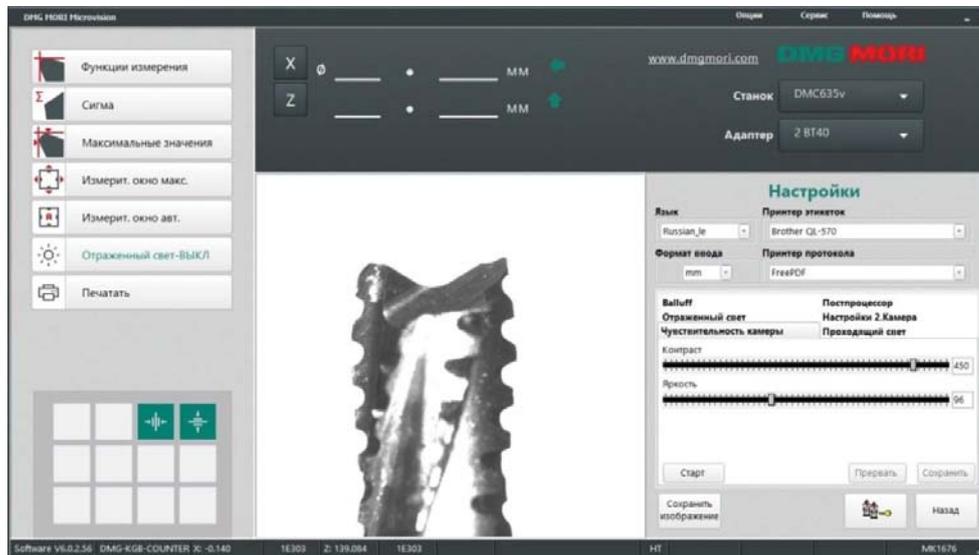


Рисунок 2 – Изношенная режущая часть фрезы

На рис. 2 видно, что режущие кромки фрезы имеют сколы, а также неравномерный износ режущей части из-за неоднородности обрабатываемого материала.

На рис. 3 видно, что минимальный износ режущей части составил 10 мкм, при этом износ режущей части у первого и четвертого зубьев несколько больше, чем у второго и третьего зубьев.

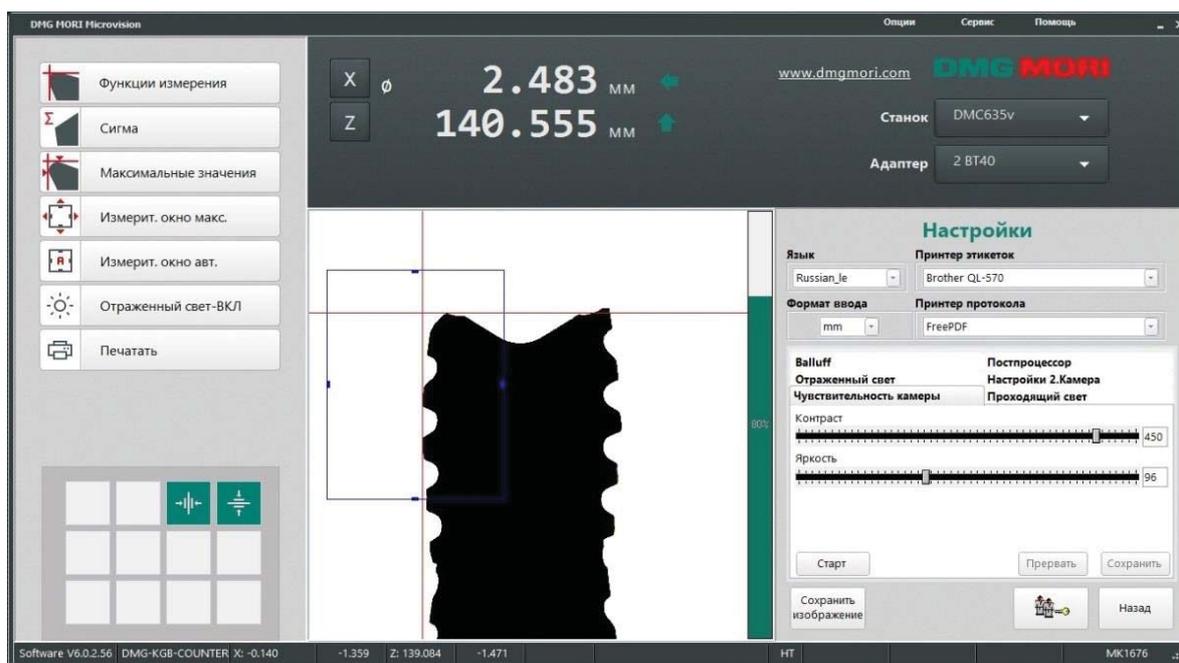


Рисунок 3 – Замер величины износа режущей части фрезы

По результатам экспериментов было установлено, что для твёрдосплавной фрезы типа СВД диаметром 2,5 мм и толщине обрабатываемого пакета 4 мм оптимальная скорость резания составляет 188 м/мин при подаче 1 м/мин. Установленные режимы резания обеспечивают шероховатость $R_a=40$ мкм. Согласно ОСТ 3-1291-82 максимальное значение шероховатости R_a должно быть в пределах от 50 до 25 мкм [16]. Отметим также, при фрезеровании стеклотекстолита СТЭФ-1 фрезой СВД оптимальная скорость резания в аналогичных условиях обработки составила 235 м/мин [14].

После проведения экспериментов определим зависимость стойкости инструмента от режимов резания. В связи с отсутствием в ТУ 2296-001-40230483-2001 указаний о нормативной твёрдости СОНФМ параметр, характеризующий это свойство материала, был исключен из расчётов. Формула степенной зависимости в общем виде:

$$T = \frac{C_v}{V^x S^y b^z h^l}, \quad (3)$$

где T – стойкость инструмента, мин; C_v – поправочный коэффициент; V – скорость резания, м/мин; S – подача, м/мин; b – ширина резания, мм; h – диаметральный величина износа режущих кромок, мм; x, y, z, l – коэффициенты.

Приведем уравнение (3) к линейной логарифмической форме:

$$\ln T = \ln C_v - x \ln V - y \ln S - z \ln b - l \ln h, \quad (4)$$

$$\ln C_v = w, \quad (5)$$

$$\ln T = w - x \ln V - y \ln S - z \ln b - l \ln h. \quad (6)$$

Для нахождения поправочных коэффициентов необходимо решить систему уравнений с помощью программного обеспечения РТС Mathcad prime 4.0 [17]. Для расчётов были выбраны экспериментальные данные №№ 1, 3-5 из таблицы 2. Процесс расчёта представлен на рис. 4.

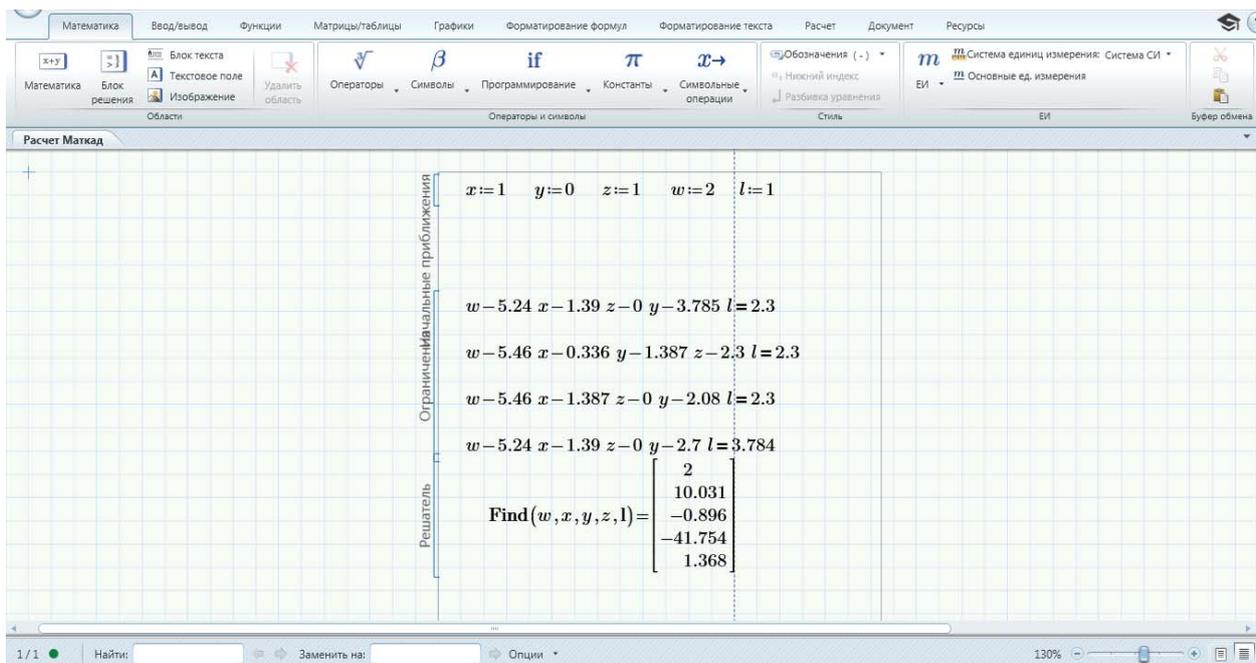


Рисунок 4 – Расчёт коэффициентов в системе Mathcad

Рассчитаем коэффициент C_v путем обратного логарифмирования и подставим полученные коэффициенты в формулу (3)

$$C_v = e^w, \quad (7)$$

$$T = \frac{7.29}{V^{-10.031} S^{-0.896} b^{-41.754} h^{1.368}}. \quad (8)$$

Выводы. Выполненные исследования позволили определить аналитическую формулу для расчёта стойкости концевой фрезы типа CBD в зависимости от режимов обработки. Установлено, что при контурном фрезеровании заготовки из стеклотекстолита СОНФМ твёрдосплавной концевой фрезой типа CBD диаметром 2,5 мм при ширине фрезерования 4 мм, глубине резания 1 мм и подаче 1 м/мин оптимальная скорость резания составляет 188 м/мин. Результаты экспериментов используются в производственной практике АО КБП (г. Тула).

ЛИТЕРАТУРА

1. Гормаков А.Н., Воронина Н.А. Конструирование и технология электронных устройств и приборов. Печатные платы. Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. 164 с.
2. Медведев А. Печатные платы. Конструкции и материалы. – М.: Техносфера, 2005. 304 с.
3. ГОСТ Р МЭК 61188-5-1-2012. Печатные платы и печатные узлы. Проектирование и применение. Часть 5-1. Анализ соединений (посадочные места для монтажа компонентов). Общие требования. – М.: Стандартинформ, 2015. 61 с.
4. Штучный Б.П. Механическая обработка пластмасс. 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1987. 152 с.
5. Крылов В.П. Технологии и подготовка производства печатных плат. Учебное пособие. – Владимир: Изд-во ВлГУ, 2006. 64 с.
6. Пирогова Е.В. Проектирование и технология печатных плат. Учебник. – М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2005. 560 с.
7. Корягин С.И., Пименов И.В., Худяков В.К. Способы обработки материалов. Учебное пособие / Калининград: Калинингр. ун-т., 2000. 448 с.

8. Ильин В.А. Технология изготовления печатных плат. – Л.: Машиностроение, 1984. 77 с.
9. Махмудов М. Механическая обработка печатных плат. – М.: Радио и связь, 1986. 72 с.
10. Лобанов Д.В., Янюшкин А.С., Рычков Д.А. Технологические методы изготовления и выбора режущего инструмента для фрезерования композиционных материалов на полимерной основе // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2015. Т. 15. № 1. С. 35-46.
11. ТУ 2296-001-40230483-01. Стеклотекстолит нормированной горючести фольгированный модифицированный СОНФМ. – ЗАО "Изолит", 2001. 25 с.
12. Каталог расходных материалов и инструментов фирмы "Остэк". URL: <http://www.ostec-st.ru/catalog/equipment/frezy-i-svyerla/sbf-freza-s-malym-zubom-i-bolshim-struzhechnym-kanalom-vershina-frezy-lastochkin-khvorost/> (дата обращения 17.10.18).
13. Каталог оборудования и инструментов фирмы Schmolz. URL: <http://www.schmolz-maschinen.de/en/applications.html> (дата обращения 17.10.18).
14. N N Trushin, V N Lisitsin. Experimental study of fiber-glass plastic work pieces contour milling. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 327 (2018) 042110 doi:10.1088/1757-899X/327/4/042110.
15. Каталог оборудования и инструментов фирмы DMG MORI. URL: <http://ru.dmgmori.com/продукты/устройства-предварительной-наладки/устройства-предварительной-наладки-инструмента/vio> (дата обращения 17.10.18).
16. ОСТ 3-1291-82. Конструкторские нормы. Шероховатость поверхности. Указания по выбору.
17. Поддержка пользователей Mathcad. URL: <https://www.ptc.com/en/products/mathcad/> (дата обращения 17.10.18).

АВТОРЫ

Лисицин Владимир Николаевич, инженер-технолог, аспирант, 8-953-422-18-10, itmytrue@inbox.ru, Россия, 300012, Тула, проспект Ленина, д. 92, Тульский государственный университет.

Трушин Николай Николаевич, д-р техн. наук, профессор, 8-(4872)-25-46-48, trushin@tsu.tula.ru, Россия, 300012, Тула, проспект Ленина, д. 92, Тульский государственный университет.

THE AUTHORS

Lisitsin Vladimir Nikiolaevich, industrial engineer, postgraduate, 8-953-422-18-10, itmytrue@inbox.ru, Russia, 300012, Tula, Lenin av., 92, Tula State University.

Trushin Nikolay Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, 8-(4872)-25-46-48, trushun@tsu.tula.ru, Russia, 300012, Tula, Lenin av., 92, Tula State University.

ГИБРИДНОЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ: ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПЛЕКСИРОВАННЫХ МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩИХ СТАНКОВ*

**ТИТОВА К. А., СКИБА В. Ю., ИВАНЦИВСКИЙ В. В.,
ВАХРУШЕВ Н.В.**

*(Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, Россия)*

**TITOVA K. A., SKEEBA V. YU., IVANTSIVSKY V. V.,
VAKHRUSHEV N.V.**

(Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia)

Аннотация. В данной статье рассмотрены методы повышения качества деталей машин с применением интегрированной обработки, на специальном оборудовании.

Annotation. In this article method of improving the quality of machine parts with the use of integrated processing, on special equipment are considered.

Ключевые слова: алмазное выглаживание, гибридное оборудование, шероховатость, режимы обработки, комплексирование.

Key words: diamond smoothing, hybrid equipment, roughness, processing modes, complexing.

Из года в год повышение качества изготовления изделия на производстве приобретает все большую и большую актуальность. В связи с этим очень активно развивается станкостроение, происходит модернизация или усовершенствование имеющегося на производстве оборудования. В качестве нового типа технологического оборудования представлен - многофункциональный гибридный обрабатывающий комплекс.

Оборудование позволяет комбинировать различные виды обработок детали [1]. Наглядным примером является комбинирование лазерной закалки с механической обработкой или совокупность на одном технологическом оборудовании абразивного шлифования и поверхностной закалки и т. д [2,3].

Данный комплекс позволяет сократить время перехода с операции на операцию, обеспечивает высокую производительность и повышение качественных характеристик поверхности в том числе: точности формы, размеров и взаимного расположения поверхностей, шероховатости и заданных физико-механических свойств [4].

*Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России, код проекта: 9.11829.2018/11.12.

Для проведения исследования в данной работе была выбрана следующая последовательность технологических операций: токарная механическая обработка, закалка ВЭН ТВЧ, и финишная выглаживание [5].

Известно, что финишная операция в большей степени оказывает влияние на формирование показателей обрабатываемой поверхности в том числе: шероховатость, величину и характер распределения микротвердости, остаточных напряжений, микроструктуру и др [6-9]. Поэтому цель исследования – произвести исследование обрабатываемой поверхности, полученной на гибридном оборудовании с использованием в качестве финишной операции алмазное выглаживание [10-13].

Экспериментальные исследования производились на заготовке из стали 45 ГОСТ 1050-88. Твердость стали на начальной стадии изучения составляла 190 HV. После чернового точения и закалки ВЭН ТВЧ глубина упрочнения составила 0,17 мм. Это позволило получить среднюю твердость поверхностного слоя 739 HV.

Одним из условий на данном этапе было сохранить уже сформированные показатели поверхности после закалки ВЭН ТВЧ.

При выполнении чистовой операции, ее режимные параметры отслеживались более тщательным путем, поскольку ошибка в назначении режима резания может привести к потере качественных характеристик и работоспособности поверхности в целом. В итоге при выполнении чистового точения была получена шероховатость поверхности $Ra = 1,5 \pm 0,2$ мкм.

Поверхностное пластическое деформирование является одной из эффективных технологий упрочнения, поэтому в качестве финишной операции использовалось алмазное выглаживание. В процессе исследования наблюдалось изменение шероховатости Ra . Экспериментально было обнаружено, что наиболее подходящей величиной силы выглаживания оказался диапазон от 100Н до 150Н. Работа в обозначенном интервале сил способствовала фиксированному значению шероховатости $Ra = 0,2 \pm 0,06$ мкм. Это позволило исключить влияние шероховатости на качество обработанной поверхности детали.

Результаты выполненных теоретических и практических исследований позволили получить поверхностный пластически деформированный слой, который имел округлую форму микрорельефа, без задигов и вырывов, а толщина упрочненного слоя составила 0,03...0,04 мм.

На основании этих выводов появилась возможность охарактеризовать и получить четкую зависимость параметров шероховатости Ra от назначенных режимов обработки для гибридного типа оборудования [14,15].

В заключении пришли к выводу, что использование многофункционального гибридного обрабатывающего комплекса с дополнительно оснащенной операцией алмазного выглаживания, привела к повышению характеристик качества поверхностного слоя обрабатываемой детали, сокращению показателей отклонения формы, а также уменьшению потребления электроэнергии, что положительно сказалось на производственно-технологических и экономических показателях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Technical characteristics of the integrated processing equipment / Parts K., Skeebe V., Vakhrushev N., // Сборнике: Science. Research. Practice Сборник трудов городской научно-практической конференции аспирантов и магистрантов. Отв. ред. А.Ю. Алябьева. 2018. С. 197-198.
2. Depth distribution of temperature in steel parts during surface hardening by high frequency currents /Ivancivsky V., Parts K., Popov V., // Applied Mechanics and Materials., 2015. Т. 788. С. 129-135.
3. Макаров В.М. Комплексованные технологические системы: перспективы и проблемы внедрения//Ритм: Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация. -2011. -№ 6 (64). -С. 20-23.
4. Обеспечение качества технологического оборудования /Жирова А.А., Парц К.А., Гаврилов А.К., Хорошун Д.В., Птицын С.В., // В сборнике: «Техникаи технология современных производств»сборник статей II Международной научно-практической конференции. Под редакциейВ.А. Скрябина, А.Н. Машкова, 2015. С. 44-47;
5. Гибридная обработка: интеграция поверхностно-термической и финишной механической операций на одном технологическом оборудовании/ Скиба В.Ю., Иванцовский В.В., Скиба П.Ю., Анваров Ю.М., // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 1-4 (55). С. 111-115.
6. Ding H.T., Shin Y.C. / Laser-assisted machining of hardened steel parts with surface integrity analysis//International Journal of Machine Tools and Manufacture. -2010. -Vol. 50, iss. 1. -P. 106-114.
7. Hybrid processes in manufacturing/B. Lauwers, F. Klocke, A. Klink, A.E. Tekkaya, R. Neugebauer, D. Mcintosh//CIRP Annals -Manufacturing Technology. -2014. -Vol. 63, iss. 2. - P. 561-583.
8. Multi-technology platform for hybrid metal processing/C. Brecher, F. Hoffmann, A. Karlberger, C.-J. Rosen//Manufacturing Systems and Technologies for the New Frontier: the 41st CIRP Conference on Manufacturing Systems, Tokyo, Japan, May 26-28, 2008. -Tokyo, 2008. -P. 425-428.
9. Salonitis K., Chondros T., Chryssolouris G. Grinding wheel effect in the grind-hardening process//The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. -2008. -Vol. 38, iss. 1-2. -P. 48-58.
10. Shiva a multiarms machine tool / GarroO., Martin P., Veron M. //CIRP Annals -Manufacturing Technology. -1993. -Vol. 42, iss. 1. -P. 433-436.
11. Surface hardening of steels with carbon by non-vacuum electron-beam processing / I.A. Bataev, M.G. Golkovskii, A.A. Bataev, A.A. Losinskaya, A.I. Popelyukh, E.A. Drobyaz //Surface and Coatings Technology. 242 (2014) 164-169.
12. M.A. Béjar, R. Henríquez Surface hardening of steel by plasma-electrolysis boronizing//Materials and Design. 5 (2009) 1726-1728.
13. Computer simulation of induction hardening / F. Cajnera, B. Smoljanb, D. Landeka//Journal of Materials Processing Technology. 157-158 (2004) 55-60.
14. Птицын С.В., Чёсов Ю.С. Методология прогнозирования технических характеристик станков//Известия вузов. Машиностроение, 2000. №1-2. С. 90-96.
15. Проектирование металлорежущих станков и станочных систем / Проников А.С., Борисов Е.И., Бушуев В.В. // Том 2, часть 2. Расчет и конструирование узлов и элементов станков. Справочник-учебник. В 3-х томах. -М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана: Машиностроение, 1995. 320 с.

АВТОРЫ

Титова К. А. – ассистент, НГТУ, 89831303313, krispars@yandex.ru;

Скиба В. Ю. – к.т.н., доцент, НГТУ,

Иванцовский В. В. – д.т.н., доцент, НГТУ,

Вахрушев Н. В. – ассистент, НГТУ,

THE AUTHORS

Titova K. A. - Assistant, NSTU, 89831303313, krispars@yandex.ru;

Skeebe V. Yu. - Candidate of technical sciences, associate professor, NSTU, skiba@corp.nstu.ru;

Ivantsivsky V.V. - Doctor of technical sciences, associate professor, NSTU, ivancivskij@corp.nstu.ru;

Vakhrushev N.V. - Assistant, NSTU, vah_nikit@mail.ru.

КОЛИЧЕСТВЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦИНКА В КОМПЛЕКСЕ

QUANTITATIVE DETERMINATION OF ZINC IN COMPLEX

ЗАЖИВИХИНА Е.И., МАРКОВА С.А., СМИРНОВА С.Н., ЗАЖИВИХИН Д.А.
(Чувашский государственный университет имени И.Н.Ульянова,
г. Чебоксары, Российская Федерация)

ZAZHIVIKHINA E.I., MARKOVA S.A., SMIRNOVA S.N., ZAZHIVIKHIN D.A.
(Chuvash State University named after I.N. Ulyanov, Cheboksary,
Russian Federation)

Аннотация. Эффективный состав, содержащий гидроксид натрия:перекись водорода:глицерин в соотношении 4:1:0,05. Определение цинка комплексонометрическим и фотоколориметрическим методами. Количественное содержание цинка в цинкате натрия в пределах достоверности.

Abstract. The composition containing sodium hydroxide, hydrogen peroxide : glycerol in the ratio 4:1:0,05. The chelatometric determination of zinc and photocolometric methods. The zinc content in zincate of sodium in the confidence limits.

Ключевые слова: цинковые отложения. Количественные методы определения.

Keywords: zinc deposits. Quantitative methods of determination.

Главной причиной некачественного цинкового покрытия является восстановление первоначального состояния подложки и ее подготовка к повторному нанесению покрытия. Необходимость удаления покрытия может быть вызвана разными причинами: несоответствующий внешний вид (блеск или цвет покрытия), недостаточная равномерность слоя, наличие непокрытых участков и т.д., бракованные изделия подвергаются обработке. Процесс удаления покрытия должен быть максимально щадящим, т.е. он должен быть направлен на устранение нанесенного слоя без каких-либо последствий для подложки. Чтобы уменьшить риск воздействия на подложку, в растворы добавляют различные комплексообразователи, которые ускоряют процесс растворения покрытия, а также ингибиторы для предотвращения повреждения основной поверхности. Основная задача исследователей - найти простой и недорогой кислотный или щелочной раствор, который растворит нанесенный слой и не повредит подложку. Для этой цели используется серная и азотная кислоты. Если для снятия покрытия необходима щелочь (как правило, это условие выдвигается при работе с амфотерными металлами – алюминием, оловом и цинком), чаще всего применяется углекислый натрий (слабая щелочь) и гидроксиды (более сильные). Рекомендуемые в качестве аналогов калиевые

соли по техническим характеристикам даже превосходят углекислый натрий, однако, используются гораздо реже из-за более высокой стоимости. Выбрав между щелочью и кислотой, необходимо определиться с концентрацией раствора. Более концентрированные растворы в большинстве случаев действуют быстрее, кроме того, такие кислоты как азотная обладают двойными свойствами – кислотными и окисляющими, и концентрация влияет на то, какие из них будут выражены ярче. Более эффективным способом ускорения процесса растворения является применение перемешивания и увеличения температуры посредством нагрева до допустимых пределов. Существуют несколько общих правил составления композиции раствора. Состав для снятия покрытий включает три основных компонента: 1 - кислотный или щелочной растворитель, в большинстве случаев обладающий окислительными свойствами, позволяющими ускорить процесс растворения покрытия, не повреждая подложку; 2 – комплексообразователь, обеспечивающий селективность растворения и растворимость средства, а также продлевающий срок его использования; 3 – ингибитор, снижающий риск повреждения подложки. Известен способ химической очистки внутренней поверхности оборудования, включающий циркуляцию раствора, состоящего из аммиака, трилона Б, лимонной кислоты, гидразин-гидрата и бензтриазола при рН 3,5-4,0. Этим раствором можно очистить теплообменные поверхности аппаратов от отложений продуктов коррозии при повышенной температуре раствора (свыше 80°C) в течение 5-6 часов [1]. Недостатком данного раствора является высокая температура проведения процесса, что усложняет технологию очистки. Кроме того, из-за низких значений рН сопровождается коррозией оборудования. Известен способ очистки оборудования от продуктов коррозии меди и железа, включающий обработку в течение 2,5 часов раствором, содержащим мас.% динатриевую соль этилендиаминтетрауксусной кислоты (трилон Б) 3-4, тиомочевину 0,5-1, аммиак до рН 8,0-8,5, воду, после чего к раствору добавляют 0,05-0,07 мас.% бензтриазола и обработку продолжают в течение 1 часа [2]. К недостаткам относится сложность и длительность обработки (3,5 часа). Задачей исследования является разработка упрощенного способа очистки внутренней поверхности оборудования, расширяющий арсенал средств данного назначения.

Известен раствор для удаления цинковых покрытий со стальных изделий. Исследование относится к составам для химической обработки металлов, а именно, к удалению цинковых покрытий со стальных изделий химическим путем. Целью изобретения является интенсификация процесса и снижение наводораживания стальных изделий [3]. Раствор содержит кислоты: серная, соляная, соли азотной кислоты, нитраты щелочных металлов калия или натрия. Интенсификация процесса достигается за счет введения нитрата. Недостатком данного раствора является низкое значение рН и очистка сопровождается коррозией оборудования. Авторы (SU 1805687) предложили раствор для очистки стальной и латунной поверхностей теплоэнергетического оборудования. Раствор содержит трилон Б, перекись водорода, гидроксид натрия и его используют при химической очистке теплоэнергетического оборудования в энергетической, химической и металлургической

промышленности. Однако, недостаток этого раствора заключается в том, что при растворении им отложений с высоким содержанием продуктов коррозии меди и медных сплавов происходит выделение металлической меди на поверхности коррозионного оборудования, что приводит к его повышенному коррозионному износу при дальнейшей эксплуатации.

Одним из актуальных направлений в машиностроении является очистка металлических покрытий от различных отложений, в том числе от медных и цинковых, образующихся на шарах шаровых мельниц, что позволяет использовать их многократно для работы с другими металлами без загрязнения медью и цинком [4, 5]. Исследование относится к составам для химической обработки металлов, а именно, к удалению медных и цинковых покрытий со стальных изделий химическим путем.

Основная цель подбора реагентов для приготовления раствора для удаления цинковых покрытий со стальных изделий – это разработка упрощенного способа очистки металлических изделий и достигнуть его окисления за счет понижения окислительно-восстановительного потенциала цинка. Цинк активнее большинства металлов – железа, меди, поэтому снятие его с металлической поверхности не представляет особых затруднений. Значение коррозионного потенциала цинка изменяется в пределах от $E^0 = -0,76$ В до $E^0 = -1,2$ В. В лабораторных исследованиях использовали следующие составы:

1. $Zn + NaOH + H_2O \rightarrow Na_2[Zn(OH)_4] + H_2 \uparrow$
2. $Zn + 4NH_3 + H_2O_2 \rightarrow [Zn(NH_3)_4] \cdot (OH)_2$
3. $Zn + 2NaOH + H_2O_2 \rightarrow Na_2ZnO_2 + 2H_2O$
4. $Zn + Na_2SiO_3 \cdot 9H_2O + H_2O \rightarrow Na_2ZnO_2 + H_2SiO_3 \downarrow$ [6].

Наличие нарушения поверхностного слоя высокоуглеродистой стали проверяли визуально и качественной реакцией. Для этого на поверхность очищенного образца стали добавляли 3-4 капли роданида-иона (CNS^-) на наличие иона Fe^{+3} . Отсутствие кроваво-красного окрашивания говорит о неповрежденной поверхности стали (отсутствие коррозии): $Fe^{+3} + 3CNS^- \rightarrow Fe(CNS)_3$ [4, 5].

Наиболее эффективным для очистки высокоуглеродистых сталей от цинковых покрытий явился состав, содержащий крепкий раствор гидроксида натрия, концентрированный раствор перекиси водорода и дополнительно глицерин. Состав готовили обычным смешением компонентов. Обработку вели при комнатной температуре. Для испытаний брали стальные пластины размером $4,02$ см³, на которые были нанесены цинковые покрытия. Полноту удаления покрытия определяли реакцией Zn^{+2} с дитизоном по появлению характерного малиново-красного кольца, свидетельствующее о присутствии Zn^{+2} .

Для осуществления способа очистки металлических поверхностей от цинковых отложений использовали следующие реактивы: натрия гидроксид ГОСТ 2263-79, водорода перекись ГОСТ 177-88, $\rho = 1,19$ г/см³; глицерин ГОСТ 6824-96; вода хозяйственно-питьевого и промышленного водоснабжения ГОСТ 4979-49. Образующееся соединение – раствор цинката натрия можно использовать как микроэлементную добавку для растений. Цинк оказывает влияние на окислительно-восстановительные процессы в растениях,

содержание хлорофилла и образование ростовых веществ(ауксинов), увеличивает рост корневой системы – пример утилизации полученного отхода.

Для количественного определения цинка в цинкате натрия использовали комплексометрический и фотометрический методы для оценки достоверности полученных результатов.

Из статистических данных установлено, что содержание цинка в цинкате натрия находится в пределах достоверности и определяется интервалами ($x \pm \Delta X$), S_r : 1 образец ($8,78 \pm 0,13$), 1,53; 2 образец ($8,87 \pm 0,13$), 1,43; 3 образец ($8,95 \pm 0,13$), 1,41.

Из данных следует, что предлагаемые способы определения характеризуются достаточной точностью и хорошей воспроизводимостью результатов, просты в исполнении, не требуют дорогостоящего аппаратурного определения.

В Лаборатории СКБ «Сувар» разработан препарат «Сувар», содержащий жизненноважные микроэлементы (железо, медь, кобальт, марганец, в том числе и цинк) на основе абиединовой кислоты, используется как кормовая добавка, успешно применяемая в животноводстве и птицеводстве[7-22].

При комплексометрическом определении ионов цинка в абиедате цинка использовали следующие реагенты: ЭДТА – 0,005М стандартный раствор; индикатор – эриохром черный Т, сухой препарат; аммиачный буферный раствор с pH=10.

Таблица 1

Результаты титрования

№ пробы	1	2	3
V, мл	8,5	8,6	8,6
$\omega(\text{Zn})$, %	9,19	9,31	9,31

Таблица 2

Статистическая обработка результатов титрования

X_i	$X_{\text{сред}}$	S	S_r	ΔX	$X_{\text{сред}} \pm \Delta X$
9,19					
9,31	9,27	0,069282032	1,83	0,17	9,27+0,17
9,31					

Теоретическое значение:

$$\omega(\text{Zn}) = \frac{\text{Ar}(\text{Zn})}{\text{M}((\text{C}_{19}\text{H}_{29}\text{COO})_2\text{Zn})};$$

$$\omega(\text{Zn}) = 65 \cdot \frac{37}{668} \cdot 25 = 9,78\%$$

Количественные определения цинка в комплексе, абиетате цинка характеризуются достоверностью результатов, систематические ошибки отсутствуют. Комплексонометрическим титрованием можно определять почти все ионы металлов и анионы. Данный метод является быстрым и простым в исполнении, универсален. Научные исследования в этой области продолжаются.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гронский Р.К., Маклакова В.П. Способ химической очистки внутренней поверхности теплообменников. Патент РФ № 378571 // Бюл. № 19 от 18.04.1973 г.
2. Цхвирашвили Д.Г., Калабегашвили Н.Г., Бебришвили З.Д., Таран А.И., Бабич В.Г. Способ очистки оборудования. Патент РФ №1787174 // Бюл. № 31 от 10.11.2000 г.
3. Чертыковцева Т.А., Корюшин А.П., Бурлаков В.В., Дубкова В.Д. Раствор для удаления цинковых покрытий со стальных изделий. Патент РФ № 1406214 // Бюл. №24 от 30.06.88 г.
4. Живихина Е.И. Способ очистки металлических поверхностей от медных отложений / А.Н. Лыщиков, С.Н. Смирнова, С.А. Маркова, Л.В. Королева, В.Г. Кирий // Патент РФ № 2548547. Оpubл. 20.04.2015. Бюл. №11.
5. Живихина Е.И., Маркова С.А., Смирнова С.Н., Живихин Д.А. Очистка металлических поверхностей от цинковых отложений // Современные технологии в машиностроении и литейном производстве: Материалы III-ей Всероссийской науч.-практич. конференции, Чебоксары, 4-6 декабря 2017г. / под ред. д.т.н., проф. И.Е. Илларионова. – Чебоксары: Изд-во Чуваш.гос. ун-та, 2017. –С. 214-217.
6. Живихина Е.И. Гидрометасиликат натрия / Живихина Е.И., Маркова С.А., Смирнова С.Н. Современные проблемы экологии: доклады XVII Междунар. науч.-технич. конференции под общ. ред. В.М. Панарина. – Тула: Изд-во «Инновационные технологии», 2017. – С. 109-110.
7. Тремасов П.И., Живихина Е.И., Маркова С.А., Ситулина И.Г., Киселев И.М. Применение некоторых абиетатов металлов для повышения продуктивности в сельском хозяйстве // Естественные науки: сегодня и завтра: Тезисы докладов юби-лейной итоговой научной конференции. – Чебоксары: Изд-во Чувашского госу-дарственного университета, 1997. – С.229-231.
8. Живихина Е.И., Маркова С.А., Смирнова С.Н., Сошитов К.С., Клейменов Д.Я., Блинова К.Н. Патент РФ № 2123355 // Бюл. № 35 от 20.12.98.
9. Живихина Е.И., Маркова С.А. Биологическая роль препарата «Сувар» для крупного рогатого скота // Геохимическая экология и биогеохимическое изучение таксонов биосферы: Материалы 3-ей Российской биогеохимической школы, Горно-Алтайск, 4-8 сентября 2000. – Новосибирск. – С.252.
10. Живихина Е.И., Маркова С.А., Папуниди К.Х. Влияние препарата «Сувар» на минеральный обмен у телят // XVIII съезд физиологического общества им. И.П. Павлова: Тез.докл. – Казань; М.: ГЭОТАР-МЕД, 2001. – С 339.
11. Живихина Е.И., Маркова С.А. Комплексное применение препарата «Сувар» с дезинфицирующим препаратом «Бальзам-ЭКБ» // Семейная медицина в современных условиях: материалы научно-практической конференции Приволжского Федерального округа. - Чебоксары: Изд-во Чуваш.ун-та, 2002. –С. 213-214.
12. Живихина Е.И., Маркова С.А. Основные лесохимические продукты, используемые для МЭП // Наука в XXI веке: Тезисы докладов республиканской научно-практической конференции по химии. – Чебоксары: Изд-во Чувашского государственного университета, 2002. - С. 84-85.
13. Живихина Е.И., Маркова С.А. Усовершенствованный способ получения микроэлементного препарата «Сувар» на основе терпеноидов для сельскохозяйственных животных и птиц // НАУКА ТА ІННОВАЦІЇ 2005: Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Наука та інновації – 2005. Том 2. Біологія, хімія та хімічні технології. Дніпропетровськ: Наука і освіта. 2005. –С. 65-67.

14. Заживихина Е.И., Маркова С.А., Заживихин Д.А. Биологическая роль некоторых микроэлементов // Актуальные проблемы современного естествознания: Материалы Всероссийской науч.-практич. конференции / Под ред. Л.Н. Воронова и др. – Чебоксары: Чувашигоспедуниверситет им. И.Я. Яковлева. 2006. –С. 148-151.
15. Заживихина Е.И., Маркова С.А., Заживихин Д.А. Комплексное применение препарата «Бальзам-ЭКБ» с микроэлементным препаратом «Сувар» // Глобальные проблемы экологизации в Европейском сообществе: Сборник трудов Международной конференции, посвященной 10-летию образования Международного информационно-экологического парламента. – Казань, 28-29 сентября 2006. -С. 200-201.
16. Заживихина Е.И. Синтез и исследования биологически активных препаратов (макро-, микро-, ультраэлементов на основе терпеноидов / Заживихина Е.И., Маркова С.А., Смирнова С.Н., Заживихин Д.А. // Научно-практическая Республиканская конференция «Наука в развитии села». – Чебоксары: Изд-во Чув. ГСХА, 2009. - С. 77-80.
17. Заживихина Е.И., Маркова С.А., Никифорова Е.С. Количественное определение меди в органических объектах // Сб. материалов Всерос. научно-практ. конф. с междунар. участием "Наука и образование": теория и практика. -Чебоксары: Изд-во Чуваш.гос. пед. ун-та, 2012. - С.80-81.
18. Заживихина Е.И., Смирнова С.Н., Маркова С.А. Синтез и биологическая роль препаратов меди // Актуальные вопросы фармацевтики и фармацевтического образования в России: сб. материалов Всерос. конф. с междунар. участием – Чебоксары: Изд-во Чуваш.ун-та, 2013.- С. 25.
19. Заживихина Е.И., Маркова С.А., Смирнова С.Н. Количественные методы определения элементов // Приоритетные направления развития науки и технологий: доклады XX международной научн.-техн. конф.; под общ.ред. В.М. Панарина. – Тула: Изд-во «Инновационные технологии», 2016. - С. 77-80.
20. Илларионов И.Е. Способ выращивания растений / Свешников В.В., Федоров П.И., Федоров А.Ф., Иванов В.М., Иванов Г.И. // Патент РФ №2217915. Оpubл. 26.02.2002. Бюл. №34.
21. Заживихина Е.И., Маркова С.А., Заживихин Д.А. О биологической роли абиетата натрия // Современные проблемы химии и защиты окружающей среды: Материалы регион. науч.-практич. конференции, посвященной 40-летию ЧГУ. – Чебоксары, 2007. – С. 94-95.
22. Читнаев Е.Л., Заживихина Е.И., Маркова С.А. Неорганические вещества, их биологическая активность // Естественные науки: сегодня и завтра: Тезисы докладов юбилейной итоговой научной конференции. – Чебоксары: Издательство Чувашского государственного университета, 1997. –С. 232-233.

АВТОРЫ

Заживихина Екатерина Иосифовна – к.б.н., доцент кафедры общей, неорганической и аналитической химии ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова», г. Чебоксары.

Маркова Светлана Анатольевна - к.б.н., доцент кафедры общей, неорганической и аналитической химии ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова», г. Чебоксары.

Смирнова Светлана Николаевна - к.б.н., доцент кафедры общей, неорганической и аналитической химии ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова», г. Чебоксары

Заживихин Дмитрий Анатольевич - инженер-эколог СКБ «Сувар» ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова», г. Чебоксары.

AUTHORS

Zazhivihina Ekaterina Iosifovna- Cand. Biol. Sci., Associate Professor of General, inorganic and analytical chemistry of the "Chuvash State University named after I. N. Ulyanov", Cheboksary.

Markova Svetlana Anatolevna - Cand. Biol. Sci., Associate Professor of General, inorganic and analytical chemistry of the "Chuvash State University named after I. N. Ulyanov", Cheboksary.

Smirnova Svetlana Nikolaevna- Cand. Biol. Sci., Associate Professor of General, inorganic and analytical chemistry of the "Chuvash State University named after I. N. Ulyanov", Cheboksary.

Zazhivihin Dmitry Anatolievich- engineer-ecologist SKB «Suvar», «Chuvash State University named after I.N. Ulyanov», Cheboksary.

**ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ
КОМБИНИРОВАННЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

**PHYSICAL AND TECHNICAL BASES FOR CREATION OF COMBINED
METHODS FOR TREATING DETAILS OF MACHINES**

УСОВ С.В.¹, БАТЫШЕВ К.А.², ДАВЫДЕНКО П.А.³
(ООО «ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ»,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана», ФГАОУ ВО «РУДН»)

USOV S.V., BATYSHEV K.A., DAVYDENKO P.A.
(TECHNOLOGICAL SYSTEMS FOR PROTECTIVE COATS LLS, BMSTU,
RUDN UNIVERSITY)

***Аннотация.** Рассмотрены схема управления параметрами поверхностей деталей с использованием матрицы внешних воздействий и алгоритм проектирования комбинированных методов обработки деталей машин, существенно снижающих сроки освоения новых изделий.*

***Annotation.** The control scheme of the parameters of the surfaces of parts using the matrix of external influences and the algorithm for designing the combined methods of processing machine parts, significantly reducing the time to master new products, are considered.*

***Ключевые слова:** технология, матрица внешних взаимодействий, комбинированная обработка.*

***Keywords:** technology, matrix of external interactions, combined processing.*

Применение разнообразных технологических методов в конечном итоге связано с физико-техническими изменениями в поверхностном слое заготовки, детали. Изученные физико-технические закономерности этих процессов преобразованы в информационные, комбинированные параллельно-последовательные технологии, отслеживающие комплекс изменений совокупных параметров, характеризующих применимость методов, решающих конкретную техническую задачу. В частности, эта задача может быть сведена к обеспечению необходимого уровня долговечности, надежности деталей, изделия в целом.

В конечном итоге созданная схема управления параметрами поверхностей деталей с использованием матрицы внешних воздействий [1, 3] позволяют моделировать и управлять на основе созданного аппарата термодинамики неравновесных процессов в сочетании методов посредством комбинированных параллельно-последовательных информационных технологий.

С точки зрения создания в поверхностном слое определенного набора параметров качества необходимо рассмотреть состояние некоторого количества материала заготовки, являющегося функцией внутренней энергии. Согласно положениям механики сплошной среды и термодинамики

неравновесных процессов, состояние некоторой системы задано, если известны значения параметров, совокупностью которых полностью определяются все интересующие нас характеристики системы, причем эти величины определяются как параметры состояния. Для фиксированной малой частицы заданного объема эти величины образуют базис, а пространство состояний определяется, как пространство, координатами которого являются введенные параметры. Различным состояниям термодинамических систем соответствуют разные точки пространства состояний.

Совокупность состояний среды, соответствующая некоторой последовательности значений параметров состояния, называется процессом. Совершая некоторый процесс, система взаимодействует с внешними полями и телами. Контрсистема, образованная внешними воздействующими телами и полями, определяется параметрами внешнего воздействия k_1, k_2, k_3 , имеющим свой базис и пространство состояний [2].

С целью проведения обобщенных расчетов необходимого сочетания вводится матрица внешнего воздействия с введением соответствующей функции расчета взаимодействия энергетических потоков с поверхностью детали. Эта функция формирует матрицу параметров качества (обобщенные макро- и микрогеометрические показатели точности поверхностного слоя; обобщенные показатели твердости и остаточных внутренних напряжений, обобщенные показатели структурного и фазового состава поверхностного слоя) и представляет следующий перечень математических моделей:

- расчет остаточных напряжений и глубины их распространения в тело детали в условиях нагрева и охлаждения;
- расчет остаточных напряжений и глубины их распространения в тело детали в условиях упруго-пластического деформирования.

Обе модели основываются на сопоставлении расчетной эпюры распределения остаточных напряжений с определенным сочетанием параметров матрицы внешнего воздействия. Соответственно рассматриваемые математические формализации оцениваются приведенными в работах [5] зависимостями.

Используя методические аспекты и алгоритм [1, 6], выбор комбинированного сочетания на основе анализа изложенных данных, происходит соответственно по пунктам:

1. Анализ чертежа детали и условий эксплуатации.
2. Выбор по литературным данным реальных методов.
3. Расчет погрешности идентификации.
4. Расчет режимов.

По результатам применяемой методики при проектировании сочетаний финишных методов обработки деталей машин, функционирующих в условиях термоэрозионного, эрозионно-механического, ударно-усталостного, ударно-абразивного изнашивания, циклического знакопеременного нагружения, созданы следующие комбинированные методы:

- последовательный метод электрохимического формообразования (с применением инструментов оригинальной конструкции) с последующим гальваническим хромированием;
- последовательный метод электрохимического импульсно-циклического формообразования и дробеструйного упрочнения;
- последовательный метод дробеструйного упрочнения и электрохимического, полирования;
- параллельно-последовательный метод алмазно-электрохимического хонингования и гальванического хромирования;
- последовательные методы: лазерного термоупрочнения и ультразвукового выглаживания; электроискрового легирования и ультразвукового выглаживания.

Созданные методы апробированы и внедрены, созданы участки специализированного многофункционального промышленного оборудования [4, 6, 8].

ЛИТЕРАТУРА

1. Усов С.В., Поляков С.В. и др. Научные основы создания прогрессивных методов обработки деталей машин, на базе информационных технологий. М.о., г. Подольск: Издательство Славянская школа, 2011, 208 с.
2. Усов С.В., Свириденко Д.С. Разработка систем автоматизации и информационные технологии, сокращающие сроки создания и освоения новых изделий. М.: Издательство «Учебная литература», 2007 г., 96 с.
3. Усов С.В., Вячеславова О.Ф. и др. Нетрадиционные методы обработки деталей машин, созданные на основе информационных технологий. М.о., г. Подольск: Славянская школа, 2010 г., 150 с.
4. Усов С.В., Болдырев А.А., Ковалев С.В., Мандрыкин А.В. Оценка эффективности при внедрении высоких наукоемких технологий. Воронеж: Вестник Воронежского государственного технического университета. Том.8, № 7-1, 2012.
5. Информационное обеспечение конструкторско-технологического проектирования с учетом трибологических характеристик поверхностного слоя деталей машин. Усов С.В., Свириденко Д.С., Кузнецов П.М. - М.: [Информационные технологии в проектировании и производстве](#). 2015. № 1 (157). С. 46-49.
6. Производство деталей машин с применением комбинированной электрофизической обработки. Усов С.В., Свириденко Д.С., Батышев К.А. В сборнике: Современные технологии в машиностроении и литейном производстве. Материалы II-ой международной научно-практической конференции. 2016. С. 292-294.
7. Расчет инструментов для электротехнологических методов обработки деталей. Свириденко Д.С., Батышев К.А., Давыденко П.А., Паремский И.Я. В сборнике: [Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении](#) Сборник научных статей 3-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Ответственный редактор А.А. Горохов. 2018. с. 297-299.
8. Проектирование технологии изготовления деталей машин с применением комбинированного метода алмазно-электрохимического хонингования и гальванического хромирования. Батышев К.А., Свириденко Д.С., Давыденко П.А. В сборнике: Современные технологии в машиностроении и литейном производстве материалы III Международной научно-практической конференции. 2017. С. 222-224.
9. Методика расчета инструментов для электротехнологических методов. Рябцева А.В., Свириденко Д.С., Давыденко П.А., Батышев К.А. В сборнике: Современные

технологии в машиностроении и литейном производстве материалы III Международной научно-практической конференции. 2017. С. 218-221.

10. Некоторые аспекты применения электроэрозионной обработки. Рябцева А.В., Свириденко Д.С., Батышев К.А. В сборнике: Современные технологии в машиностроении и литейном производстве материалы II-ой международной научно-практической конференции. 2016. С. 289-291.

11. Шестеренные насосы нового поколения и литье с кристаллизацией под давлением. Георгиевский М.Г., Батышев К.А., Смолькин А.А., Безпалько В.И., Свириденко Д.С. В сборнике: Наука и образование - ведущие факторы Стратегии "Казахстан - 2050" (Сагиновские чтения № 5) Труды Международной научно-практической конференции в 5-ти частях. 2013. С. 150-152.

12. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов [Текст] / Под ред. В.П. Смоленцева. - В 2-х т. - М: Высшая школа, 1983.

13. Точилин П.В., Сагателян Г.Р., Назаров Ю.Ф. Методика расчета экономической эффективности внедрения наукоемких технологий. М.: МГОУ, «Новые технологии XXI века», 2001, № 1, с. 29-34.

14. Усов С.В., Назаров Ю.Ф., Коротков И.А. Комбинированные методы обработки в машиностроении. ЮНИТ-М. - 2002 г.-243 с.

АВТОРЫ

Усов С.В. – д.т.н., профессор, заместитель генерального директора ООО «Технологические системы защитных покрытий», г. Москва

Батышев К.А. – д.т.н., профессор кафедры «Литейные технологии» ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н. Э. Баумана», г. Москва

Давыденко П.А. - к.т.н., доцент Департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов»

THE AUTHORS

Usov S.V. – TECHNOLOGICAL SYSTEMS FOR PROTECTIVE COATS LLS

Batyshev Konstantin A. – Bauman Moscow State Technical University

Davydenko Pavel A. – Peoples Friendship University of Russia

**ВЛИЯНИЕ МЕТОДОВ ШЛИФОВАНИЯ НА ЭНЕРГИЮ АДГЕЗИИ
ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ¹**

**INFLUENCE OF GRINDING METHODS ON ENERGY OF ADGESIUM
OF INTERACTIVE MATERIALS**

**СЕКЛЕТИНА Л.С.¹, ГАРТФЕЛЬДЕР В.А.¹, ЯНЮШКИН А.Р.¹,
АРХИПОВ П.В.², МЕДВЕДЕВА О.И.²**

¹(428015, Россия, г. Чебоксары, пр. Московский 15,
Чувашский государственный университет)

²(665709, Россия, г. Братск, ул. Макаренко, 40,
Братский государственный университет)

**SEKLETINA L.S.¹, GARTFELDER V.A.¹, YANYUSHKIN A.R.¹,
ARKHIPOV P.V.², MEDVEDEVA O.I.²**

¹ (428015, Russia, Cheboksary, Moskovsky Ave., 15, Chuvash state University)

² (665709, Russia, Bratsk, Makarenko str. 40, Bratsk State University)

***Аннотация.** Отмечены основные особенности высокопрочных твердосплавных материалов, которые позволяют расширить их применение при изготовлении изделий для различных отраслей промышленности. Обозначены проблемы формообразования готовых изделий из таких материалов с использованием распространенных методов механической обработки. Рассмотрены преимущества и недостатки абразивной обработки с использованием алмазных шлифовальных кругов на металлической связке. Выявлено, что одним из основных факторов, влияющих на работоспособность алмазного инструмента, является засаливание его поверхности. Исходя из анализа физических основ процесса засаливания, предложено рассматривать его как явление адгезионного взаимодействия инструмента со шлифуемой поверхностью. Определены значения энергии адгезии обрабатываемого материала при различных методах алмазного шлифования. На основании проведенных исследований предложены рекомендации для повышения эффективности обработки высокопрочных твердосплавных материалов и рационального использования алмазного шлифовального инструмента с металлической связкой.*

***Annotation:** The main features of high-strength carbide materials are noted, which make it possible to expand their application in the manufacture of products for various industries. The problems of shaping of finished products from such materials with the use of common methods of machining are indicated. The advantages and*

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 16-38-00123 мол_а.

disadvantages of abrasive processing using diamond grinding wheels on a metal bond are considered. It has been revealed that one of the main factors affecting the working capacity of a diamond tool is the salting of its surface. Based on the analysis of the physical foundations of the process of salting, it is proposed to consider it as a phenomenon of adhesive interaction between the tool and the grinding surface. The values of the adhesion energy of the material being processed are determined for various methods of diamond grinding. Based on the conducted studies, recommendations are proposed for increasing the efficiency of processing highstrength carbide materials and rational use of diamond grinding tools with a metal bond.

Ключевые слова: энергия адгезии, алмазное шлифование, твердые сплавы, поверхностная энергия, комбинированная обработка.

Keywords: adhesion energy, diamond grinding, hard alloys, surface energy, combined processing.

Высокопрочные твердосплавные материалы достаточно распространены в различных отраслях промышленности, поскольку обладают широким спектром уникальных свойств, отличающих их от традиционных конструкционных материалов [1,2]. Однако при формообразовании готовых изделий из таких материалов с использованием механической обработки возникает ряд трудностей, которые не удается решать существующими методами резания [3,4]. В этом случае, одним из наиболее рациональных, является абразивная обработка, которая позволяет обеспечить необходимые параметры точности и качества готовых изделий. Среди широкого разнообразия абразивных инструментов следует выделить алмазные шлифовальные круги на металлической связке, которые в большинстве случаев имеют значительные преимущества при обработке высокопрочных материалов [5-10]. Однако круги на металлической связке теряют свою работоспособность в виду такого явления как засаливание [11-18]. Предложены различные теории образования засаленного слоя при алмазном шлифовании твердосплавных материалов [19-21]. На наш взгляд, наибольший интерес представляет теория адгезионного взаимодействия алмазного круга и обрабатываемого материала, в процессе которого система стремится к уменьшению поверхностной энергии, поэтому адгезия является самопроизвольным процессом и работа адгезии, характеризующая прочность адгезионной связи, определяется работой обратимого разрыва такой связи, отнесенной к единице площади. В связи с этим, требуется определить характеристики адгезионного взаимодействия алмазного круга и обрабатываемого материала.

В ходе анализа физических основ процесса адгезии, по результатам предварительных исследований процесса засаливания алмазных кругов, установлено, что данное явление возможно приостановить, либо полностью исключить за счет снижения склонности к схватыванию контактирующих материалов. При этом необходимо учитывать то, что в процессе обработки

алмазные зерна подвергаются истиранию, выкрашиваются и т.д., поэтому круг должен периодически или непрерывно подвергаться правке [22-25].

Для оценки интенсивности адгезии обрабатываемого материала к поверхности алмазного шлифовального круга, то есть засаливания, приняты следующие методы: электрохимическое алмазное шлифование, при котором происходит разупрочнение обрабатываемой поверхности; шлифование с непрерывной электрохимической правкой круга; комбинированное электроалмазное шлифование с одновременной непрерывной электрохимической правкой круга.

Энергия адгезии определялась расчетным методом по данным, полученным после серии опытов для каждого метода согласно плану эксперимента.

При электрохимическом алмазном шлифовании отмечено наиболее прочное адгезионное взаимодействие алюминия, входящего в состав металлической связки, с элементами обрабатываемого материала вольфрамом и кобальтом. Энергия адгезии в этом случае в 1,5 раза выше поверхностной энергии самих элементов соответственно. Также при данном методе наблюдается повышение адгезии меди к элементам обрабатываемого материала. Оценивая взаимодействие остальных элементов связки и твердого сплава, следует отметить, что их энергия адгезии не превышает поверхностную энергию более чем 1,2 раза.

При шлифовании с непрерывной электрохимической правкой круга не наблюдается адгезионных связей меди и карбидом вольфрама. Использование данного метода позволяет в целом снизить энергию адгезии элементов обрабатываемого материала с элементами связки в 1,2 раза. Это означает, что возможное кратковременное адгезионное взаимодействие между элементами связки и твердого сплава под действием динамических нагрузок разрушается. Таким образом, правка круга снижает вероятность адгезионного схватывания.

Расчеты энергии адгезии контактного взаимодействия подтвердили полное отсутствие физико-химических связей инструментального и обрабатываемого материалов при комбинированном методе шлифования.

Анализ полученных данных после комбинированного электроалмазного шлифования с одновременной непрерывной электрохимической правкой круга позволил установить, что характер взаимодействия отдельно взятых элементов связки круга и обрабатываемого материала схож с рассмотренными выше методами, однако, в этом случае наблюдается общее снижение адгезии на 30%.

В ходе оценки расчетных значений энергии адгезии, установлено, что сочетание непрерывной правки круга и электрохимического разупрочнения обрабатываемой поверхности позволяет снизить соотношение энергии адгезии к удельной поверхностной энергии элементов обрабатываемого сплава и составляющих элементов металлической связки. Сопоставив полученные значения для данного метода с двумя предыдущими, отмечено снижение энергии адгезии на 60% в сравнении с электрохимическим алмазным шлифованием и до 30% при шлифовании с непрерывной электрохимической правкой круга.

Результаты расчета энергии адгезии при взаимодействии связки алмазного круга с материалом твердосплавного инструмента представлены в таблице.

Результаты расчета энергии адгезии при взаимодействии связки алмазного круга с материалом твердосплавного инструмента

Анод	Анод	WC	TiC	CO	W	TI
		$2W_p=11,04$	$2W_p=7,2$	$2W_p=3,30$	$2W_p=6,0$	$2W_p=1,76$
Al	$2W_p^{(Al)} = 1,13$	0,71	0,62	0,93	0,99	0,75
		—	—	—	—	—
Cu	$2W_p^{(Cu)} = 1,92$	1,00	0,89	1,20	1,29	0,97
		—	—	—	—	—
Sn	$2W_p^{(Sn)} = 0,77$	0,46	0,41	0,65	0,66	0,58
		—	—	—	—	—
Zn	$2W_p^{(Zn)} = 1,84$	1,09	0,96	1,26	1,42	0,97
		—	—	—	—	—
Ni	$2W_p^{(Ni)} = 3,36$	1,82	1,61	1,79	2,15	1,28
		—	—	—	—	—
Si	$2W_p^{(Si)} = 2,16$	1,09	0,98	1,29	1,40	1,05
		—	—	—	—	—
Алмаз	$2W_p^{(A)} = 14,4$	6,26	4,90	1,63	3,01	0,86
		—	—	—	—	—
Fe	$2W_p^{(Fe)} = 3,2$	2,08	1,79	1,74	2,31	1,13
		—	—	—	—	—

(Знак — означает отсутствие контактного взаимодействия инструментального и обрабатываемого материалов и отсутствие процесса адгезии на поверхности алмазного круга).

Таким образом, полученные результаты расчета энергии адгезии многокомпонентных сред позволяют решить задачу минимизации засаливания шлифовального круга за счет вариации механических и электрических режимов комбинированного электроалмазного шлифования. При этом, оценивая энергии адгезии различных составляющих, возможен подбор специальных технологических сред, добавок в связку алмазных кругов в сочетании с комбинированными методами алмазной обработки для создания антиадгезионных, антикоррозионных, гидрофобных и других соединений, которые в совокупности позволят повысить работоспособность алмазного шлифовального инструмента на металлической связке и заблокировать процесс засаливания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Суслов А.Г. Совершенствование и разработка конкурентоспособных технологий, обеспечивающих повышение качества изделий машиностроения // Вестник Брянского государственного технического университета. 2006. № 2. С. 24-29.
2. Реченко Д.С., Попов А.Ю., Гриценко Б.П., Сунгатулин А.Р., Сергеев В.П., Калашников М.П., Ежов А.А. Влияние ионной имплантации на физикомеханические свойства стали У8А и вольфрамкобальтовых твердосплавных пластин // Известия высших учебных заведений. Физика. 2016. Т. 59. № 9-2. С. 249-251.
3. Попов А.Ю., Ражковский А.А., Реченко Д.С., Кисель А.Г. Стойкость токарного инструмента и ее влияние на стоимость при обработке титанового сплава вт3 // Международный научно-исследовательский журнал. 2012. № 5-2 (5). С. 100-101.

4. Космынин А.В., Чернобай С.П., Саблина Н.С. Эффективность модернизации металлорежущих станков при лезвийной обработке высокопрочных материалов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. № 10-1. С. 96-97.
5. Попов А.Ю., Реченко Д.С., Васильев Е.В., Сергеев В.С., Кольцов А.Г. Технология алмазного шлифования твердосплавных изделий // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2012. Т. 16. № 4 (49). С. 24-29.
6. Васильев Е.В., Попов А.Ю., Реченко Д.С. Алмазное шлифование твердосплавных пластин // Вестник машиностроения. 2012. Т. 32. № 11-12. С. 730-732.
7. Богаев А.А. Алмазное шлифование глубоких отверстий в изделиях из твердого сплава // Главный механик. 2011. № 3. С. 20-26.
8. Васильев Е.В., Попов А.Ю., Реченко Д.С. Алмазное шлифование твердосплавных пластин // СТИН. 2012. № 5. С. 7-10.
9. Янюшкин А.С., Архипов П.В., Медведева О.И., Лобанов Д.В., Рычков Д.А., Сурьев А.А. Применение алмазных кругов на металлической связке для комплексной подготовки металлорежущего инструмента // Системы. Методы. Технологии. 2013. № 4 (20). С. 105-109.
10. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Архипов П.В., Попов В.Ю. Исследование влияния электрических режимов на качественные и экономические показатели комбинированной электроалмазной обработки твердосплавных материалов // Научные технологии в машиностроении. 2015. № 3 (45). С. 22-29.
11. Архипов П.В. Повышение режущих свойств алмазных кругов на металлической связке путем устранения их засаливания: дис. ... канд. техн. наук. / Томский политехнический университет. Братск, 2010.
12. Архипов П.В., Янюшкин А.С., Лосев Е.Д., Петров Н.П., Алтангэрэл Г. Шероховатость поверхности, обработанной электроалмазными методами // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2014. Т. 1. С. 158-163.
13. Янюшкин А.С., Архипов П.В., Лобанов Д.В., Попов В.Ю., Лосев Е.Д. Качество поверхности после алмазной обработки безвольфрамовых твердых сплавов // Научные технологии в машиностроении. 2016. № 1 (55). С. 20-24.
14. Янюшкин А.С. Технология электроалмазного затачивания режущих инструментов и методы ее реализации. Старый Оскол. ТНТ. 2013. 336 с.
15. Янюшкин А.С., Медведева О.И., Янюшкин С.А., Попов В.Ю. Физикохимическое взаимодействие инструментального и обрабатываемого материалов при комбинированном электрохимическом шлифовании // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2012. Т. 1. С. 183-190.
16. Янюшкин А.С., Архипов П.В. Атомно-молекулярные процессы в зоне алмазного круга и обрабатываемого материала. Технология металлов. 2010. № 1. С. 25-33.
17. Янюшкин А.С., Архипов П.В., Торопов В.А. Механизм процесса засаливания шлифовальных кругов // Вестник машиностроения. 2009. № 3. С. 62-69.
18. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Скиба В.Ю., Гартфельдер В.А., Секлетина Л.С. Повышение эффективности алмазного инструмента не металлической связке при шлифовании высокопрочных материалов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2017. № 3 (76). С. 17-27.
19. Гартфельдер В.А., Григорьев В.С., Секлетина Л.С. Контроль качества непрерывного потока продукции // В сборнике: Современные технологии в машиностроении и литейном производстве. материалы I-ой Международной научно-практической конференции. 2015. С. 265-270.
20. Гартфельдер В.А., Янюшкин А.С., Гартфельдер В.А., Васильев И.А. Применение сверхтвердых материалов в промышленности // В книге: Проблемы совершенствования

подготовки инженерных кадров и научно-технического сотрудничества вузов и предприятий ЧАССР. Тезисы докладов научно-практической конференции. 1981. С. 46-47.

21. Yanyushkin A., Lobanov D., Arkhipov P., Ivancivsky V. Contact processes in grinding // Applied Mechanics and Materials. 2015. Т. 788. С. 17-21.

22. Рычков Д.А., Скрипняк В.А., Янюшкин А.С., Лобанов Д.В. Разработка технологии подготовки режущего инструмента для обработки слоистых композиционных материалов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2014. № 2 (63). С. 6-13.

23. Попов В.Ю., Янюшкин А.С., Андронов А.Ю. Результаты комплексного изучения состава засаленного слоя алмазных кругов // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 1 (21). С. 114-120.

24. Попов В.Ю., Янюшкин А.С., Архипов П.В., Медведева О.И., Лобанов Д.В., Рычков Д.А., Сурьев А.А. Применение алмазных кругов на металлической связке для комплексной подготовки металлорежущего инструмента // Системы. Методы. Технологии. 2013. № 4 (20). С. 105-109.

25. Янюшкин А.С., Медведева О.И., Архипов П.В., Попов В.Ю. Механизм образования защитных пленок на алмазных кругах с металлической связкой // Системы. Методы. Технологии. 2010. № 1 (5). С. 132-138.

АВТОРЫ

Секлетина Л.С. - 428015, Россия, г. Чебоксары, пр. Московский 15, Чувашский государственный университет.

Гартфельдер В.А. - 428015, Россия, г. Чебоксары, пр. Московский 15, Чувашский государственный университет.

Янюшкин А.Р. - 428015, Россия, г. Чебоксары, пр. Московский 15, Чувашский государственный университет.

Архипов П.В. - 665709, Россия, г. Братск, ул. Макаренко, 40, Братский государственный университет.

Медведева О.И. - 665709, Россия, г. Братск, ул. Макаренко, 40, Братский государственный университет.

THE AUTHORS

Sekletina L.S. - 428015, Russia, Cheboksary, Moscow Ave. 15, Chuvash State University.

Gartfelder V.A. - 428015, Russia, Cheboksary, Moscow Ave. 15, Chuvash State University.

Yanyushkin A.R. - 428015, Russia, Cheboksary, Moscow Ave. 15, Chuvash State University.

Arkhipov P.V. - 665709, Russia, Bratsk, ul. Makarenko, 40, Bratsk State University.

Medvedeva O.I. - 665709, Russia, Bratsk, ul. Makarenko, 40, Bratsk State University.

**ШЛИФОВАНИИ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ АЛМАЗНЫМИ КРУГАМИ
НА ТОКОПРОВОДЯЩИХ СВЯЗКАХ**

**GRINDING OF SOLID ALLOYS WITH DIAMOND CIRCLES
ON CURRENT CONNECTIONS**

**СЕКЛЕТИНА Л.С.¹, АРХИПОВ П.В.², МЕДВЕДЕВА О.И.²,
ЯНЮШКИН А.Р.¹, ГАРТФЕЛЬДЕР В.А.¹**

¹(428015, Россия, г. Чебоксары, пр. Московский 15,
Чувашский государственный университет)

²(665709, Россия, г. Братск, ул. Макаренко, 40,
Братский государственный университет)

**SEKLETINA L.S.¹, ARKHIPOV P.V.², MEDVEDEVA O.I.²,
YANYUSHKIN A.R.¹, GARTFELDER V.A.¹**

¹ (428015, Russia, Cheboksary, Moskovsky Ave., 15,
Chuvash state University)

²(665709, Russia, Bratsk, Makarenko str. 40,
Bratsk State University)

***Аннотация.** Обозначен круг проблем при обработке изделий из высокопрочных твердых сплавов с применением абразивных материалов. Отмечены перспективы использования алмазных кругов на металлической связке и необходимость совершенствования существующих комбинированных технологий для повышения качественных и эксплуатационных характеристик готовой продукции. Проведен ряд экспериментальных исследований методов комбинированной алмазной обработки для выявления основных направлений, повышения эффективности применения алмазного инструмента на металлической связке. Установлено, что использование комбинированных методов обработки твердосплавных материалов алмазными кругами на металлической связке, позволяет предотвратить образование засаженного слоя за счет формирования защитной пленки в результате электрохимических процессов, тем самым повысить рентабельность алмазного инструмента.*

***Annotation:** A range of problems in the processing of products made of highstrength hard alloys with the use of abrasive materials is indicated. Prospects for the use of diamond wheels on metal bonds and the need to improve existing combined technologies for improving the quality and performance characteristics of finished products are noted. A number of experimental studies of combined diamond processing methods to identify the main directions increase the efficiency of diamond tools on a metal bond. It is established that the use of combined methods of processing carbide materials by diamond wheels on a metal bond allows are prevent*

the formation of a greasy layer by forming a protective film as a result of electrochemical processes, thereby increasing the profitability of the diamond tool.

Ключевые слова: алмазное шлифование, твердые сплавы, засаливание, комбинированная обработка

Keywords: diamond grinding, hard alloys, salting, combined processing.

Формообразование изделий из высокопрочных твердых сплавов чаще всего выполняется с применением абразивного инструмента, поскольку данный метод позволяет достигнуть необходимых качественных показателей при относительно невысокой трудоемкости. Но при финишной обработке возникает целый ряд проблем, связанных с обеспечением постоянства профиля круга, снижением удельного расхода, предотвращения возникновения перегревов и других, особенно при использовании широко распространенных абразивных кругов. В связи с этим, наиболее рационально применять для обработки твердых сплавов алмазные шлифовальные круги на металлической связке, обладающие рядом преимуществ в сравнении с другими абразивными материалами [1-7]. Однако, одним из главных недостатков таких инструментов является склонность к засаливанию и, как следствие, снижение режущей способности [8,9].

Засаливание является результатом адгезионного взаимодействия связки круга материалом обрабатываемой детали, при этом на поверхности круга образуется слой из продуктов шлифования, который скрывает алмазные зерна, что в совокупности приводит к увеличению температуры в зоне шлифования, фазовым превращениям в поверхностном слое обрабатываемого материала и снижению качества обработки [10-12].

В связи с этим для восстановления режущей способности в процесс обработки требуется периодическая или постоянная правка алмазных кругов. Существуют различные методы правки, среди которых следует выделить электрохимический, как наиболее эффективный для алмазных кругов на металлических связках [14-16].

Применение комбинированных методов также способствует повышению эффективности обработки, но при этом возникает необходимость в дополнительных исследованиях для разработки рекомендаций по технологическим режимам, обеспечивающим требуемые параметры качества и производительности [17-19].

Данная работа посвящена исследованиям формирования пленок на поверхности алмазных кругов с металлической связкой при комбинированном алмазном шлифовании с одновременной непрерывной электрохимической правкой.

Исследования проведены на специально разработанном лабораторном стенде на базе плоскошлифовального станка 3E711, позволяющего реализовать метод комбинированного электроалмазного шлифования с одновременной непрерывной правкой круга.

Шлифование проводилось с использованием алмазных кругов 1A1 на металлической связке M2-01, в качестве обрабатываемого материала выбраны однокарбидные и двухкарбидные твердосплавные пластины.

Состояние поверхности алмазного круга оценивалось по образцам, вырезанным после серии опытов в соответствии с планом эксперимента, методами электронной и растровой микроскопии, а также химического анализа [20].

На первом этапе подготовлены образцы поверхности алмазного круга в стадии поставки завода-изготовителя, в результате анализа которых было установлено, что большинство зерен скрыты связкой, следовательно, изначально для обеспечения работоспособности круга требуется его правка.

Далее круг подвергался кратковременной электрохимической правке, после этого также отбирались образцы для их оценки. В результате выявлено, что круг приобрел развитую структуру с явно выраженными порами вокруг зерен для последующего размещения в них продуктов шлифования, электролита и т.д. При этом на большинстве зерен обнаружен слой вещества, сформировавшегося в процессе электрохимических реакций, протекающих между связкой круга и правящим катодом в среде электролита. Образовавшаяся на алмажном зерне пленка, в последующем будет определять интенсивность процессов взаимодействия зерна с обрабатываемым материалом, поскольку, как отмечалось выше, для алмазных кругов характерно засаливание рабочей поверхности в результате адгезионного взаимодействия. То есть в местах выхода вакансий или дислокаций на поверхность образуются активационные центры, с которых и начинается процесс схватывания частиц обрабатываемого материала с поверхностью круга.

На следующем этапе проведена серия экспериментов по обработке твердосплавных пластин методом алмазного шлифования с одновременной непрерывной электрохимической правкой круга. Анализ образцов поверхности круга показал, что алмазные зерна и связка покрыты пленкой, и лишь в отдельных локациях наблюдаются очаги образования засаленного слоя. В ходе спектрального анализа установлена невысокая концентрация элементов обрабатываемого материала на поверхности круга в сравнении с элементами связки, это указывает на недостаточную интенсивность электрохимической правки, но при этом, сформировавшиеся пленки являются защитным слоем, препятствующему дальнейшему развитию засаливания [21].

На заключительном этапе выполнен анализ образцов поверхности круга, после комбинированного электроалмазного шлифования с одновременной непрерывной электрохимической правкой круга, который позволил установить наличие развитой структуры с работоспособными, изношенными и мало изношенными зернами, что свидетельствует о постоянном обновлении поверхности, т.е. работы круга в режиме самозатачивания [22-25].

Анализируя состояние поверхности круга при данном методе с предыдущим, следует отметить отсутствие очагов образования засаливания, поскольку при химическом анализе выявлены только элементы связки и углерод. Также вся поверхность круга и алмазные зерна покрыты сформировавшейся в результате электрохимических процессов пленкой, которая препятствует адгезионным взаимодействиям частиц обрабатываемого

материала и связки круга, при этом химический состав образованной пленки близок по составу связки с оксидными включениями [26].

Проведенные исследования позволили установить, что использование комбинированных методов обработки твердосплавных материалов алмазными кругами на металлической связке, позволяет предотвратить образование засаленного слоя за счет формирования защитной пленки в результате электрохимических процессов, тем самым повысить рентабельность алмазного инструмента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов А.Ю., Реченко Д.С., Васильев Е.В., Сергеев В.С., Кольцов А.Г. Технология алмазного шлифования твердосплавных изделий // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2012. Т. 16. № 4 (49). С. 24-29.
2. Васильев Е.В., Попов А.Ю., Реченко Д.С. Алмазное шлифование твердосплавных пластин // Вестник машиностроения. 2012. Т. 32. № 11-12. С. 730-732.
3. Богаев А.А. Алмазное шлифование глубоких отверстий в изделиях из твердого сплава // Главный механик. 2011. № 3. С. 20-26.
4. Васильев Е.В., Попов А.Ю., Реченко Д.С. Алмазное шлифование твердосплавных пластин // СТИН. 2012. № 5. С. 7-10.
5. Попов В.Ю., Янюшкин А.С. Формирование поверхностного слоя режущего инструмента при алмазной обработке кругами на металлической связке // Решетневские чтения. 2014. Т. 1. № 18. С. 306-308.
6. Пушкарев О.И., Кулик О.Г., Бражников Д.Б. Финишная обработка посадочных отверстий заготовок абразивных кругов алмазными сборными инструментами различных характеристик // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2015. № 8 (221). С. 3-6.
7. Зубарев Ю.М., Кремень З.И., Ермаков Ю.М., Степанов Ю.С. Современные конкурентоспособные технологии абразивно-алмазной обработки заготовок // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2011. № 5. С. 39-42.
8. Янюшкин А.С., Архипов П.В. Атомно-молекулярные процессы в зоне алмазного круга и обрабатываемого материала. Технология металлов. 2010. № 1. С. 25-33.
9. Янюшкин А.С., Архипов П.В., Торопов В.А. Механизм процесса засаливания шлифовальных кругов // Вестник машиностроения. 2009. № 03. С. 62-69.
10. Суслов А.Г. Совершенствование и разработка конкурентоспособных технологий, обеспечивающих повышение качества изделий машиностроения // Вестник Брянского государственного технического университета. 2006. № 2. С. 24-29.
11. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Ковалевский С.В. Повышение качества подготовки твердосплавного инструмента // Системы. Методы. Технологии. 2009. № 1 (1). С. 95-98.
12. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Архипов П.В., Попов В.Ю. Исследование влияния электрических режимов на качественные и экономические показатели комбинированной электроалмазной обработки твердосплавных материалов // Научные технологии в машиностроении. 2015. № 3 (45). С. 22-29.
13. Архипов П.В., Янюшкин А.С., Лосев Е.Д., Петров Н.П., Алтангэрэл Г. Шероховатость поверхности, обработанной электроалмазными методами // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2014. Т. 1. С. 158-163.
14. Янюшкин А.С., Архипов П.В., Лобанов Д.В., Попов В.Ю., Лосев Е.Д. Качество поверхности после алмазной обработки безвольфрамовых твердых сплавов // Научные технологии в машиностроении. 2016. № 1 (55). С. 20-24.
15. Архипов П.В. Повышение режущих свойств алмазных кругов на металлической связке путем устранения их засаливания: дис. ... канд. техн. наук. / Томский политехнический университет. Братск, 2010.
16. Янюшкин А.С., Медведева О.И., Янюшкин С.А., Попов В.Ю. Физикохимическое взаимодействие инструментального и обрабатываемого материалов при комбинированном

электрохимическом шлифовании // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2012. Т. 1. С. 183-190.

17. Гартфельдер В.А. Физико-технологические особенности процесса точения конструкционных материалов инструментами из стм. Автореферат дис. ... кандидата технических наук / Куйбышев, 1990.

18. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Скиба В.Ю., Гартфельдер В.А., Секлетина Л.С. повышение эффективности алмазного инструмента на металлической связке при шлифовании высокопрочных материалов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2017. № 3 (76). С. 17-27.

19. Гартфельдер В.А., Григорьев В.С., Секлетина Л.С. Контроль качества непрерывного потока продукции // В сборнике: Современные технологии в машиностроении и литейном производстве. материалы I-ой Международной научно-практической конференции. 2015. С. 265-270.

20. Гартфельдер В.А., Янюшкин А.С., Гартфельдер В.А., Васильев И.А. Применение сверхтвердых материалов в промышленности // В книге: Проблемы совершенствования подготовки инженерных кадров и научно-технического сотрудничества вузов и предприятий ЧАССР. Тезисы докладов научно-практической конференции. 1981. С. 46-47.

21. Yanyushkin A., Lobanov D., Arkhipov P., Ivancivsky V. Contact processes in grinding // Applied Mechanics and Materials. 2015. Т. 788. С. 17-21.

22. Рычков Д.А., Скрипняк В.А., Янюшкин А.С., Лобанов Д.В. Разработка технологии подготовки режущего инструмента для обработки слоистых композиционных материалов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2014. № 2 (63). С. 6-13.

23. Попов В.Ю., Янюшкин А.С., Андронов А.Ю. Результаты комплексного изучения состава засаленного слоя алмазных кругов // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 1 (21). С. 114-120.

24. Попов В.Ю., Янюшкин А.С., Архипов П.В., Медведева О.И., Лобанов Д.В., Рычков Д.А., Сурьев А.А. Применение алмазных кругов на металлической связке для комплексной подготовки металлорежущего инструмента // Системы. Методы. Технологии. 2013. № 4 (20). С. 105-109.

25. Янюшкин А.С., Архипов П.В., Торопов В.А. Механизм процесса засаливания шлифовальных кругов // Вестник машиностроения. 2009. № 3. С. 62-69.

26. Янюшкин А.С., Медведева О.И., Архипов П.В., Попов В.Ю. Механизм образования защитных пленок на алмазных кругах с металлической связкой // Системы. Методы. Технологии. 2010. № 1 (5). С. 132-138.

АВТОРЫ

Секлетина Л.С. - 428015, Россия, г. Чебоксары, пр. Московский 15, Чувашский государственный университет.

Архипов П.В. - 665709, Россия, г. Братск, ул. Макаренко, 40, Братский государственный университет.

Медведева О.И. - 665709, Россия, г. Братск, ул. Макаренко, 40, Братский государственный университет.

Янюшкин А.Р. - 428015, Россия, г. Чебоксары, пр. Московский 15, Чувашский государственный университет.

Гартфельдер В.А. - 428015, Россия, г. Чебоксары, пр. Московский 15, Чувашский государственный университет.

THE AUTHORS

Sekletina L.S. - 428015, Russia, Cheboksary, Moscow Ave. 15, Chuvash State University.

Arkhipov P.V. - 665709, Russia, Bratsk, ul. Makarenko, 40, Bratsk State University.

Medvedeva O.I. - 665709, Russia, Bratsk, ul. Makarenko, 40, Bratsk State University.

Yanyushkin A.R. - 428015, Russia, Cheboksary, Moscow Ave. 15, Chuvash State University.

Gartfelder V.A. - 428015, Russia, Cheboksary, Moscow Ave. 15, Chuvash State University.

СЕКЦИЯ

**«ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ,
НАНОМАТЕРИАЛЫ И
НАНОТЕХНОЛОГИИ»**

ОПТИМАЛЬНАЯ ГЕОМЕТРИЯ СЕРДЕЧНИКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ, ИЗГОТОВЛЕННОГО МЕТОДОМ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

OPTIMAL GEOMETRY OF THE CORE OF THE ELECTROMAGNETIC SYSTEM, MADE BY POWDER METALLURGY

ТИМОФЕЕВ И.А., АНДРИАНОВ Б.А., ШУМИЛОВ В.Ф.

(Чувашский государственный педагогический университет им. И. Я. Яковлева)

TIMOFEEV, I. A., ANDRIANOV, B.A., SHUMILOV V. F.

(Chuvash state pedagogical University. I. Ya. Yakovlev)

***Аннотация.** Описана новая конструкция электрического аппарата, предназначенного для автоматического управления. Рассмотрена новая технология изготовления композиционного магнитного наноматериала для магнитной системы на основе метода порошковой металлургии. Показаны физико-механические свойства новой конструкции изделия. Такая технология при использовании в электрическом аппарате способна стать эффективной конкурентной основой современным электрическим аппаратам.*

***Annotation.** A new design of an electrical apparatus for automatic control is described. A new manufacturing technology of composite magnetic nanomaterial for a magnetic system based on the powder metallurgy method is considered. The physical and mechanical properties of the new product design are shown. Such a technology, when used in an electrical apparatus, can become an effective competitive basis for modern electrical apparatus.*

***Ключевые слова:** электрический аппарат, композиционный магнитный материал, порошковая металлургия, гомогенизирующий отжиг, холодное прессование, спекание.*

***Keywords:** electrical apparatus, composite magnetic material, powder metallurgy, homogenizing annealing, cold pressing, sintering.*

Методами порошковой металлургии можно получать совершенно новые материалы и производить различные конструктивные изделия, конкурируя с традиционными способами механической обработки, а иногда и заменяя их. При этом теоретический и практический интерес представляет разработка новых электрических аппаратов с учетом минимального расхода порошков магнитного материала для магнитопроводов и соответственно обмоточной меди для втягивающих катушек.

В настоящее время электрические аппараты производят на основе электромагнитных систем клапанного типа с внешним поворотным якорем с

применением цилиндрических сердечников [1, 2, 3]. Весьма важен правильный выбор формы сердечника и его размеров. Сечение сплошного сердечника должно быть рассчитано таким образом, чтобы значение магнитной индукции находилось на прямолинейном участке кривой намагничивания $B=f(H)$.

Создание конструкции оптимального электрического аппарата связано с моделированием математических, электрических и электромагнитных полей. В частности, моделирование электромагнитных полей позволяет изучить магнитные потоки, что актуально для разработки нового типа электрического аппарата.

Целью данной работы является создание нового типа электрического аппарата, изготавливаемого методом порошковой металлургии, на основе моделирования электромагнитных полей. Именно электромагнитные моделирования позволяют гораздо глубже заглянуть в суть исследуемых процессов и существенно сократить затраты на решения многих сложных конструкторских, технологических и исследовательских задач.

Поэтому сердечник можно выполнить таким образом, чтобы его внешний контур повторял кривую распределения магнитного потока [4]. Объемное тело сердечника будет иметь форму усеченного параболоида, что позволяет уменьшить магнитный поток рассеяния магнитной системы вследствие удаления боковой поверхности сердечника от ярма магнитопровода.

Геометрическая форма сердечника, выполненная в виде усеченного параболоида, сложна, поэтому для его упрощения можно применить усеченный конус, образующая которого является линейной аппроксимацией параболы, максимально приближающая к ней [5].

Форма сердечника, выполненная в виде усеченного конуса, позволяет повысить ряд технических и физических характеристик электромагнита. Уменьшение среднего диаметра сердечника ведет к уменьшению средней длины витка катушки, к уменьшению потребляемой мощности, к уменьшению массы обмоточной меди, повышению добротности катушки, к уменьшению напряженности магнитного поля, к увеличению магнитной проницаемости. Обмоточный провод наматывается на сердечник, причем наружная форма катушки должна повторять внутреннюю, сохраняя толщину катушки одинаковую по всей длине [6].

Классификация сплавов по химическому составу магнитных характеристик не соответствует действительности, т.к. сплавы с одинаковыми или близким химическим составом имеют различные физические свойства в зависимости от технологии изготовления. В стандартах приводятся следующие основные магнитные характеристики: коэрцитивная сила H_c , начальная магнитная проницаемость μ_n , максимальная магнитная проницаемость μ_{max} , индукция насыщения B_s , остаточная индукция B_r , прямоугольность петли гистерезиса B_r/B_s . Кроме того приводятся характеристики, определяющие условия работы сплавов в различных режимах эксплуатации: плотность \dot{Y} , температура Кюри Θ_c , удельная электрическое сопротивление ρ , константа магнитной анизотропии K_n , магнитосрктиция насыщения λ_s .

Фундаментальными характеристиками сплавов являются величины B_s , Θ_s , \dot{Y} и ρ , определяемыми их химическим составом, и остаются постоянными величинами для разных видов магнитопроводов. Другие магнитные характеристики являются структурно-чувствительными и существенно зависят от технологии изготовления магнитных материалов и изделий, а так же от механических нагрузок, влажности, температуры, от величины и частоты намагничивающего поля и других экстремальных условий эксплуатации.

Важный этап производства спеченных изделий – подготовка порошка для прессования. После поставки распыленного железного порошка марки ПЖР-3 от научно-производственного объединения «Тулачермет» его необходимо было подвергнуть гомогенизирующему отжигу. Отжиг порошка фракции $(-56...40) \times 10^{-6} \text{ м}$ был осуществлен при температуре 1380 К в течение 7200 с в вакууме $6,65 \times 10^{-1} \text{ Па}$ ($5 \times 10^{-3} \text{ мм рт.ст.}$).

Прессование магнитопровода производилось на гидравлическом прессе типа 2ПГ-500 при давлении 1250 Мпа, а спекание, термическая обработка металла (ТМО) и отжиг прессовок – в двухкамерной вакуумной печи сопротивления типа СЭВ 2,5/203.

Особенности спекания нанодисперсных систем обусловлены главным образом размерным фактором [7]. При переходе от обычно применяемых в технике порошков к нанодисперсным частицы уменьшаются в размерах на 3-4 порядка. Столь большое количественное изменение размерности приводит к изменению соотношения вкладов различных механизмов массопереноса в процессы коалесценции, коагуляции, уплотнения и роста зерен при спекания.

Исследованию были подвергнуты 9 промежуточных реле. При диаметре сердечника нижнего основания, равного $25 \times 10^{-3} \text{ м}$, было изготовлено 9 электромагнитов, имеющих диаметры сердечников верхнего основания равных следующим размерам: 11, 12, 13, 15, 17, 19, 21, 23 и $25 \times 10^{-3} \text{ м}$. Сердечники с критическими размерами диаметров верхнего основания, равных 11 и $25 \times 10^{-3} \text{ м}$ имеют низкую надежность [8], т.к. первый сердечник не имеет запаса кинетической энергии, а второй – обусловлен большим запасом кинетической энергии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Электрические аппараты : учеб. пособие для студ. учреждений сред. проф. образования / О.В. Девочкин, В. В. Лохнин, Р.В. Меркулов [и др.]. – М.: Академия, 2011. – 240 с.
2. Электрические электронные аппараты : учебник / под ред. Ю. К. Розанова. – М. : Энергоатомиздат, 1998. – 520 с.
3. Шоффа, В. Н. Анализ полей магнитных систем электрических аппаратов / В. Н. Шоффа. – М. : Изд-во МЭИ, 1994. – 315 с.
4. Тимофеев, И. А. Электротехнические материалы и изделия : учебное издание. – СПб. : Лань, 2012. – 272 с.
5. А.с. 394858. Электромагнит с внешним притягивающим якорем / И. А. Тимофеев, В. И. Кудрявцев, Ш.Х. Усманов // Открытия. Изобретения. – 1973. – № 34. – 3 с.
6. А.с. 504252. Электромагнитный механизм с внешним притягивающим якорем клапанного типа / И. А. Тимофеев, А. В. Таврин, В. И. Кудрявцев // Открытия. Изобретения. – 1976. – № 7. – 4 с.

7. Левинский, Ю. В. Теоретические основы процессов спекания металлических порошков : [учеб. пособие для вузов по направлению «Металлургия»] / Ю. В. Левинский. – М. : Научный Мир, 2014. – 371 с.

8. Аполлонский, С. В. Надежность и эффективность электрических аппаратов : учеб. пособие / С. В. Аполлонский, Ю. В. Куклев. – СПб : Лань, 2011. – 448 с.

АВТОРЫ

Андрианов Бронислав Аристархович - 428000, Чувашская Республика, г. Чебоксары, ул. Пролетарская, 27-197 +7 919 668 88 69 iatimofeeff2011@yandex.ru

Тимофеев Игорь Александрович - 428023, Чувашская Республика, г. Чебоксары, ул. Максимова, 7-70 +7 987 739 94 50 iatimofeeff2011@yandex.ru

Шумилов Владиян Федорович - 428022, Чувашская Республика, г. Чебоксары, ул. Прибрежная, 40 +7 917 679 49 45 SVLadian@mail.ru

THE AUTHORS

Andrianov Bronislav Aristarkhovich - 428000, Chuvash Republic, Cheboksary, ul. Proletarskaya 27-197 +7 919 668 88 69 iatimofeeff2011@yandex.ru

Timofeev Igor Alexandrovich - 428023, Chuvash Republic, Cheboksary, ul. Maksimova, 7-70 +7 987 739 94 50 iatimofeeff2011@yandex.ru

Shumilov Vladiyan Fedorovich - 428022, Chuvash Republic, Cheboksary, ul. Coastal, 40 +7 917 679 49 45 SVLadian@mail.ru

НАДЕЖНОСТЬ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО АППАРАТА

RELIABILITY OF MANUFACTURING THE MAGNETIC SYSTEM OF AN ELECTRICAL APPARATUS

ШУМИЛОВ В.Ф., ТИМОФЕЕВ И.А., АНДРИАНОВ Б.А

*(ФГОУ ВО «Чувашский государственный педагогический университет
им. И.Я. Яковлева», г. Чебоксары, Российская Федерация)*

SHUMILOV V.F., TIMOFEEV I.A., ANDRIANOV B.A.

*(Chuvash state pedagogical University they. I.Y. Yakovlev,
Cheboksary, Russian Federation)*

Аннотация. Изложен способ повышения механической износостойкости магнитных систем электрических аппаратов. Износ магнитных систем зависит от обработки сердечника и якоря – направления их обработки. Поверхности магнитной системы наиболее интенсивно изнашиваются при $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = 0$. Оптимальный угол обработки должен быть равен 90° .

Abstract. A method is described for increasing the mechanical wear resistance of magnetic systems of electrical apparatus. The wear of magnetic systems depends on the processing of the core and anchor - the direction of their processing. The surfaces of the magnetic system wear out most intensively at $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = 0$. The optimum processing angle should be equal to 90° .

Ключевые слова: магнитная система, магнитопровод, якорь, сердечник, магнитный пускатель, шлифовка

Keywords: magnetic system, magnetic core, anchor, core, magnetic starter, grinding.

Огромная ответственная роль низковольтных электрических аппаратов (НВА) в современных электроприводах и автоматизированных установках привлекает все более серьезное внимание специалистов к их безотказной работе в процессе эксплуатации, готовности к работе без поломок и дефектов в установленном месте в течение необходимого времени, т.е. к уровню надежности. Причины, по которым уровень надежности не соответствует стандартным предъявляемым требованиям, затрагивают следующие факторы: конструктивные, экономические, технологические, эксплуатационные и другие производственные вопросы. При несоответствии этих требований возможны следующие отказы: залипание якоря к сердечнику магнитопровода; распушение шихтованных листов магнитной системы; поломка короткозамкнутых витков; разрыв заклепок, крепящих листы магнитной системы; поломка контактных мостиков; заклинивание якоря и траверсы и т.п. Для того чтобы механическая износостойкость соответствовала выдвигаемым требованиям, необходимо

прежде всего отработать технологию изготовления деталей, узлов и конструкции магнитной системы в целом.

Цель исследования: изучить оптимальный режим обработки рабочих поверхностей якоря и сердечника для повышения механической износостойкости магнитных систем электрического аппарата.

Одним из важнейших условий технического прогресса является постоянное совершенствование увеличения механической износостойкости магнитных систем электрических аппаратов с целью повышения их качества и надежности, а также увеличения производительности труда и снижения себестоимости продукции. Для роста производительности труда в промышленности требуется увеличение частоты работы электромагнитной системы и системы автоматизации. Но рост частоты включений/отключений диктует необходимость увеличения стойкости якоря и сердечника магнитных систем (их поверхностей), которые при соприкосновении подвергаются ударам.

Известно, что механическая устойчивость к износу магнитных систем зависит от обработки сердечника и якоря - направления их обработки. Поэтому необходимо определить, каким образом происходит влияние частоты включений/отключений и направление обработки контактных поверхностей на их износ.

Благодаря многочисленным испытаниям удалось установить, что влияющим фактором износа магнитных систем является обработка контактных поверхностей, точнее ее направление. Разработан метод обработки данных рабочих поверхностей слоеных магнитных систем, отличающийся от ранее применявшихся. Его отличие заключается в том, что образуется угол $\pi/2 + 2\pi$ между направлением следов на якоре и следов от инструмента на сердечнике. При этом рабочая поверхность одного из этих элементов обрабатывается перпендикулярно направлению следов, обусловленных слоями магнитной системы. Испытания были проведены на магнитопроводах (Ш-образных слоистых), которые были установлены на ПМЕ-211 (магнитный пускатель).

В процессе движения шлифовального круга или резца, то есть рабочего инструмента, под соответствующим углом к большей осевой линии симметрии происходит механическая обработка - сьем металла. Степень износа кернов-полюсников будет зависеть от якоря и сердечника - от того, под каким углом будет производиться обработка соприкасающихся поверхностей.

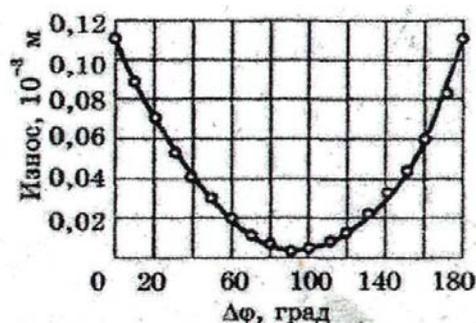


Рис. 1. Кривая зависимости износа магнитопровода от разности углов между направлениями якоря и сердечника.

На рисунке 1 изображена кривая зависимости износа контактных рабочих поверхностей магнитопровода переменного тока от разности углов между направлениями обработки якоря и сердечника. В процессе износа контактной поверхности образуется рифленая тонкая сетка. Зеркально ровной, словно при полировке (доводочная обработка), контактная поверхность становится при верном выборе угла обработки.

Как только происходит отклонение от оптимального угла, поверхность приобретает матовость. Это говорит о том, что качественные характеристики поверхности во время износа являются своеобразным индикатором, позволяющим определить, правильно ли был выбран угол обработки.

Наибольшему износу подвергаются поверхности магнитной системы при $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = 0$, наименьшему при $\varphi = 90^\circ$. Оптимальным углом обработки является угол, равный 90° (0,004-10" м - износ за 11,3 млн. срабатываний). Это явление пока нами полностью не изучено, по-видимому, это связано с механическими явлениями или с появлением магнитной подушки.

При том, что известные магнитомягкие материалы очень восприимчивы к изменению форм, которые возникают при нагрузках, обработка поверхностей таким образом позволяет увеличить устойчивость к разным динамическим воздействиям.

ВЫВОДЫ

Установлено, что направление обработки контактных поверхностей влияет на износ магнитных систем. Контактная поверхность при правильно выбранном угле обработки становится зеркально ровной, а при отклонении от оптимального угла поверхность становится матовой. Полученные данные могут быть использованы для повышения механической износостойкости магнитных систем электрического аппарата переменного тока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Электрические аппараты: учеб. пособие для студ. учреждений сред. проф. образования / О. В. Девочкин, В. В. Лохнин, Р. В. Меркулов [др.]. – М.: Академия, 2011. – 240 с.
2. Электрические электронные аппараты: учебник / под ред. Ю. К. Розанова. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 520 с.
3. Апполонский, С. В. Надежность и эффективность электрических аппаратов : учеб. пособие / С. В. Апполонский, Ю. В. Кулев. – СПб. : Лань, 2011. – 448 с.
4. Зубарев, Ю. М. Теория и практика повышения эффективности шлифования материалов: учебное пособие. – СПб.: Издательство «Лань», 2010. – 304 с.

АВТОРЫ

Шумилов Владиян Федорович - 428022, Чувашская Республика, г. Чебоксары, ул. Прибрежная, 40 +7 917 679 49 45 SVLadian@mail.ru

Тимофеев Игорь Александрович - 428023, Чувашская Республика, г. Чебоксары, ул. Максимова, 7-70 +7 987 739 94 50 iatimofeeff2011@yandex.ru

Андреанов Бронислав Аристархович - 428000, Чувашская Республика, г. Чебоксары, Пролетарская, 27-197 +7 919 668 88 69 iatimofeeff2011@yandex.ru

THE AUTHORS

Shumilov Vladian Fedorovich - 428022, Chuvash Republic, Cheboksary, Priprizhnaya st., 40 +7 917 679 49 45 SVLadian@mail.ru

Timofeev Igor Alexandrovich - 428023, Chuvash Republic, Cheboksary, ul. Maksimova, 7-70 +7 987 739 94 50 iatimofeeff2011@yandex.ru

Andrianov Bronislav Aristarkhovich - 428000, Chuvash Republic, Cheboksary, Proletarskaya, 27-197 +7 919 668 88 69 iatimofeeff2011@yandex.ru

**ЭЛЕКТРОД - ИНСТРУМЕНТ ИЗ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА
НА ОСНОВЕ ПОРОШКОВОЙ МЕДИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ
РЕЗКИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА**

**ELECTRODE - TOOL FROM COMPOSITE MATERIAL
ON THE BASIS OF POWDER COPPER FOR ELECTROEROSION
CUTTING OF TITANIUM ALLOY**

ШАЛУНОВ Е.П.¹, ВЛАДИМИРОВА Ю.О.², ТЕРЕНТЬЕВ Е.А.¹

*(¹Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова,
г. Чебоксары, Россия,*

²АО «Научно-производственный комплекс «Элара», г. Чебоксары, Россия)

SHALUNOV E. P.¹, VLADIMIROVA Yu. O.², THERENTYEV E. A.¹

(¹Chuvash State University named of I. N. Ulyanov, Cheboksary, Russia

²Research and production complex ELARA JSC, Cheboksary, Russia)

Аннотация. Показана возможность изготовления высокоэффективного электрода-инструмента из порошковой композиции системы Cu – NB для получения методом электроэрозионной резки мелких отверстий в сетке воздухозаборника из титанового сплава. Производительность обработки электродом-инструментом из этой композиции почти в 2,5 раза выше производительности процесса при его выполнении с использованием электрода-инструмента из прокатной меди.

Abstract. The possibility of manufacturing a high-performance electrode tool from the powder composition of the Cu - NB system for the method of electroerosive cutting of small holes in the air inlet grid of titanium alloy is shown. The productivity of processing with the electrode-tool from this composition is almost 2.5 times higher than the productivity of the process when it is performed using an electrode - tool made of rolled copper.

Ключевые слова: Порошковая металлургия, композиция, медь, нитрид бора, электроэрозионная резка, титановые сплавы.

Keywords: Powder metallurgy, composition, copper, boron nitride, electroerosion cutting, titanium alloys.

Титан и сплавы на его основе, благодаря своей высокой механической прочности, которая сохраняется при высоких температурах, коррозионной стойкости, жаропрочности, удельной прочности, малой плотности и прочим полезным свойствам, нашли широкое применение в технике и особенно в авиационной, где стремятся получить наиболее легкую конструкцию в сочетании с необходимой прочностью [1]. Из материалов на основе титана изготавливают обшивку, детали крепления, силовой набор, детали шасси, различные агрегаты.

Данные материалы применяются также в конструкциях авиационных реактивных двигателей [1]. Это позволяет уменьшить их массу на 10...25%. Из титановых сплавов производят диски и лопатки компрессоров, детали воздухозаборников и направляющих в двигателях, различный крепеж. В частности, эти материалы применяются для изготовления сеток воздухозаборников [2], представляющих, как правило, тонкостенную (2..3 мм) конструкцию с большим количеством сквозных отверстий, чаще всего, квадратной формы с размером стороны квадрата 2,5..3 мм. При этом перемычки между отверстиями составляют не более 2 мм, а продольная ось каждого отверстия может быть наклонена по отношению к поверхности сетки на определенный угол.

Очевидно, что изготовление такой сетки воздухозаборника с использованием традиционных методов механической обработки со снятием стружки весьма затруднительно и малопроизводительно, а применить операцию листовой штамповки - пробивку отверстий - при указанном расположении их продольной оси вообще невозможно.

Следует также отметить, что механическая обработка деталей из титановых сплавов существенно затруднена из-за высокого отношения предела текучести к пределу прочности, относительно низкой теплопроводности, налипания титана на инструмент, высокой химической активности по отношению к газам при повышенных температурах резания, неоднородности свойств срезаемого слоя вследствие ликвидации легирующих элементов [3].

В связи с этим, получение указанных отверстий в таких сетках осуществляется методом электроэрозионной обработки с использованием электродов - инструментов в виде пакета, набранного из нескольких плоских пластин, имеющих совместно обработанные рабочие части в виде зубьев квадратного сечения. Каждая пластина такого пакета выглядит в виде «расчески», у которой зубья наклонены в ее продольной плоскости на определенный угол.

Как правило, для изготовления указанных электродов-инструментов используется медный прокат в виде ленты требуемой толщины, которая нарезается на мерные заготовки. Затем эти заготовки подвергаются правке на гидропрессе и после этого, чаще всего, подвергаются процессу плоского шлифования [4÷6] для обеспечения лучшего электрического контакта между смежными пластинами пакета. Но использование меди в таких электродах в большинстве случаев не позволяет вести процесс электроэрозионной обработки (прожигания отверстий) с высокой производительностью, а ресурс самих электродов оказывается не высоким.

Очевидно, что для повышения производительности процесса и увеличения ресурса электродного инструмента, а следовательно, и снижения производственных затрат на изготовление титановых сеток воздухозаборников необходимо применить в указанных электродах более прогрессивные материалы.

Известно, что одним из основных преимуществ порошковой металлургии является возможность получения изделий с такими физико-механическими свойствами, какие требуются в каждом отдельном случае и в том числе получить материалы, которые другими способами получить не представляется

возможным [7]. Так, например, методами порошковой металлургии можно получить так называемые «псевдосплавы», в том числе один из лучших электродных материалов для электроэрозионной резки в виде композиции «медь + 3% масс. нитрида бора», получивший обозначение МНБ-3 [8]. Электроды из этого материала по сравнению с медными электродами дороже на 20...30%, однако, этот недостаток компенсируется повышенными стойкостью инструмента и производительностью процессов обработки [9]. Исходя из этого, представлялся обоснованным выбор именно этого «псевдосплава» в качестве материала для изготовления указанного выше электродного инструмента.

Традиционная технология изготовления изделий из материала МНБ-3 включает процесс холодного прессования и спекания изделия, а в некоторых случаях дополнительно производится горячая экструзия [10]. Следует заметить, что однократное прессование и спекание не обеспечивает необходимой плотности материала, а следовательно, и высоких эксплуатационных свойств изготавливаемых из него электрод-инструментов. Их остаточная пористость составляет 15...18%. Применение горячей экструзии позволяет уменьшить остаточную пористость до 2%, но экструдированный профиль, как правило, представляет собой полуфабрикат, требующий дальнейшей обработки для получения необходимого электрода-инструмента [9].

Исходя из изложенного, необходимо было применить технологию, которая позволила бы избежать указанных здесь недостатков имеющихся технологий получения изделий из материала МНБ-3. Разработанный технологический процесс получения электрод-инструмента включал такие последовательно выполняемые операции, как смешивание, прессование, спекание, доуплотнение с калибровкой.

На первой операции – смешивании – готовилась порошковая композиция Cu+3% масс. BN. Смешивание электролитического порошка меди марки ПМС-1 (ГОСТ 4960-2009) с порошком гексагонального нитрида бора марки В (ТУ 2112-003-49534204-2002) производилось в эксцентрично вращающемся барабане с использованием перемешивающих тел (стальных шариков диаметром 8 мм) в течении 30 мин.

На второй операции производилось прессование порошковой композиции в заготовки в виде плоских пластин с размерами в плане 200мм×30мм и толщиной не менее 2,5 мм по схеме пакетного прессования (рис. 1).

Известно [11÷13], что пакетное прессование целесообразно использовать для прессования тонких металлических изделий типа шайб или пластин различной конфигурации в плоскости. Такой метод прессования позволяет добиться почти одинаковой плотности всех пластин, прессуемых в пакете (разница в плотности не превышает 3%). Пакетным прессованием прессуют детали толщиной 2...3,5 мм. Стальные прокладки, закладываемые между деталями, можно использовать неоднократно.

В пресс-форме, установленной на гидропрессе П-500, одновременно прессовалось три пластины. Масса насыпки для получения одной заготовки составляла 110,5 г. Прессование велось при давлении 580 МПа. В качестве

смазки использовалась смесь порошка ВNc глицерином в весовом соотношении 1:1. Выбор именно этого состава объясняется не только его высокими антифрикционными свойствами, но и тем, что такая смазка не загрязняет композицию заготовки, имея сходный с ней химический состав. При этом достигалась относительная плотность заготовок пластин 82,2...82,9%.

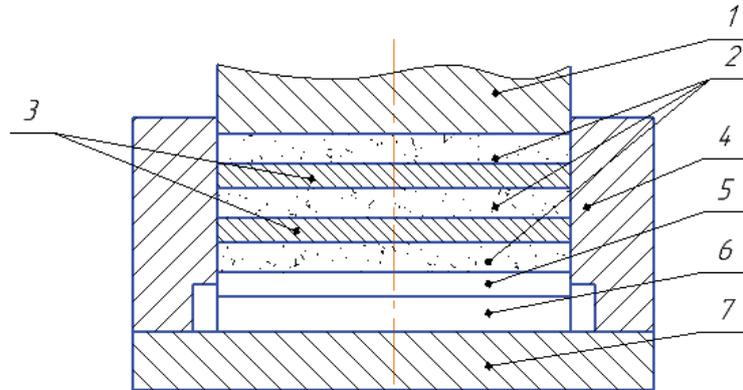


Рис. 1. Схема пакетного прессования: 1 – пуансон; 2 – порошковая композиция; 3 – стальная прокладка; 4 – матрица; 5 – основание

Третья операция - спекание полученных заготовок пластин – проводилась в вакуумной печи электросопротивления СНВЭ-1.3.1/16 при температуре $840^{\circ}+10^{\circ}\text{C}$ в течение 45 мин при остаточном давлении в рабочей камере печи $5 \cdot 10^{-4}$ мм.рт.ст.

Для предотвращения коробления пластин при нагреве пакет из спрессованных заготовок пластин, пересыпанных тальком, либо порошком нитрида бора, стягивался специальным приспособлением (рис. 2), которое помещалось перед нагревом в вакуумную печь.

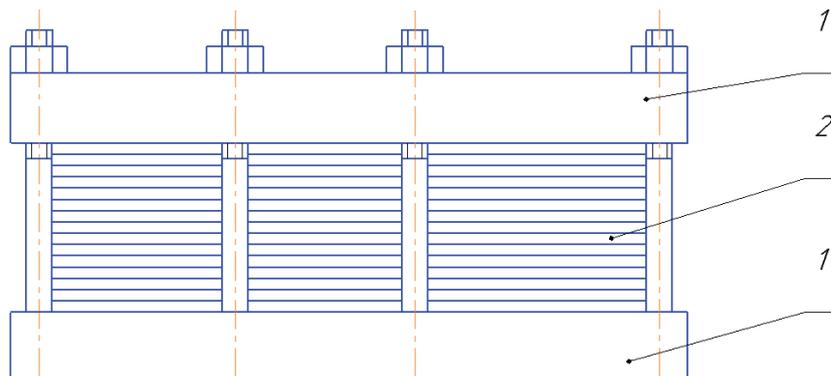


Рис. 2. Приспособление для спекания: 1 - плиты; 2 - заготовки пластин; 4 - шпильки

Указанное приспособление со спеченными заготовками извлекалось из рабочей камеры печи при температуре $80...90^{\circ}\text{C}$. Для спекания одновременно использовались два приспособления с помещенными в каждом из них пятнадцатью заготовками.

После спекания относительная плотность заготовок пластин повысилась до 86,2...87,7% от теоретической.

Четвертая операция – доуплотнение с калибровкой – выполнялась в установленной на гидропрессе П-500 пресс-форме (рис. 3), состоящей из матрицы 1, пуансона верхнего 2, пуансона нижнего 3, плиты донной 4, плиты верхней 5, плиты нижней с направляющими 6.

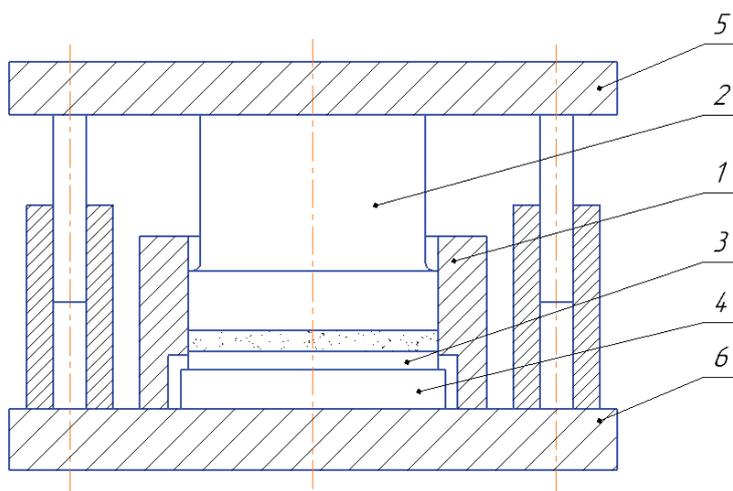


Рис. 3. Пресс-форма для доуплотнения пластины с ее калибровкой

Донная плита 4, матрица 1 устанавливались на нижнюю плиту 6. Формообразующее окно матрицы в нижней части покрывалось по периметру слоем смазки в виде смеси порошка BNc глицерином в весовом соотношении 1:1. Далее в окно матрицы опускался нижний пуансон 3. Вставая на место, пуансон, частично выдавливал смазку, частично оставлял ее на стенках окна и, что самое главное, смазка затекала во все зазоры между нижним пуансоном и стенками матрицы.

После установки нижнего пуансона в формирующую полость матрицы устанавливалась пластина из материала МНБ-3, затем устанавливался верхний пуансон 2 до касания с пластиной. Затем по направляющим нижней плиты 6 штампа устанавливалась верхняя плита 5.

Прессование производилось при давлении 600...650 МПа. После достижения намеченного давления пресс отключался, извлекалась плита 4, и доуплотненная пластина выпрессовывалась на эластичную подложку.

Следует отметить, что обычно при прессовании возникают трудности при выдавливании порошковой заготовки. Наблюдаются сколы образующих поверхностей, задиры и трещины. Это объясняется значительными силами бокового давления, в результате чего сила выталкивания достигает 50...60% от усилия формования [12]. В нашем случае таких сложностей не возникало ввиду малой высоты пластины (не более 2,5 мм), ее конфигурации и рациональной схемы деформирования. Свою роль в снижении силы выталкивания играла также смазка окна матрицы смесью нитрида бора с глицерином. В результате усилие выталкивания не превышало 2...3% от усилия деформирования.

После доуплотнения относительная плотность пластин достигла 88,1...89,7%, а качество поверхностей и их габаритные размеры приобрели значения, позволяющие не производить какой-либо их дальнейшей механической обработки (за исключением фрезерной обработки по получению наклонных «зубьев» на этих пластинах – электродах).

Сравнительные испытания образцов электродов-инструментов из материала МНБ-3 и из прокатной меди выполнялись в виде проведения электроэрозионной прошивки листового титанового сплава ОТ-4 толщиной 1,5 мм плоским электродом, сечение которого в рабочей его части имело размеры 2 мм × 15 мм. Такой электрод был изготовлен из одной из пластин, изготовленных по указанной выше технологии.

Прошивка отверстий проводилась на универсальном электроэрозионном копировально-прошивочном станке нормальной точности модели 4Г721М, предназначенном для обработки деталей из токопроводящих материалов. Каждым электродом прошивалось по несколько отверстий в титановом листе. При этом фиксировалось время t , затрачиваемое электродом на прошивку каждого отверстия, а также при прошивании варьировались параметры режима процесса - плотность тока j , частота тока f и напряжение холостого хода U_{xx} (табл. 1).

Таблица 1

Подбор режима электроэрозионной прошивки сплава ОТ-4 электродами-инструментами из разных материалов

№ варианта	Параметры режима обработки			Время прошивки отверстия t , мин	
	j , А/мм ²	f , кГц	U_{xx} , В	Материал электрода	
				медь прокатная	композиция МНБ-3
1	0,80	22	105	15,2	3,3
2	0,10	66	135	24,1	15,2
3	0,45	22	105	19,4	10,7
4	0,28	8	90	27,2	15,8
5	0,45	8	90	26,0	15,3
6	0,60	44	120	23,2	10,3
7	1,20	44	120	19,4	6,4
8	0,51	44	50	7,9	3,1
9	1,20	8	45	14,8	5,2
10	1,40	8	45	12,8	4,4
11	1,35	8	88	17,1	4,8
12	1,40	22	50	10,8	3,9
13	1,40	44	50	16,2	5,8

На основании анализа данных, приведенных в табл. 1, для проведения дальнейших сравнительных испытаний был выбран режим № 8: $j=0,51$ А/мм²; $f=44$ кГц; $U_{xx}=50$ В. При этом режиме были проведены 10 серий прошиваний электродами-инструментами из прокатной меди и из композиции МНБ-3 (табл.2).

Зная объем материала листа, занимаемый отверстием в нем (45 мм³), и среднее время, затрачиваемое на получение одного отверстия, была рассчитана средняя производительность процесса, которая составила при его выполнении электродом-инструментом из прокатной меди 5,7 мм³/мин, а электродом из порошковой композиции МНБ-3 – 14,1 мм³/мин. Отсюда следует, что производительность электроэрозионной прошивки титанового сплава электродом из композиции МНБ-3 почти в 2,5 раза превышает производительность процесса при его выполнении с использованием электрода

из прокатной меди. Следует также отметить, что износ самого электрода-инструмента из материала МНБ-3 был почти в 4 раза меньше износа электрода из прокатной меди при равном количестве выполненных ими отверстий и немного больше износа электродов-инструментов, изготовленных из наноструктурных материалов на основе порошковой меди [14÷16].

Таблица 2

Время выполнения операции электроэрозионной прошивки сплава ОТ-4 электродами из разных материалов

№ серии	Параметры режима обработки			Время прошивания отверстия t , мин	
	j , А/мм ²	f , КГц	U_{xx} , В	Материал электрода	
				медь прокатная	композиция МНБ-3
1	0,6	44	50	8,75	3,50
2				8,16	3,08
3				7,80	3,08
4				8,00	3,25
5				7,90	3,33
6				7,50	3,10
7				7,80	3,16
8				7,60	3,33
9				7,90	3,16
10				7,80	3,00
Среднеезначение				7,90	3,20

ВЫВОДЫ

1. В результате проведенных исследований получены пластины из порошковой композиции «медь + 3% мас. нитрида бора» (МНБ-3) для изготовления электрода-инструмента, форма и размеры которого максимально приближены к готовым электродам.

2. Электрод-инструмент из материала МНБ-3 обеспечивает производительность электроэрозионной резки титанового сплава ОТ-4, почти в 2,5 раза превышающую производительность эрозионной резки электрод-инструментом, изготовленным из компактной меди.

3. Разработанная технология, спроектированная оснастка и подобранные режимы позволили получить относительную плотность пластин из материала МНБ-3, превышающую их плотность при изготовлении по традиционной технологии, что положительно сказалось на производительности процесса обработки титанового сплава и почти в 4 раза повысило ресурс электрода-инструмента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горынин И.В. Титан в машиностроении / И.В. Горынин, Б.Б. Чечулин. – М.:Машиностроение, 1990.- С. 400.
2. Кириакиди С.К. Конструкция воздухозаборника самолета: учебное пособие / С.К. Кириакиди.- Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2013. - 101с.

3. Линев А.С. Финишная электроэрозионная обработка титановых и алюминиевых сплавов / А.С. Линев, М.Ю. Сариллов // Известия Самарского научного центра Российской Академии Наук. – 2012. – Т. 14. - №1(2). – С. 565 - 567.
4. Салов П.М. Повышение эффективности процесса и качества обработанной поверхности при силовом шлифовании торцом круга / П.М. Салов, Д.А. Вячеславов, М.Л. Афанасьева [и др.] // Высокие технологии в машиностроении: матер. Всеросс. науч. техн. интернет – конф., посвящ. 100-летию засл. деят. н. и т. Папшева Д.Д.; отв. ред. В.Н. Трусов. – Самара: СамГТУ, 2015. - С.28-29.
5. Салов П.М. Правка кругов при внутреннем шлифовании / Д.П. Салов, Т.Г. Виноградова, П.М. Салов, Ю.И. Воронцов. – Чебоксары: Чув. ун-т, 2013. Деп. в ВИНТИ 25.10.2013, №299 – В2013. - 15 с.
6. Виноградова Т.Г. Качество обработанных отверстий при электрокорундовом и азоборном шлифовании / Т.Г. Виноградова, П.М. Салов, Д.П. Салова // Научно-техн. вестник Поволжья. - 2011. - №1. - С.91-95.
7. Илларионов И.Е. Углеродные материалы в литейном производстве и порошковой металлургии / И.Е. Илларионов, О.В. Кузьмина, Е.П. Шалунов, Д.Л. Кузьмин // Проектирование и перспективные технологии в машиностроении и металлургии: материалы II-ой Республ. научно-практ. конф. – Чебоксары: Чуваш. гос. ун-т, 2016. - С. 90-97.
8. Шмаков Г.С. Электроэрозионноустойчивый электродный материал системы медь-высокодисперсный углерод / Г.С. Шмаков // Электронная обработка материалов. – 1983. - №4. - С. 87-89.
8. 9. Любимов В.В. Приспособления для электрофизической и электрохимической обработки / В.В. Любимов, Н.И. Иванов, Е.И. Пупков [и др.]; Под общ. ред. В.В. Любимова. – М.: Машиностроение, 1988. – 176 с.
10. Левит М.Л. Материалы и методы для изготовления фасонных электродов – инструментов электроэрозионных копировально-прошивочных станков / М.Л. Левит, О.В. Падалко. – М.: НИИМаш, 1975. – 143 с.
11. Дорофеев Ю.Г. Исследование возможности изготовления электроэрозионного инструмента динамическим горячим прессованием / Ю.Г. Дорофеев, Н.Н. Бензик, А.Н. Богдаченко, А.П. Деревянных. – Порошковая металлургия. – 1987. - №7. - С. 48-51.
12. Липатов Я.М. Плоские электроды из композиций на основе меди для эрозионной резки твердого сплава / Я.М. Липатов, А.Л. Матросов, Е.П. Шалунов // Роль науки в повышении эффективности производства в свете требований XXVII съезда КПСС: тез. докл. Республ. научно-практ. конф., Чебоксары, 22-23 дек. 1987 г. – Чебоксары: Чуваш. гос. ун-т, 1987. – С. 75.
13. Матросов А.Л. Получение высокопроизводительных электродов для электроэрозионной обработки металлов из композиций на основе меди / А.Л. Матросов, Е.П. Шалунов // Современные технологические процессы получения высококачественных отливок, повышение стойкости литейной оснастки и режущего инструмента: тез. докл. межреспубл. научно-практ. сем., Чебоксары, 16-18 июня 1987 г. – Чебоксары: Чуваш. гос. ун-т, 1987. – С. 61.
14. Dovydenkov V.A. Experience of production and use of precipitation strengthened copper based materials made by mechanical alloying / V.A. Dovydenkov, E.P. Shalunov. // Powder Metallurgy. - 1998. - Т. 1. - С. 372.
15. Шалунов Е.П. О механизмах формирования структуры и свойств композиционных материалов системы Cu-Al-C-O, получаемых на основе метода реакционного механического легирования / Е.П. Шалунов, В.М. Смирнов // Вестник Чувашского университета. - 2013. - № 3. - С. 314-322.
16. Shalunov E. Development, production and application of DISCOM[®] copper nanocomposites as highly resource electrode and electric contact materials/ E. Shalunov, A. Matrosova, L. Chen: Proceedings of the Euro International Powder Metallurgy Congress and Exhibition, Euro PM 2008. – Mannheim: EPMA, 2008. – pp. 33-38.

АВТОРЫ

Шалунов Евгений Петрович – канд. техн. наук, профессор кафедры технологии машиностроения, научный руководитель Объединенной научно-исследовательской лаборатории качества, обрабатываемости и композиционных материалов, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (shalunov2000@mail.ru).

Владимирова Юлия Олеговна – инженер-технолог АО «Научно-производственный комплекс «Элара», Россия, Чебоксары (yulivladimirova@mail.ru).

Терентьев Евгений Александрович – ст. преподаватель кафедры технологии машиностроения, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (genya_ms@mail.ru).

AUTHORS

Shalunov Evgeny P. – Dr.(eng.), professor of Mechanical Engineering Technology Department; scientific leader of the Joint research and development laboratories of mechanically alloyed nano-composite materials, their technology and quality, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (shalunov2000@mail.ru).

Vladimirova Yuliya O. – Engineer of Research and production complex ELARA JSC, Russia, Cheboksary (yulivladimirova@mail.ru).

Terentyev Evgeny A. - Art. Lecturer of Mechanical Engineering Technology Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary(genya_ms@mail.ru).

**ПОВЫШЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
АЛЮМИНИЕВЫХ ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННЫХ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ПРИ ИХ ПОЛУЧЕНИИ СИЛЬНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ И
МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ**

**IMPROVEMENT OF MECHANICAL PROPERTIES
OF THE ALUMINUM DISPERSION-STRENGTHENED COMPOSITE
MATERIALS BY THE USE OF WHEN THEY ARE GETTING
A STRONG PULSE CURRENTS AND MAGNETIC FIELDS**

ДАНИЛОВ Н.В.¹, ШАЛУНОВ Е.П.², АРХИПОВ И.В.³

¹ ООО «Торгово-промышленная компания «Ярославия», г. Верхняя Пышма, Россия,

² Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия,

³ ООО «Диском Групп», г. Чебоксары, Россия)

DANILOV N.V.¹, SHALUNOV E.P.², ARKHIPOV I.V.³

¹ Commercial and industrial kompaniya Yaroslavia LLC, Verkhnyaya Pyshma, Russia,

Chuvash State University named of I. N. Ulyanov, Cheboksary, Russia,

² Discom Group LLC, Cheboksary, Russia)

Аннотация. Показано, что использование электродинамической допрессовки предварительно отпрессованных гранульных брикетов и пропускание импульсов электрического тока большой плотности через горячепрессованные из этих брикетов прутки позволяет получить дисперсно-упрочненный композиционный материал Al - 5%мас.С с механическими свойствами, соответствующими свойствам такого же материала, но полученного с использованием вакуумной технологии. В частности, предел прочности при растяжении такого материала составляет 530...540 МПа при относительном удлинении 4,2...5%.

Abstract. It is shown that the use of electrodynamic pre-pressed pellet briquettes pre - pressing and transmission of high-density electric current pulses through hot-pressed bars of these briquettes allows to obtain a dispersion-strengthened composite material Al-5% (wt.)C with mechanical properties corresponding to the properties of the same material but obtained using vacuum technology. In particular, the tensile strength of such material is 530 ... 540 MPa at a relative elongation of 4.2...5%.

Ключевые слова: алюминий, жаропрочный дисперсно-упрочненный композиционный материал, реакционное механическое легирование, атритор, гранулы, механохимический синтез, холодное и горячее прессование, импульсное магнитное поле, электродинамическое прессование, импульсный ток.

Keywords: aluminum, high-temperature dispersion-strengthened composite material, reactionary mechanically alloying, attritor, granule, mechanochemical synthesis, hot and cold pressing, pulsed magnetic field, electrodynamic pressing, pulsed current.

Эксплуатация изделий, которые должны обладать малым весом, в условиях повышенных силовых и температурных нагрузок (элементы конструкций летательных аппаратов, поршни двигателей, полозы токоприемников электропоездов и пр.) обуславливает актуальность и востребованность материалов, которые обладали бы малым удельным весом и высокими прочностными характеристиками при высоких температурах эксплуатации [1,2]. В частности, требуются алюминиевые материалы, способные при температуре 350°C заменить не только существующие жаропрочные алюминиевые и магниевые сплавы, стали, но и некоторые титановые сплавы, например, марок ОТ4-1 и ВТ5Л.

В таких материалах можно отнести разработанные в Чувашском государственном университете имени И.Н. Ульянова (ЧГУ) жаропрочные дисперсно-упрочненные композиционные материалы (ДУКМ) системы Al-C-O с 4%мас. углерода (на основе алюминиевой пудры марки ПП-1 по ГОСТ 5592-71, содержащей 97%мас. химически активного алюминия) и с 5%мас. углерода (на основе порошка высокочистого алюминия марки АСД-1 по ТУ 48-5-228-82), которые изготавливаются с использованием метода реакционного механического легирования порошка алюминия углеродом в атриторе и технологий порошковой и гранульной металлургии [3÷7]. В качестве углерода, образующего в результате механохимического синтеза в атриторе и последующего термомодеформационного передела карбид алюминия Al_4C_3 со средним размером частиц не более 40 нм, использовался гранулированный порошок канального углерода (сажа) марки К354 по ГОСТ 7885-86, получаемый в пламени при термоокислительном разложении природного или попутного нефтяного газа. Источником кислорода, образующего с алюминием его оксид Al_2O_3 , служил воздух в размольной камере атритора.

Полученные материалы Al-4%мас.С и Al-5%мас.С имеют предел прочности при растяжении при комнатной температуре от 490 МПа до 515 МПа и относительное удлинение - 4,2...4,8%. При 350°C предел прочности при растяжении составляет от 200 МПа до 215 МПа и, соответственно, их удельная прочность при этой температуре достигает 0,074...0,08 МПа·м³/кг, что превышает этот параметр для нержавеющей стали 12Х18Н9Т, который у нее равен 0,072 МПа·м³/кг.

Для того, чтобы достичь удельной прочности ДУКМ системы Al-C-O при 350°C, соответствующей удельной прочности при этой температуре титановых сплавов ОТ4-1 и ВТ5Л (не менее 0,08 МПа·м³/кг), при получении таких материалов в работе [7] была применена вакуумная технология, которая, как известно [8,9], на операциях дегазации при термообработке пористых заготовок является мощным фактором повышения качества материалов, изготавливаемых по порошковой и гранульной технологиям.

В результате применения вакуумной технологии удалось получить более высокие механические свойства алюминиевых ДУКМ системы Al-C-O, изготовленных с использованием порошка высокочистого алюминия марки АСД-1 по ТУ 48-5-228-82 и гранулированного порошка канального углерода (сажи) марки К354 по ГОСТ 7885-86. В частности, стандартные образцы из

материала Al-5%мас.С при испытаниях на растяжение при нормальной температуре показали предел прочности 525 МПа, а относительное удлинение этого материала может составлять от 4% до 6% [7]. При температуре 350°C его предел прочности составляет 218...222 МПа, а при температуре 450°C – 111...117 МПа. Таким образом, удельная прочность этого материала при 350°C составила 0,081...0,082 МПа·м³/кг, что немного превышает удельную прочность при этой температуре таких титановых сплавов, как сплавы марок ОТ4-1 и ВТ5Л.

Однако, из-за использования вакуумной технологии себестоимость указанного материала возросла, в связи с чем представляется технически и экономически проблематичным применение такой технологии при получении указанных материалов в условиях небольших производств порошковой металлургии, в наибольшей степени преобладающих в данной отрасли промышленности.

Поэтому создание других, менее затратных способов повышения механических свойств ДУКМ системы Al-C-O, относящихся к труднодеформируемым и неоднородным по структуре порошковым материалам, представляется весьма актуальной задачей, поиску путей решения которой и посвящена настоящая работа.

Согласно ранее проведенным исследованиям [10-12], одним из таких путей может быть использование сильных импульсных токов и магнитных полей как в процессе получения материала, так и при воздействии ими на полученный продукт или его полуфабрикат. Известно [10,12], что, например, использование энергии импульсных магнитных полей при деформировании позволяет обеспечить обработку материалов со скоростями нагружения до 100...300 м/с, что существенно повышает пластичность многих металлов и их сплавов [13]. Использование электрического тока большой плотности (порядка 10⁵ А/см²) в зоне деформации металлов ведет к резкому снижению у многих из них сопротивления деформированию и повышению пластических свойств [14]. Эффект позволяет интенсифицировать процессы обработки давлением большинства труднодеформируемых и тугоплавких металлов и сплавов. Воздействие токов большой плотности используется также для «залечивания» пор в металлах [10,14,15].

В настоящей работе с целью повышения механических свойств полуфабрикатов (прутков) из ДУКМ Al-5%мас.С, получаемых горячим прессованием (экструзией) высокоплотных гранульных брикетов, было применено высокоскоростное электродинамическое холодное доуплотнение таких брикетов, сначала полученных холодным прессованием (уплотнением) гранул этого материала на прессе. Высокоскоростное электродинамическое доуплотнение обеспечивалось путем воздействия на боек пресс-оснастки энергией импульсного магнитного поля (ИМП). Пропускание импульсов электрического тока через полученные горячим прессованием прутки должно было способствовать улучшению их структуры (применение различных видов термообработки не дает улучшения свойств у таких материалов [4,5]).

Исследования на гранулах, полученных в атриторе с рабочей камерой емкостью 15 л из порошка высокочистого алюминия марки АСД-1 по ТУ 48-5-228-82 и сажи марки К354 по ГОСТ 7885-86, показали, что они в насыпном состоянии обладают значительной внутри- и межгранульной пористостью, в связи с чем высокоскоростное электродинамическое прессование от насыпного состояния становится малоэффективным, так как при высоких скоростях уплотнения затрудняется эвакуация из прессовки (брикета) находящегося в порах воздуха. Наибольшей плотности гранульных брикетов удалось достичь при последовательном совмещении статического и электродинамического прессования (допрессовки энергией ИМП) гранул (рис. 1).

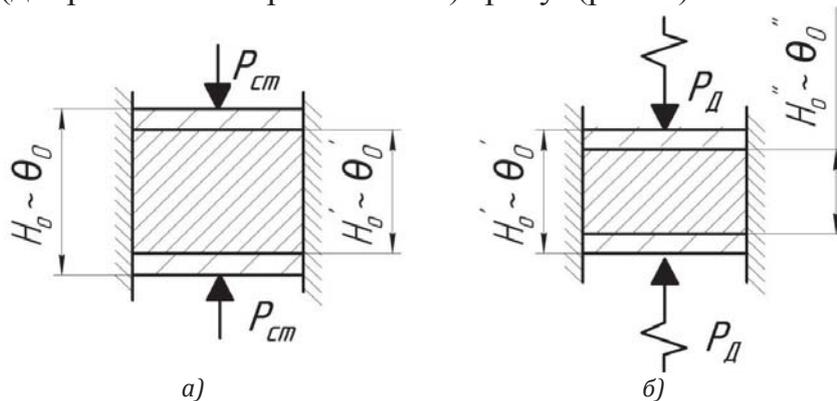


Рис. 1. Стадии статического (а) и электродинамического (б) прессования гранул

Сначала гранулы ДУКМ Al-5%мас.С подвергались двустороннему прессованию в пресс-форме с усилием $P_{ст}$ на вертикальном гидравлическом прессе 2ПГ-50. В результате этого высота насыпки гранул H_0 уменьшалась до высоты полученного гранульного брикета H_0' , а относительная плотность повышалась с θ_0 до θ_0' (см. рис.1,а). Затем полученный брикет подвергался электродинамическому прессованию, которое осуществлялось верхним и нижним бойками, разогнанными импульсным магнитным полем, созданным соответственно верхним плоским индуктором и таким же нижним индуктором с намоткой витков в них по «спирали Архимеда», при импульсном разряде магнитно-импульсной установки МИУ-20/5 ($W_{со} = 20$ кДж, $U = 5$ кВ, $f = 18$ кГц, $C = 1540$ мФ, $L_y = 50$ нГн) на эти индукторы. Каждый из бойков подлетал к торцу брикета с большой скоростью и запасенной кинетической энергией и при соприкосновении с брикетом производил его динамическое прессование (допрессовку) усилием P_d . При этом высота брикета уменьшалась с H_0' до конечного значения - H_0'' , а относительная плотность возрастала с θ_0' до θ_0'' (см. рис. 1,б).

График зависимости относительной плотности гранульного брикета после электродинамического прессования θ_0'' от относительной плотности прессовки θ_0' , полученной на стадии статического уплотнения (подпрессовки) из гранул материала Al - 5 %мас. С, приведен на рис. 2, из которого следует, что для данного материала существует вполне определенное значение оптимальной плотности брикетов при подпрессовке, обеспечивающей

наибольшую его плотность после электродинамического прессования при одном и том же давлении на гранулы P_d . Например, после осевого электродинамического прессования давлением 600 МПа предварительно спрессованного из гранул брикета с относительной плотностью $\theta_0' = 65\%$ его плотность повышалась до 92,6%. При этом давление подпрессовки не превышало 280 МПа.

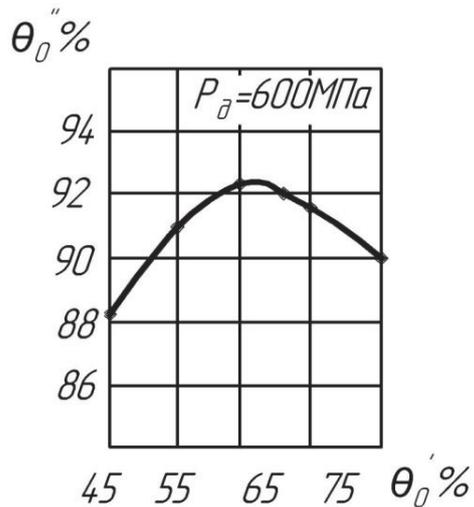


Рис. 2. Влияние относительной плотности брикетов после статического прессования гранул на их конечную относительную плотность после электродинамического доуплотнения

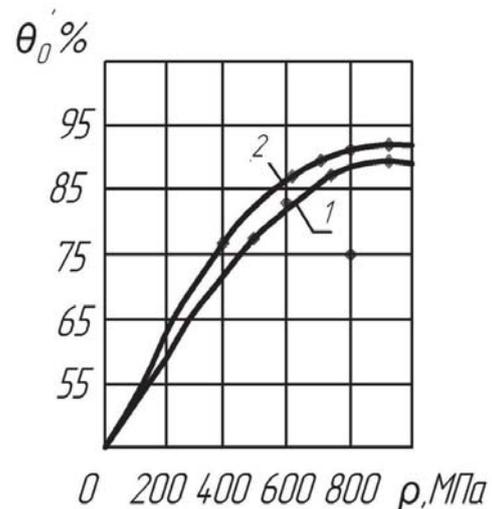


Рис.3. Зависимость относительной плотности гранульных брикетов при их статическом (1) и электродинамическом (2) прессовании из гранул

Следует отметить, что при прессовании брикетов из гранул от насыпного состояния только статическим и только электродинамическим нагружением не удалось достичь указанной плотности (рис. 3). При статическом прессовании давлением $p_{ст} = 880$ МПа была достигнута плотность $\theta_1 = 87,5\%$ и наблюдалась потеря устойчивости пуансона, а при прессовании электродинамическим давлением $p_d = 880$ МПа конечная плотность θ брикета составила 91%. При этом потребная энергия магнитно-импульсной установки возросла, примерно, в 1,5 раза.

Повышение относительной плотности брикетов при прессовании гранул по указанной схеме обеспечило увеличение предела прочности при растяжении пруткового материала с 490...515 МПа (при относительном удлинении 4,2...4,8%) до 520...525 МПа, т.е. на 2...6%, но при этом относительное удлинение немного снизилось: с 4,2...4,8% до 3,8...4,2%.

С целью улучшения структуры экструдированного материала и, следовательно, повышения его механических свойств, применялась дополнительная обработка прутков импульсами электрического тока, пропускаемого через них от той же магнитно-импульсной установки МИУ-20/5.

Для получения положительного эффекта необходимо было ввести в пруток определенное количество энергии, которое определялось по формуле:

$$W_n = g_n \cdot V, (1)$$

где g_n - удельная энергия, необходимая для достижения положительного эффекта, Дж/м³; V - обрабатываемый импульсным током объем материала прутка, м³.

Потребная удельная энергия g_n оценивалась с помощью выражения

$$g_n = \rho \cdot c_T \cdot T_p, (2)$$

где ρ - плотность материала прутка, кг/м³; c_T - удельная теплоемкость материала при температуре рекристаллизации, Дж/кг·град; T_p — температура рекристаллизации матрицы материала, К.

Подбор законов изменения импульсов тока $i(t)$ и напряжения $u(t)$ во времени, а также потребное их количество n определялось с использованием следующего равенства:

$$W_n = n \cdot \int_0^t i(t)u(t)dt. (3)$$

Процессы разрядов регистрировались при помощи импульсного осциллографа С8-13, интеграл в (3) вычислялся графически.

Для исследований был использован прутковый материал А1-5%мас.С, который ранее был получен с использованием электродинамической допрессовки гранульных брикетов.

Данные механических испытаний образцов, изготовленных из прутков, через которые были пропущены импульсы электрического тока с разной удельной энергией воздействия, приведены в табл.

Таблица

Механические свойства прутка ДУКМ А1-5%мас.С после пропускания через него импульсов электрического тока

Введенная удельная энергия, 10^9 Дж/м ³	0	0,32	0,49	0,64	0,81	0,98
Предел прочности при растяжении, МПа	<u>520</u>	<u>535</u>	<u>530</u>	<u>530</u>	<u>530</u>	<u>530</u>
	525	560	540	540	545	550
Относительное удлинение, %	<u>3,8</u>	<u>3,0</u>	<u>4,0</u>	<u>4,2</u>	<u>4,6</u>	<u>3,6</u>
	4,2	3,2	4,5	5,0	4,8	3,2
<u>Примечание:</u> в числителе – минимальное значение характеристики, в знаменателе – ее максимальное значение.						

Из табл. видно, что предел прочности при растяжении и относительное удлинение зависят от количества введенной удельной энергии. При введенной удельной энергии, равной $0,32 \cdot 10^9$ Дж/м³, значительно увеличивается прочность материала с одновременным ухудшением его пластичности. При g_n , равной $(0,49 \dots 0,81) \cdot 10^9$ Дж/м³, прочность увеличивается незначительно, но повышается пластичность. При g_n , близкой к 10^9 Дж/м³, наблюдается более сильное повышение прочности и снижение пластических свойств материала. Представляется, что наиболее подходящей является удельная энергия, равная $0,64 \cdot 10^9$ Дж/м³, при которой материал обладает наилучшим сочетанием

прочностных и пластических свойств: предел прочности при растяжении составляет 530...540 МПа при относительном удлинении 4,2...5%.

Таким образом, воздействуя импульсным электрическим током большой плотности на экструдированный материал Al-5%мас.С, удалось увеличить его прочность на 3...5 % с одновременным повышением так же пластичности. Этот эффект может быть объяснен существенным улучшением структуры материала. Металлографические исследования исходного пруткового материала показали, что в его структуре присутствовали расслоения между дискретными волокнами (превращенными в них экструзией гранулами) протяженностью от 1,5 мм до 3 мм и обнаруживалась неоднородность в виде распределенной по окружности сечения ее волоконной составляющей. В результате пропускания импульсов электрического тока с введением в материал удельной энергии, близкой к 10^9 Дж/м³, произошло «залечивание» трещин, а волоконная составляющая структуры оказалась распределенной более равномерно и доля ее уменьшилась.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что использование электродинамической допрессовки предварительно отпрессованных гранульных брикетов и пропускание импульсов электрического тока большой плотности через горячепрессованные из этих брикетов прутки позволило изготовить дисперсно-упрочненный композиционный материал Al-5%мас.С с механическими свойствами, соответствующими свойствам такого же материала, но полученного с использованием вакуумной технологии, что свидетельствует о высокой эффективности применения указанных электрофизических методов обработки для получения материалов данного класса. Полученный материал по уровню достигнутой удельной прочности при температуре нагрева 350оС (более 0,08 МПа·м³/кг) способен заменить не только существующие жаропрочные алюминиевые и магниевые сплавы, стали, но и некоторые титановые сплавы, например, марок OT4-1 и BT5Л.

ЛИТЕРАТУРА

1. Симс Ч. Жаропрочные сплавы / Ч. Симс, В. Хагель; пер. с англ. – М.: Металлургия, 1976.- 568 с.
2. Гессингер Г.Х. Порошковая металлургия жаропрочных сплавов / Г.Х. Гессингер; пер. с англ. – Челябинск: Металлургия. Челябинское отделение, 1988. – 320 с.
3. Schalunov J. Einflüsse der Herstellungsbedingungen auf die Eigenschaften von Al-Al₄C₃-Werkstoffen / J. Schalunov, M. Slesar, M. Besterici, H. Oppenheim, G. Jangg // Metall - 1986. – № 6. - S. 601—606.
4. Шалунов Е.П. Разработка научных основ, технологии и оборудования для получения и обработки полуфабрикатов из дисперсно-упрочненных композиционных материалов Е.П. Шалунов, Н.В. Данилов, Я.М. Липатов // Охрана труда и прогрессивные технологические процессы в литейном производстве, порошковой металлургии и машиностроении: Тезисы межреспубл. научно-практ. конф. – Чебоксары: Чуваш. гос. ун-т, 1990. - С. 287-289.
5. Shalunov E. Development and research of a nanostructured material from aluminium powder for orthopedy and traumatology / E. Shalunov, A. Matrosov, A. Karalin// Proc. of Int. Powder Metallurgy Congress (EURO PM2008). Mannheim, 2008, sept. 29-oct. 1. - Shrewsbury: EPMA, 2008. - Vol. 2. - pp. 135-139.
6. Шалунов Е.П. Жаропрочные алюминиевые дисперсно-упрочненные композиционные материалы и их усовершенствование с использованием реакционного механического легирования / Е.П. Шалунов // Современные технологии в машиностроении и литейном

- производстве: материалы III-ей междунар. науч.- практ. конф., Чебоксары, 4-6 дек. 2017 г. – Чебоксары: Чуваш. гос. ун-т, 2017. – С. 32-338.
7. Шалунов Е.П. Жаропрочный дисперсно-упрочненный композиционный материал Al-5%С, полученный с использованием метода реакционного механического легирования // Е.П. Шалунов, И.В. Архипов // Современные технологии в машиностроении и литейном производстве: материалы III-ей Междунар. научно-практ. конф., Чебоксары, 4-6 дек. 2017 г. – Чебоксары: Чуваш. гос. ун-т, 2017. - С. 339-349.
8. Добаткин В.И. Гранулированные алюминиевые сплавы / В.И. Добаткин, В.И. Елагин. - М.: Металлургия, 1981. – 176 с.
9. Айзенкольб Ф. Успехи порошковой металлургии / Ф. Айзенкольб; Пер. с нем; под ред. В.П. Елютина. – М.: Металлургия, 1989. – 540 с.
10. Попов Ю.А. Исследование возможности магнитно-импульсного прессования порошков высокопрочных тугоплавких сплавов / Ю. А. Попов, Н. Н. Беклемишев, Е. П. Шалунов [и др.] // Импульсное нагружение конструкций: сб. статей. – Вып. 7. - Чебоксары: Чуваш. гос. ун-т, 1976. - С. 52-71.
11. Попов О.В. Импульсные методы обработки металлов: Конспект лекций / О. В. Попов, Е. Г. Иванов, Е. П. Шалунов [и др.]. – Чебоксары: Чуваш. гос. ун-т, 1982. - 64 с.
12. Шалунов Е.П. Методы и средства исследований процессов магнитно-импульсного прессования порошковых материалов / Е. П. Шалунов, Е. Г. Иванов, Я. М. Липатов // Импульсные методы обработки машиностроительных материалов: сб. статей. – Чебоксары: Чуваш. гос. ун-т, 1985. - С. 55-63.
13. Степаненко В.А. Импульсная штамповка деталей в машиностроении / В. А. Степаненко, В. И. Клементьева, В. П. Россихин [и др.]. - Киев: УкрНИИТИ, 1969. - 108 с.
14. Спицин В. И. Электропластическая деформация металлов / В.И. Спицин, О.А. Троицкий. - М.: Наука, 1985. - 160 с.
15. Степанов Г.В. Нестационарное напряженно-деформированное состояние в длинном стержне, вызванное импульсом электрического тока высокой плотности / Г.В. Степанов, А.И. Бабуцкий, И.А. Мамеев // Проблемы прочности. – 2004. - № 4. – С. 60-66.

АВТОРЫ

Данилов Николай Витальевич – канд. техн. наук, управляющий филиалом ООО «Торгово-промышленная компания «Ярославия», Россия, Верхняя Пышма (nvdanilov@yandex.ru).

Шалунов Евгений Петрович – канд. техн. наук, профессор кафедры технологии машиностроения, научный руководитель Объединенной научно-исследовательской лаборатории качества, обрабатываемости и композиционных материалов, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (shalunov2000@mail.ru).

Архипов Иван Владимирович – генеральный директор ООО «Диском Групп», Россия, Чебоксары (info@discom-group.ru).

AUTORS

Danilov Nikolaj V. - Dr.(eng.), branch manager of the Commercial and industrial company Yaroslavia LLC, Russia, Verkhnyaya Pyshma (nvdanilov@yandex.ru).

Shalunov Evgeny P. – Dr.(eng.), professor of Mechanical Engineering Technology Department; scientific leader of the Joint research and development laboratories of mechanically alloyed nano-composite materials, their technology and quality, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (shalunov2000@mail.ru).

Arkhipov Ivan V. - [The CEO of Discom Group LLC, Russia, Cheboksary \(info@discom-group.ru\).](mailto:info@discom-group.ru)

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ
КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ МЕДИ И
МЕХАНОЛЕГИРОВАННЫХ НАНОСТРУКТУРНЫХ
ГРАНУЛСИСТЕМЫ $\text{Cu-Al}_2\text{O}_3$**

**STUDY OF THE STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF COMPOSITE
MATERIAL BASED ON COPPER AND MECHANICALLY ALLOYED
NANOSTRUCTURAL GRANULES OF $\text{Cu-Al}_2\text{O}_3$ SYSTEM**

ДОВЫДЕНКОВ А.В.¹, ЯРМОЛЫК М.В.²

(¹ ООО «Наномет», ФГБОУ ВПО ПГТУ, г. Йошкар-Ола, Россия,

² ЗАО «Метма», ФГБОУ ВПО ПГТУ, г. Йошкар-Ола, Россия)

DOVYDENKOVV.A.¹, YARMOLYKM.V.²

(¹ NANOMET LLC, Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia

² METMA JSC, Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia)

***Аннотация.** Исследована структура композиционного материала на основе меди и механолегированных наноструктурных гранул системы $\text{Cu-Al}_2\text{O}_3$. Показано, что структурные особенности механолегированных гранул – концентрация легирующих элементов (оксида алюминия и кластеров на основе углерода) на поверхности медных зерен-препятствуют взаимодействию гранульной и медной структурных составляющих в составе композиционного материала.*

***Summary.** The structure of the composite material based on copper and mechanically alloyed nanostructured granules of $\text{Cu-Al}_2\text{O}_3$ system has been studied. It has been shown that the structural characteristics of mechanically alloyed granules to be the concentration of alloying elements (aluminum oxide and carbon-based clusters) on the surface of the copper grains impede the interaction of granular and copper structural components in the composition of the composite material.*

***Ключевые слова:** механолегированные наноструктурные гранулы системы Cu-Al-C-O , композиционные материалы медь-наноструктурные гранулы.*

***Keywords:** mechanically alloyed nanostructured granules of Cu-Al-C-O system, composite materials, copper-nanostructural granules.*

Введение

Исследованию композиционных материалов на основе меди и механолегированных наноструктурных гранул системы $\text{Cu-Al}_2\text{O}_3$ (рис. 1) посвящено ряд работ, выполненных в Поволжском государственном технологическом университете [1÷6] и Чувашском государственном университете [7÷24], в которых приведено описание влияния соотношения компонентов на формирование структуры и свойств материала. Показано что повышению механических свойств композиционных материалов способствует предварительное нанесение на поверхность гранул тонкого медного слоя методом механической активации. Тем не менее, влияние структуры гранульной составляющей на особенности межструктурного взаимодействия в

композиционном материале показано недостаточно. Изучению данного вопроса посвящена настоящая работа.

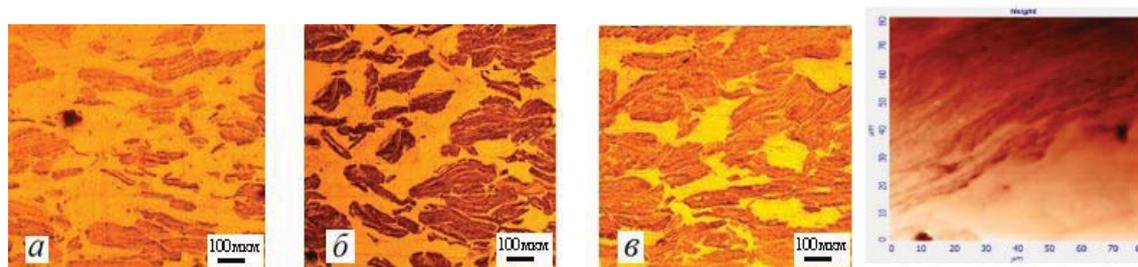


Рис.1. Микроструктура композиционных материалов с разным содержанием гранул:
 а) $\gamma_c=0,3$; б) $\gamma_c=0,5$; в) $\gamma_c=0,7$ в направлении, параллельном оси прессования;
 г) микроструктура композиционного материала на границе «гранула-медь»,
 СЗМ, площадь сканирования 60х60мкм.

Для исследования микроструктуры и фазового анализа применяли современные методы сканирующей зондовой, просвечивающей и растровой электронной микроскопии. Исследование фазового состава механолегированных гранул проводили методом рентгеноструктурного анализа (РСА). Химический анализ поверхности механолегированных и плакированных механолегированных гранул проводили методом энергодисперсионного рентгенофлуоресцентного анализа (ЭДРФА).

Результаты и обсуждение

Как было показано ранее, микроструктура разработанных композиционных материалов состоит из двух структурных составляющих – медной, с размером зерна около 20 мкм и структурной составляющей на основе механолегированных гранул размером 100-200 мкм (см. рис. 1).

Исследования с помощью растровой электронной микроскопии и сканирующей зондовой микроскопии (рис. 2, а, б), показали, что размер зерен в гранульной составляющей композиционного материала находится в интервале 100-300 нм. Как было показано ранее [6], структура гранул представляет собой медные зерна, упрочненные по границам оксидом алюминия $\gamma-Al_2O_3$ размером 30-60 нм и кластерами углерода размером менее 40 нм. Соответственно, на поверхности гранул, совпадающей с границами поверхностных медных зерен, концентрация нанодисперсных упрочняющих включений должна быть больше, чем по объему.

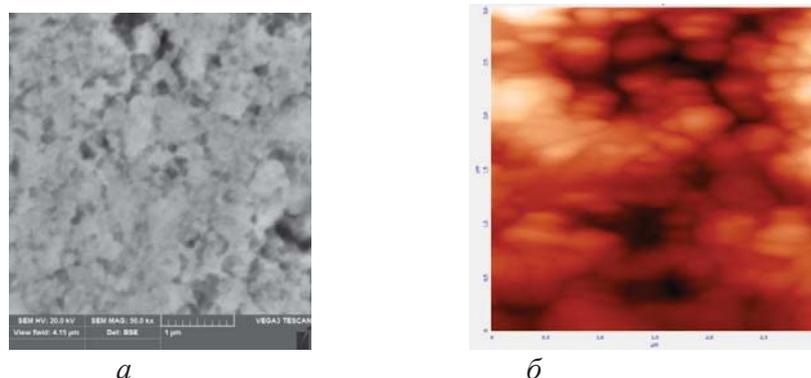


Рис. 2. Микроструктура гранульной составляющей композиционного материала:
 а) РЭМ; б) СЗМ (площадь сканирования 3х3мкм)

Данное утверждение подтверждается результатами энергодисперсионного рентгенофлуоресцентного анализа (ЭДРФА), согласно которому на поверхности механолегированных гранул массовой долей Al 0,5%, среднее содержание алюминия составляет около 2% (табл.1, гранулы до нанесения медного слоя).

Таблица 1

Результаты ЭДРФА поверхности гранул, используемых для получения композиционного материала

Вид гранул	Содержание элементов, вес.%			
	Cu	Al	Fe	Cr
«Не плакированные»	остальное	2,04	0,21	0,08
Плакированные	100	-	-	-

Этим обстоятельством можно объяснить трудности консолидации данных материалов традиционными методами холодного компактирования и спекания. Также данным методом обнаружены незначительные примеси железа и хрома, вызванные, вероятно, намолотом материала размольных тел. После плакирования на поверхности гранул (табл. 1, гранулы после нанесения медного слоя) присутствует только один химический элемент – Cu, что подтверждает образование тонкого медного слоя.

Сравнительный анализ данных рентгеноструктурного анализа, приведенного в табл. 2, показывает, что размер блоков когерентного рассеивания в покрытых медью гранулах меньше, чем в исходных гранулах и составляет 130 нм по сравнению с 198 нм для исходных гранул.

Таблица 2

Рентгеноструктурный анализ гранул

Нанесение медного слоя	Параметр решетки a , нм	Размер блоков когерентного рассеивания D , нм	Величина микронапряжений a/a , %
-	0,36174	198	0,011
+	0,36168	130	0,022

Величина микронапряжений в плакированных гранулах в два раза больше (0,022%) по сравнению с 0,011% для обычных гранул. Отсюда можно сделать вывод, о том, что дополнительная механическая активация, выполненная в ходе нанесения медного слоя, препятствует росту зерна и снятию напряжений вызванных механическим легированием. Этим можно объяснить более высокую твердость и термическую устойчивость гранульной составляющей и некоторое повышение электросопротивления в композиционных материалах из «плакированных» гранул» [4, 5].

С помощью РЭМ (рис. 3) получена карта распределения элементов по поверхности шлифа композиционного материала медь-механолегированные наноструктурные гранулы, согласно которой области наибольшей концентрации алюминия и кислорода находятся в местах расположения гранул на сканируемой поверхности, повторяя «узор» их распределения.

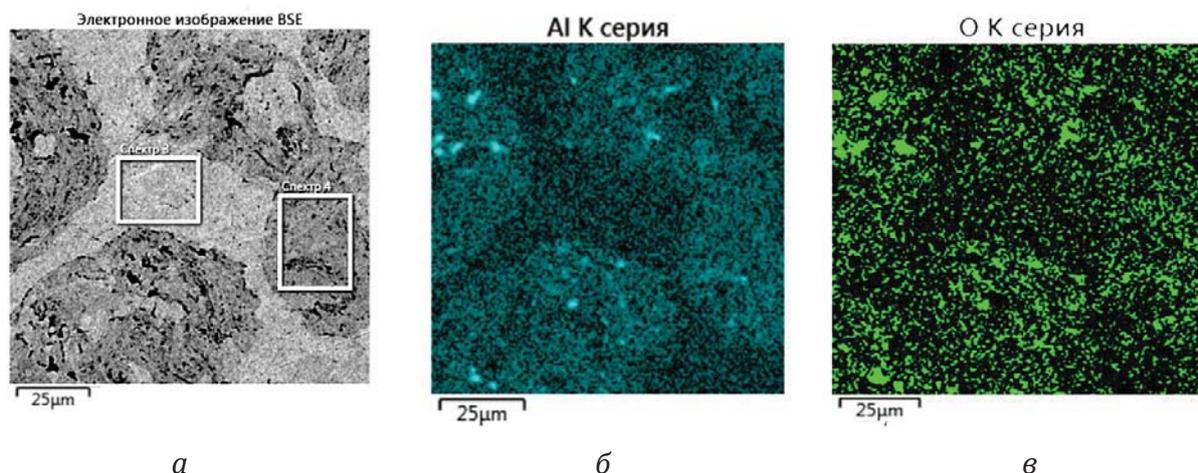


Рис. 3. Микроструктура (а), карта распределения Al (б) и кислорода (в), в композиционном материале с массовой долей гранул $\gamma_2=0,5$, полученные с помощью МРСА

В табл.3 приведены количественные значения содержания элементов в зоне сканирования медной фазы (спектр 3, рис.3, а) и в зоне сканирования гранульной структурной составляющей (спектр 4, рис. 3, а), определенные с помощью МРСА. Содержание элемента Al в зоне сканирования медной фазы (спектр 3) не обнаружено, поэтому, можно утверждать, что диффузия оксида алюминия в объем медной связки не происходит.

Таблица 3

Количественное содержание элементов, полученное с помощью микрорентгеноспектрального анализа

Название спектра	O	Al	Fe	Cu	Сумма
Суммарный спектр карты 2	0.99	0.49	0.15	98.37	100.00
Спектр 3	0.55	-	0.16	99.30	100.00
Спектр 4	1.09	0.69	0.14	98.07	100.00

Несколько превышенное содержание алюминия (0,69 %) и кислорода в гранульной структурной составляющей подтверждает то, что упрочняющие кластеры оксида алюминия распределяются по границам зерен, соответственно, на поверхности гранульных слоев, совпадающих с границами зерен, их содержание больше, чем по объему. Необходимо, также отметить, что, согласно полученным изображениям, легирующие элементы довольно равномерно распределены в гранульной структурной составляющей.

Исследования границ раздела методом сканирующей зондовой микроскопии (рис. 4) показывают наличие консолидации материала в местах соприкосновения поверхностей медной фазы и гранул, при этом нанесение медного слоя на поверхность гранул способствует повышению степени консолидации на границах раздела. Так, в композиционных образцах, изготовленных из обычных («немодифицированных») гранул, различима четкая граница между гранульной и медной структурными составляющими (рис. 4, а, области 1, 2). В образцах, где использованы покрытые медным слоем гранулы,

границы между медной фазой и гранулами не различимы, четко проглядываются лишь гранульные слои (рис. 4, б, область 3).

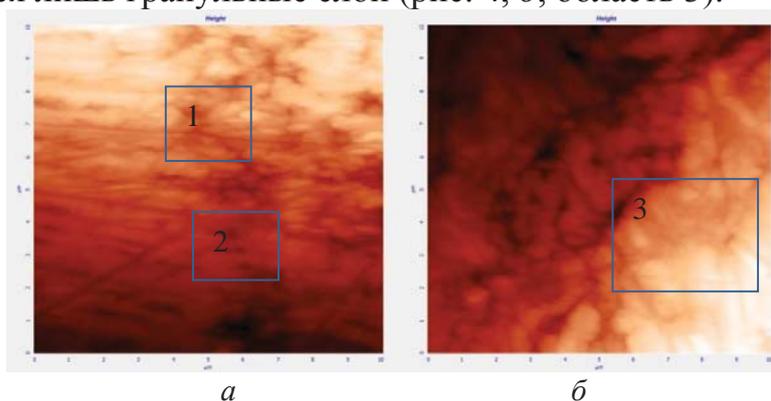


Рис. 4. Структура на границе гранульной и медной фазы (СЗМ, площадь сканирования 10x10 мкм): а) композиционный материал на основе «немодифицированных» гранул; б) композиционный материал на основе модифицированных гранул

ВЫВОДЫ

1. Структурные особенности механолегированных гранул, заключающиеся в том, что на поверхности, совпадающей с границами поверхностных медных зерен, концентрация упрочняющих включений выше, чем по объему, что препятствует образованию прочной межфазовой границы в композиционном материале медь–механолегированные гранулы

2. Нанесение на поверхность гранул медного слоя механическим методом в механоактиваторе способствует уменьшению размера зерен и увеличению микронапряжений в гранулах, и как следствие, повышению твердости, термической устойчивости гранульной составляющей и некоторому повышению электросопротивления в композиционных материалах.

3. Наличие на поверхности гранул тонкой медной пленки способствует повышению межфазового взаимодействия в системе медь–механолегированные гранулы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Довыденков В.А. Получение и свойства композиционных материалов из смеси механически легированных гранул и медного порошка / В.А. Довыденков, А.В. Довыденкова, М.В. Ярмольк // Порошковая металлургия и функциональные покрытия. -2015-№4. - С. 28-33.
2. Довыденков В.А. Получение композиционных материалов из механолегированных гранул с медным связующим / В.А. Довыденков, А.В. Довыденкова, М.В. Ярмольк // Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы, сварка: сб. докл. 9-го Междунар. симпоз. - Минск: Беларуская навука, 2015. – С.281-289.
3. Довыденков В.А. Оптимизация состава компонентов для получения композиционного материала из механолегированных наноструктурных гранул системы Cu-Al-O-C и связующего на основе меди / В.А. Довыденков, А.В. Довыденкова, М.В. Ярмольк // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка: матер. 12-й Междунар. науч.- техн. конф., Минск, 25-27 мая 2016г. – Минск: Беларуская навука, 2016. – С.28-31.
4. Довыденков В.А. Исследование композиционных материалов из жаропрочных механолегированных гранул и медного порошка / В.А. Довыденков, А.В. Довыденкова, М.В. Ярмольк // Современные технологии и машиностроение и литейном производстве»: матер. I-

ой Междунар. науч. – практ. конф., Чебоксары, 22-24 окт. 2015 г. - Чебоксары: Чуваш.гос. ун-т, 2015.- С 341-350.

5. Довыденков В.А. Модель и термодинамическое обоснование процессов консолидации в системе медь-механолегированные гранулы / В.А. Довыденков, А.В. Довыденкова, М.В. Ярмолык // Проектирование и перспективные технологии в машиностроении, металлургии и кадровое обеспечение: матер. III-ей Всеросс. науч.-практ. конф., Чебоксары, 20-21 апр. 2017 г. - Чебоксары: Чуваш.гос. ун-т, 2017.- С. 284-288.

6. Довыденков В.А. Нанокристаллические материалы с термически устойчивой структурой / В.А. Довыденков, М.В. Ярмолык, А.Р. Буев, А.В. Леухин А.В. // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. - 2009. - № 2. - С. 136-142.

7. Шалунов Е.П. Разработка научных основ, технологии и оборудования для получения и обработки полуфабрикатов из дисперсно-упрочненных композиционных материалов Е.П. Шалунов, Н.В. Данилов, Я.М. Липатов // Охрана труда и прогрессивные технологические процессы в литейном производстве, порошковой металлургии и машиностроении: тез. межреспубл. науч.-практ. конф. – Чебоксары: Чуваш.гос. ун-т, 1990. - С. 287-289.

8. Смирнов В.М. Дисперсно-упрочненные сплавы на основе меди системы Cu-Al-C-O / В.М. Смирнов, Н.Р. Смирнова, Е.П. Шалунов, А.Л. Матросов // Технические науки: сегодня и завтра: тез. докл. юбилейной итог. науч. конф. – Чебоксары: Чуваш.гос. ун-т, 1997. - С. 280-281.

9. Dovydenkov V.A. Experience of production and use of precipitation strengthened copper based materials made by mechanical alloying / V.A. Dovydenkov, E.P. Shalunov // Powder Metallurgy. - 1998. - Т. 1.- С. 372.

10. Shalunov E. Development, production and application of DISCOM[®] copper nanocomposites as highly resource electrode and electric contact materials / E. Shalunov, A. Matrosov, L. Chen: Proceedings of the Euro International Powder Metallurgy Congress and Exhibition, Euro PM 2008. – Mannheim: EPMA, 2008. – pp. 33-38.

11. Шалунов Е.П. Реакционное механическое легирование порошковой меди кислородом и углеродом / Е.П. Шалунов, В.М. Смирнов // Вестник Чувашского университета. – 2012. - № 3. – С. 252-259.

12. Шалунов Е.П. О механизмах формирования структуры и свойств композиционных материалов системы Cu-Al-C-O, получаемых на основе метода реакционного механического легирования / Е.П. Шалунов, В.М. Смирнов // Вестник Чувашского университета. - 2013. - № 3. - С. 314-322.

13. Пат. на изобретение РФ № 2576740. Антифрикционный композиционный материал на основе порошковой меди / Е.П. Шалунов, В.М. Смирнов, Урянский И.П. Заявл. 19.08.2014 г. Оpubл. 10.03.2016 г. Бюл. № 7.

14. Шалунов Е.П. Многослойные подшипники скольжения коленчатого вала для высокофорсированного дизеля / Е.П. Шалунов, В.С. Мурзин, И.Г. Леванов, В.В. Герцев: сб. науч.-техн. и информ. материалов АО «Научно-производственная корпорация «Уралвагонзавод» за 2014 год. - Вып. 12. - Нижний Тагил: АО «НПК «Уралвагонзавод», 2015. - С. 329-337.

15. Шалунов Е.П. Износостойкие подшипники скольжения из наноструктурных материалов для мощных электродвигателей / Е.П. Шалунов, В.М. Смирнов, И.П. Урянский // Вестник Чувашского университета. Технические науки. – 2015. - № 1. – С. 131-139.

16. Владимирова Ю.О. Разработка жаро- и износостойких порошковых наноконпозиционных материалов для поршней машин литья под давлением / Ю.О. Владимирова, Е.П. Шалунов, Н.В. Мулюхин, И.Е. Илларионов // Современные технологии в машиностроении и литейном производстве: матер. I-ой Междунар. науч.-практ. конф. – Чебоксары: Чуваш.гос. ун-т, 2015. - С. 153-160.

17. Шалунов Е.П. Пути повышения надежности подшипников скольжения ди-зель-генераторных установок для аварийного энергоснабжения систем безопасности атомных

электростанций / Е.П. Шалунов, В.М. Смирнов, А.В. Воронин // Вестник Чувашского университета. Технические науки. – 2017. - № 1. – С. 200-210.

18.Смирнов В.М. Получение и свойства антифрикционного композиционного материала оловянная бронза– механолегированные гранулы/ В.М. Смирнов, Е.П. Шалунов // Современные технологии в машиностроении и литейном производстве: матер. III-ей Междунар. науч.-практ. конф., Чебоксары, 4-6 дек/ 2017 г. – Чебоксары: Чуваш.гос. ун-т, 2017. – С. 350-357.

19. Шалунов Е.П. Подшипники скольжения на основе порошковых композиционных материалов для экстремальных условий эксплуатации и их сравнительные испытания / Е.П. Шалунов, В.М. Смирнов // Проектирование и современные технологии в машиностроении, металлургии и их кадровое обеспечение: матер. III-ей Всеросс. науч. – практ. конф., Чебоксары, 20-21 апр. 2017 г. – Чебоксары: Чуваш.гос. ун-т, 2017. – С. 293-300.

20.Смирнов В.М. Исследование композиционных материалов на основе оловянной бронзы с наполнителями из дисперсно-упрочненных гранул меди / В.М. Смирнов, Е.П. Шалунов, Д.А. Тимофеев // Проектирование и современные технологии в машиностроении, металлургии и их кадровое обеспечение: матер. III-ей Всеросс. науч. – практ. конф., Чебоксары, 20-21 апр. 2017 г. – Чебоксары: Чуваш.гос. ун-т, 2017. – С. 323-329.

21. Смирнов В.М. Свойства и структура композиционных металломатричных материалов на основе порошковой меди, получаемых реакционным механическим легированием/ В.М. Смирнов, Е.П. Шалунов // Деформация и разрушение материалов и наноматериалов: сб. матер. VII -ой Междунар. конф. (Москва, 7-10 ноябр. 2017 г.) - М.: ИМЕТ РАН, 2017. – С.434-437.

22. Смирнов В.М. Антифрикционный наноструктурированный композиционный материал на основе порошковой меди для тяжело нагруженных подшипников скольжения / В.М. Смирнов, Е.П. Шалунов // Деформация и разрушение материалов и наноматериалов: сб. матер. VII -ой Междунар. конф. (Москва, 7-10 ноябр. 2017 г.) - М.: ИМЕТ РАН, 2017. – С.439-441.

23. Пат.на изобретение RUS2644225.Связка на основе меди для изготовления алмазного инструмента / в.м. Смирнов, Е.П. Шалунов, Д.А. Тимофеев.Заявл. 24.04.2017 г. Опубл. 08.02.2018 г.Бюл. № 4.

24. Шалунов Е.П. Создание теплопрочных композиционных материалов матрично-наполненного типа для тяжело нагруженных элементов узлов трения / Е.П. Шалунов, И.Е. Илларионов // Литейщик России. – 2018. - № 5. – С. 25-29.

АВТОРЫ

Довыденков Владислав Андреевич – д-р.техн. наук, директор ООО «Наномет», профессор кафедры машиностроения и материаловедения Поволжского государственного технологического университета, 424006, Россия, г. Йошкар-Ола, ул. Панфилова, д. 41, оф. 603, ya.dovydenkov@ya.ru, +7(8362) 41-42-99.

Ярмольк Милана Владимировна - канд. техн. наук, главный технолог ЗАО «МЕТМА», научный сотрудник кафедры машиностроения и материаловедения Поволжского государственного технологического университета, 424007, Россия, г. Йошкар-Ола, ул. Крылова, 53А, milayr@mail.ru, +7(8362) 49-55-56.

AUTHORS

Dovydenkov Vladislav A. - Dr. (eng.), director of NANOMET LLC, professor of Mechanical Engineering and Materials Science Department, Volga State University of Technology, 424006, Russia, Yoshkar-Ola, Panfilov St., 41, office 603, ya.dovydenkov@ya.ru, +7(8362) 41-42-99.

Yarmolyk Milana V. - Dr. (eng.), chief technologist of METMA JSC, Mechanical Engineering and Materials Science Department, Volga State University of Technology, 424007, Russia, Yoshkar-Ola, Krylov St., 53A, milayr@mail.ru, +7(8362) 49-55-56.

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО
ПОЛЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ДЛИННОМЕРНЫХ ТРУБЧАТЫХ
ЭЛЕКТРОДОВ-ИНСТРУМЕНТОВ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ
МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОРОШКОВОЙ МЕДИ**

**USING THE ENERGY OF A PULSED MAGNETIC FIELD TO
RECEIVE LONG-DIMENSIONAL TUBULAR ELECTRODE
TOOLS MADE OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON
POWDER OF COPPER**

ШАЛУНОВ Е.П.¹, САЛОВ П.М.¹, ЛЕВУШИН А.Н.¹, ВЛАДИМИРОВА Ю.О.²,

*(¹ Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия,
² АО «Научно-производственный комплекс «Элара», г. Чебоксары, Россия.)*

SHALUNOV E. P. ¹, SALOV P. M. ¹, LEVUSHIN A.N. ¹, VLADIMIROVA Yu. O. ²

(¹ Chuvash State University named of I. N. Ulyanov, Cheboksary, Russia

² Research and production complex ELARA JSC, Cheboksary, Russia)

Аннотация. Показана возможность изготовления трубчатых электродов-инструментов путем радиального прессования порошковой композиции WC+Co+BN энергией импульсного магнитного поля с использованием токопроводящей медной оболочки и последующей пропитки полученной трубчатой прессовки медью этой оболочки. Электроэрозионная стойкость у такого трубчатого электрода-инструмента при электроэрозионной прошивке твердого сплава ВК6 в 4...5 раз выше, чем у медного и в 5...6 раз выше, чем у латунного.

Abstract. It is shown that it is possible to manufacture a tubular electrode tool by radial pressing of the powder composition WC+Co+BN with the energy of a pulsed magnetic field using a conductive copper shell and subsequent impregnation of the resulting tubular pressing with copper of this shell. Erosion resistance of such a tubular electrode-the tool at electroerosive piercing of hard alloy VK6 in 4...5 times higher than that of copper, and 5 to 6 times higher than that of brass.

Ключевые слова: порошковая металлургия, композиция, электроэрозионная прошивка, электрод-инструмент, твердый сплав, импульсное магнитное поле, индуктор, обжим, спекание, пропитка, электроэрозионная стойкость.

Keywords: powder metallurgy, composition, electroerosion flashing, electrode-tool, hard alloy, pulsed magnetic field, inductor, crimping, sintering, impregnation, electroerosion resistance.

Одной из наиболее востребованных и распространенных операций электроэрозионной обработки (ЭЭО) металлических материалов является электроэрозионная прошивка круглых отверстий в труднообрабатываемых материалах (высоколегированных и закаленных сталях, твердых сплавах) при

изготовлении из них матриц пробивных и вырубных штампов, пресс-форм, форм для литья, различных сеток, извлечении сломанного инструмента или крепежа и др. [1,2]. Чаще всего, для выполнения этой операции используется сплошной электрод-инструмент (рис. 1,а). При этом весь объем материала, удаленного из отверстия, как правило, составляет безвозвратные потери, которые ложатся на себестоимость изготовленного с использованием ЭЭО изделия. Кроме того, условия работы такого электрода-инструмента, когда рабочей средой (например, керосином) охлаждается только его наружная поверхность, крайне тяжелые, и из-за плохого теплоотвода электрод-инструмент быстро изнашивается, а сам процесс прошивки ведется с невысокой производительностью [1÷6].

Необходимость обеспечения высокой производительности процесса, снижения износа электрода-инструмента и, как следствие, снижения себестоимости изделия обуславливает ту актуальность, которую имеют вопросы создания требуемого электрода-инструмента для электроэрозионной прошивки отверстий, особенно, труднообрабатываемых металлических материалов.

В настоящее время имеется значительное количество материалов для электроэрозионной обработки [3÷7], однако, интерес могут представлять только те, из которых можно будет изготовить полый электрод-инструмент (рис. 1, б).

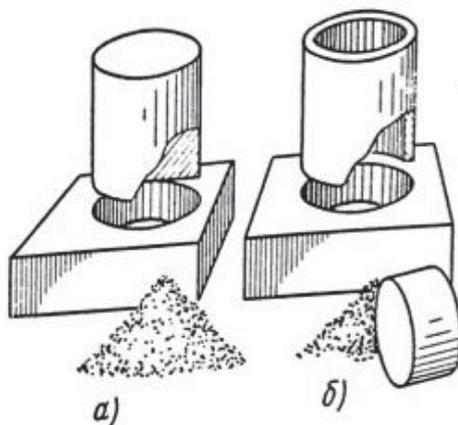


Рис. 1. Электроэрозионная прошивка сквозного отверстия сплошным (а) и полым (б) электродом-инструментом

Наличие в нем сплошного отверстия позволит значительно улучшить отвод тепла от него, увеличить производительность обработки в штуках и снизить удельный электроэрозионный износ инструмента. Например, в работе [2] показано, что при выполнении в деталях из стали или жаропрочных сплавов сквозных отверстий при помощи трубчатого электрода-инструмента, когда его линейный износ компенсируется большей его длиной, обработку можно вести на форсированных режимах при плотностях электрического тока 40...80 А/см². Рабочую жидкость в этом случае прокачивают через отверстие в электроде-инструменте, обеспечивая, тем самым, хорошее его охлаждение. Относительный износ трубчатого электрода-инструмента на этих режимах составляет 40...50% от относительного износа сплошного электрода-инструмента.

Из рис. 1,б видно, что чем тоньше будет стенка электрода-инструмента, тем будет больше диаметр вырезанного цилиндрического «отхода», который таковым может не считаться, поскольку может служить заготовкой для какой-либо другой детали. Очевидно, что снижение толщины стенки электрода-инструмента может быть реализовано только в тех случаях, когда удастся сделать правильный выбор материала и обеспечить изготовление из него электрода-инструмента с тонкой стенкой и значительной длиной.

Как известно [1,3,5,6], материалы для изготовления электрода-инструмента, используемого при ЭЭО труднообрабатываемых металлических материалов, должны обладать повышенной жаропрочностью, высокой температурой плавления, электроэрозионной стойкостью при достаточно высоких значениях тепло- и электропроводности. Эти требования находятся друг с другом в относительном противоречии. Например, материалом, который мог бы удовлетворить требованиям по хорошей тепло – и электропроводности могла бы служить медь, но она должна иметь при этом тугоплавкость как, например, у вольфрама, карбида вольфрама или молибдена. Однако известно [7,8], что вольфрам или твердые сплавы карбида вольфрама с медью не образуют растворов заметной концентрации ни в жидком, ни в твердом состояниях. Но в смесях же они аддитивно сочетают свойства, присущие каждому из них в отдельности. Очевидно, что такие «искусственные» материалы (псевдосплавы) получить традиционными металлургическими методами весьма сложно [9,10] и, как правило, используются технологии порошковой металлургии [8].

Для указанных целей наибольший интерес представляет порошковый псевдосплав композиции WC+Co+Cu, содержащий 50%мас. меди, с добавкой нитрида бора BN, призванного повысить электроэрозионную стойкость электрода-инструмента [8]. Однако, BN не взаимодействует с компонентами псевдосплава, а располагается на границах зерен и на поверхности частиц WC, Co и Cu, препятствуя их спеканию и усадке, что вызывает большую пористость спеченных электродов. Но малое (2...3%мас.) содержание BN в композиции способствует получению мелкозернистой структуры псевдосплава. Высокую электроэрозионную стойкость электрода-инструмента из указанной композиции с малыми добавками BN связывают с образованием сотовой структуры, где медь заключена частично (в местах не нарушенных) в скелете из WC+Co и в тугоплавких сотах из BN, где возникают сильные капиллярные силы, препятствующие испарению меди из электрода-инструмента при его работе [8].

Электроды-инструменты из указанного материала получают, преимущественно, прессованием порошковой шихты, не содержащей порошка меди, спеканием полученных заготовок (представляющих собой тугоплавкий пористый каркас) и дальнейшей пропиткой спеченной заготовки (каркаса) медью. Такая технология позволяет получать сплошной электрод-инструмент, однако, его длина не должна быть больше в 2...2,5 раза его диаметра. При этом сам диаметр не может быть более 30...40 мм, т.к. в противном случае каркас в центральной части электрода не будет заполнен медью при пропитке.

Очевидно, что по указанной технологии из такого материала невозможно изготовить качественный пустотелый электрод-инструмент, тем более, тонкостенный, ибо при осевом прессовании трубчатой заготовки большой длины ее плотность по длине будет совершенно неоднородной и, следовательно, свойства материала электрода будут так же анизотропны, что непременно скажется на его эксплуатационных характеристиках.

В связи с изложенным выше, в настоящей работе была предпринята попытка получения такого электрода-инструмента путем использования энергии импульсного магнитного поля (ИМП) на операции холодного прессования, обеспечивающего высокоскоростной и динамический процесс уплотнения порошковых материалов, способствующий получению более плотных прессовок [11,12].

Трубчатые заготовки из порошковых композиций WC+Co+BN получали при разряде магнитно-импульсной установки МИУ-20/5 (табл.) на индуктор (рис.1), в отверстие которого была установлена оснастка с указанной порошковой композицией (рис.2).

Таблица
Технические характеристики магнитно-импульсной установки МИУ-20/5

Характеристика	Единица измерения	Значение
Накапливаемая энергия	кДж	20
Максимальное напряжение зарядки	кВ	5
Емкость конденсаторной батареи	мкФ	1600
Частота короткозамкнутого разрядного контура	кГц	12,6

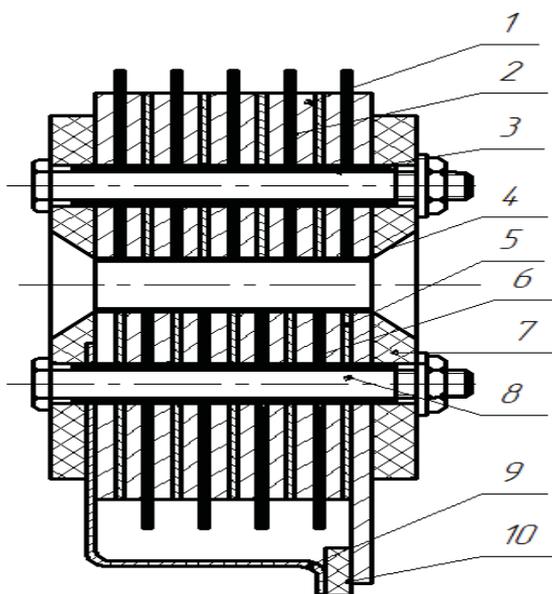


Рис. 2. Общий вид пятивиткового пластинчатого индуктора для радиального прессования порошковой композиции: 1 – пластина; 2 – межпластинная изоляция; 3 – изолирующая втулка; 4 – главная изоляция; 5 – закоротка; 6 – межвитковая изоляция; 7 – корпус; 8 – болт; 9 – токовывод; 10 – изолирующая пластина

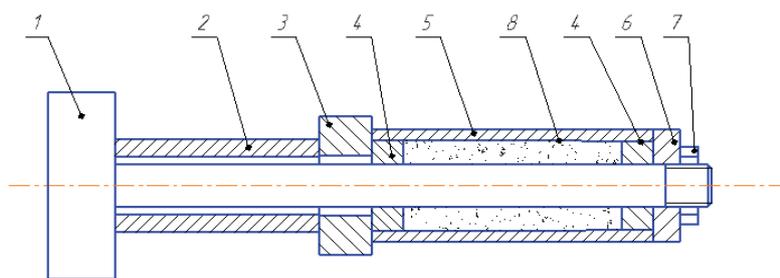


Рис. 3. Эскиз оснастки для радиального прессования порошковой композиции в электропроводящей оболочке: 1 – оправка; 2 – распорная втулка; 3 – кольцо; 4 – заглушки; 5 – электропроводящая оболочка; 6 – шайба; 7 – гайка; 8 – порошковая композиция

Для подготовки этой оснастки к работе порошковая композиция 8 засыпалась в радиальный зазор между электропроводящей оболочкой 5 и коаксиально установленной в ней стальной оправкой 1. Для предотвращения высыпания порошковой смеси использовались две стальные заглушки 4 и 6, а также шайба 6, которая поджималась к оболочке гайкой 7. Стальные распорная втулка 2 и кольцо 3 служили для удаления оправки из полученной в результате обжима трубчатой порошковой заготовки (прессовки).

В качестве инструмента для обжима токопроводящей оболочки использовался многовитковый пластинчатый индуктор с рабочим отверстием диаметром 22 мм (см. рис.2). Каждый виток индуктора состоял из двух пластин, изготовленных из объемного наноструктурного материала системы Cu-Al-C-O марки С16.105 ДИСКОН® ТУ 1479-002-13092819-2001. Этот материал при относительной электропроводности 92% IASC имеет температуру рекристаллизации 830°C и обладает высоким пределом прочности при растяжении – 450 МПа [13÷16]. Для обеспечения более лучшего электрического контакта поверхности пластин, через которые происходила передача тока с одной пластины на другую, подвергались шлифованию [17].

Для регистрации давления магнитного поля на электропроводящую оболочку использовался измерительный комплекс. С целью повышения точности измерения давления измерительный комплекс тарировался в соответствии с методикой, изложенной в [12].

Для получения прессовок, служащих заготовками для последующего изготовления из них электродов-инструментов, использовались электропроводящие оболочки из отожженной меди наружным диаметром 20 мм, длиной 70 мм и толщиной стенки 1,5 мм. Оправки изготовлялись из стали 45 рабочим диаметром 8 мм. Для обеспечения извлечения оправки из отпрессованной заготовки рабочая часть оправки шлифовалась [18] и перед засыпкой порошковой композицией смазывалась смесью нитрида бора с глицерином.

Образцы обжимались при разных значениях энергии магнитно-импульсной установки (МИУ), после чего на разрывной машине Р-50 производилось удаление оправки из прессовки путём зажима на захватах

машины оправки 1 и кольца 3 (со снятой гайкой 7). Снятие медной оболочки с прессовки осуществлялось на токарном станке.

Затем определялась относительная плотность трубчатых прессовок и строилась зависимость их относительной плотности от затраченной энергии МИУ. Требуемой относительной плотности прессовки 80% соответствовала энергия, равная 12,8 кДж. После этого были проведены такие же эксперименты по радиальному прессованию порошковой композиции с использованием медной оболочки энергией МИУ, равной 12,8 кДж. Однако, после выпрессовки трубчатой прессовки медная оболочка с нее не удалялась. В отверстие прессовки плотно устанавливался стальной трубопровод, подсоединенный к вакуумному насосу, а сама эта конструкция помещалась в трубчатую печь электрического сопротивления, которая нагревалась сначала до 980°C, выдерживалась при этой температуре 45 мин, а затем температура в печи поднималась до 1150...1180°C, и при этой температуре происходило расплавление медной оболочки и проникновение меди в радиальном направлении в стенку прессовки. Затем образец быстро извлекался из печи и охлаждался на воздухе. После охлаждения образец обтачивался по наружному и внутреннему (при необходимости) диаметру, а также производилась подрезка его торцов.

Полученный образец полого электрода-инструмента (рис. 3) нарезался по длине на кольца длиной 5 мм и производилось определение относительной плотности этих колец, после чего строилась эпюра относительной плотности по длине электрода-инструмента, которая позволила сделать вывод, что средняя по длине электрода-инструмента относительная плотность составляла 94...97% от теоретической плотности его материала. При этом распределение плотности по длине было равномерным, о чем свидетельствуют также результаты измерения твердостиколец в плоскости, перпендикулярной их торцу.

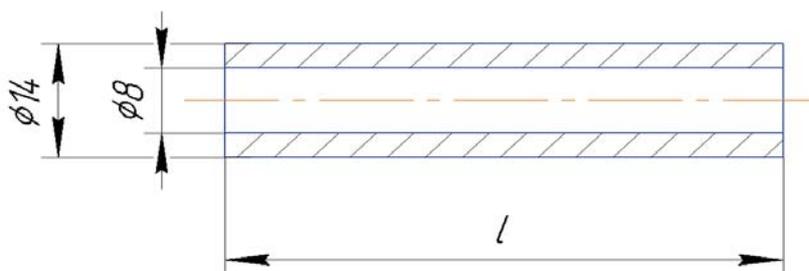


Рис. 4. Эскиз образца электрода-инструмента, полученного радиальным магнитно-импульсным прессованием порошковой композиции WC+Co+BN и пропиткой ее медью

Проведенная на станке А-207-12 в среде керосина прошивка сквозного отверстия в пластине из твердого сплава с использованием трубчатых электродов-инструментов из различных материалов, а именно, из порошковой композиции WC+Co+BN+Cu, технической меди М1 и латуни ЛС59-1 в виде холоднотянутых калиброванных труб, показали, что электроэрозионная стойкость у трубчатого электрода-инструмента из композиции WC+Co+BN+Cu в 4...5 раз выше, чем у медного и в 5...6 раз выше, чем у латунного.

ЛИТЕРАТУРА

1. Немилов Е. Ф. Справочник по электроэрозионной обработке материалов / Е.Ф. Немилов. - Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. - 164 с.
2. Попилов Л.Я. Электрофизическая и электрохимическая обработка материалов. Справочник / Л.Я. Попилов; 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1982. - 400 с.
3. Об электродах для электроэрозионной обработки (электрод-инструмент) [Электронный ресурс]. URL.: <https://graphite.in.ua/a105775-elektrodah-dlya-elektro.html> (дата обращения: 24.09.2018).
4. Журин А.В. Методы расчета технологических параметров и электродов-инструментов при электроэрозионной обработке / А.В. Журин: Дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01. - Тула, 2005. - 132 с.
5. Шлыков Е.С. Исследование износа электрод-инструмента при копирующе-прошивной электроэрозионной обработке биметаллов / Е.С. Шлыков, Т.Р. Абляз // Современные проблемы науки и образования. - 2015. - № 2-1. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=20539> (дата обращения: 02.11.2018).
6. Оглезнев Н.Д. Исследование износостойкости электродов-инструментов из композиционных материалов для электроэрозионной обработки / Н.Д. Оглезнев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. - 2014. - Т.16. - № 3. - С. 54-69.
7. Гнесин Г.Г. Спеченные материалы для электротехники и электроники. Справочник / Г.Г. Гнесин, В.А. Лубок, Г.Н. Братерская Г.Н. [и др.]. - М.: Металлургия, 1981. - 344 с.
8. Миронов В.А. Магнитно-импульсное прессование порошко / В.А. Миронов. - Рига: Зинатке, 1980. - 76 с.
9. Новое в электрофизической и электрохимической обработке материалов; под ред. Л.Я. Попилова. - М.: Машиностроение, 1972. - 360 с.
10. Илларионов И.Е. Углеродные материалы в литейном производстве и порошковой металлургии / И.Е. Илларионов, О.В. Кузьмина, Е.П. Шалунов, Д.Л. Кузьмин // Проектирование и перспективные технологии в машиностроении и металлургии: материалы II-ой Республ. научно-практ. конф. - Чебоксары: Чуваш. гос. ун-т, 2016. - С. 90-97.
11. Илларионов И.Е. Модифицированные металлофосфатные связующие и смеси на их основе для производства отливок из различных сплавов / И.Е. Илларионов, И.А. Стрельников И.А., А.В. Королев [и др.] // Проектирование и перспективные технологии в машиностроении и металлургии: материалы II-ой Республ. научно-практ. конф. - Чебоксары: Чуваш. гос. ун-т, 2016. - С. 23-32.
12. Попов О.В. Импульсные методы обработки металлов. Конспект лекций / О.В. Попов, Е.Г. Иванов, Е.П. Шалунов [др.]. - Чебоксары: Чуваш. гос. ун-т, 1982. - 64 с.
13. Шалунов Е.П. Методы и средства исследований процессов магнитно-импульсного прессования порошковых материалов / Е. П. Шалунов, Е. Г. Иванов, Я. М. Липатов // Импульсные методы обработки машиностроительных материалов: сб. статей. - Чебоксары: Чуваш. гос. ун-т, 1985. - С. 55 - 63.
14. Шалунов Е.П. О механизмах формирования структуры и свойств композиционных материалов системы Cu-Al-C-O, получаемых на основе метода реакционного механического легирования / Е.П. Шалунов, В.М. Смирнов // Вестник Чувашского университета. - 2013. - № 3. - С. 314-322.
15. Пат. на изобретение RUS 2398656. Способ изготовления композиционного материала для электрических контактов на медной основе / Е.П. Шалунов, И.С. Гершман. Заявл. 23.07.2009.
16. Шалунов Е.П. Износостойкие подшипники скольжения из наноструктурных материалов для мощных электродвигателей / Е.П. Шалунов, В.М. Смирнов, И.П. Урянский // Вестник Чувашского университета. - 2015. - № 1. - С. 131-139.
17. Shalunov E. Development, production and application of DISCOM[®] copper nanocomposites as highly resource electrode and electric contact materials / E. Shalunov, A. Matrosov, L. Chen: Proceedings of the Euro International Powder Metallurgy Congress and Exhibition, Euro PM 2008. - Mannheim: EPMA, 2008. - pp. 33-38.

17. Виноградова Т.Г. Качество обработанных отверстий при электрокорундовом и аэроборном шлифовании / Т.Г. Виноградова, П.М. Салов, Д.П. Салова // Научно-техн. вестник Поволжья. - 2011. - №1. - С.91-95.

18. Салов П.М. Повышение эффективности процесса и качества обработанной поверхности при силовом шлифовании торцом круга / П.М. Салов, Д.А. Вячеславов, М.Л. Афанасьева [и др.] // Высокие технологии в машиностроении: матер. Всеросс. науч. техн. интернет – конф., посвящ. 100-летию засл. деят. н. и т. Папшева Д.Д.; отв. ред. В.Н. Трусов. – Самара: СамГТУ, 2015. - С.28-29.

АВТОРЫ

Шалунов Евгений Петрович – канд. техн. наук, профессор кафедры технологии машиностроения, научный руководитель Объединенной научно-исследовательской лаборатории качества, обрабатываемости и композиционных материалов, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (shalunov2000@mail.ru).

Салов Петр Михайлович – д-р техн. наук, профессор кафедры технологии машиностроения, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (salov-salov@yandex.ru).

Левушин Андрей Николаевич - канд. философ. наук, доцент кафедры иностранных языков, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (yamabushi585@gmail.com).

Владиминова Юлия Олеговна – инженер-технолог АО «Научно-производственный комплекс «Элара», Россия, Чебоксары (yulivladimirova@mail.ru).

AUTHORS

Shalunov Evgeny P. – Dr.(eng.), professor of Mechanical Engineering Technology Department; scientific leader of the Joint research and development laboratories of mechanically alloyed nanocomposite materials, their technology and quality, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (shalunov2000@mail.ru).

Salov Peter M. – Dr.(eng.), professor of Mechanical Engineering Technology Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (salov-salov@yandex.ru).

Levushin Andrey N. - Dr.(philosoph.), associate professor of Foreign Languages Department, Chuvash State University, Russia (yamabushi585@gmail.com).

Vladimirova Yuliya O. – Engineer of Research and production complex ELARA JSC, Russia, Cheboksary (yulivladimirova@mail.ru).

**О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КОНДЕНСАТОРНОЙ СВАРКИ
ДЛЯ СОЕДИНЕНИЯ СТАЛЬНОГО ХВОСТОВИКА
С АЛМАЗНОЙ ГОЛОВКОЙ
НА НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МЕДНЫХ СВЯЗКАХ**

**ABOUT THE POSSIBILITY OF APPLICATION OF CONDENSING
WELDING FOR CONNECTING STEEL SHANK
WITH DIAMOND HEAD
ON NANO-STRUCTURED COPPER BONDS**

ГОЛЮШОВ И.С., СМИРНОВ В.М., ЦАЙ В.Н.

(Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия)

GOLUSHOV I.S., SMIRNOV V.M., TSAI V.N

(Chuvash State University named after I.N. Ulyanov, Cheboksary, Russia)

Аннотация. Приведены результаты исследования возможности применения метода конденсаторной сварки для соединения алмазнесущей головки на наноструктурированной медной связке и стального закаленного хвостовика (корпуса) из углеродистой инструментальной стали.

Annotation. The results of the study of the possibility of applying the method of capacitor welding to connect the diamond-bearing head on a nanostructured copper bond and steel hardened shank (body) of carbon tool steel are given.

Ключевые слова: Конденсаторная сварка, алмазная головка, наноструктурированная медная связка, сварной шов, хвостовик, микротвердость.

Key words: Capacitor welding, diamond head, nanostructured copper bond, weld, shank, microhardness.

Наноструктурированные медные связки имеют структуру матрично-наполненного типа [1÷7], состоящую из оловянной бронзы объемом до 15% и дисперсно-упрочненных гранул систем Cu-Al-C-O [8÷10] или Cu-Al-Ti-C-O [11,12] на основе меди. Лабораторные испытания алмазных инструментов, изготовленных на таких медных связках, показали высокую эффективность их применения по сравнению со связками на основе обычных гетерогенных сплавов на основе Cu-Sn при шлифовании изделий из твердого сплава. Они обладают большим ресурсом, меньшим удельным расходом алмаза по сравнению со связкой M2-01 [1÷3]. Кроме того, алмазные инструменты на основе наноструктурированных медных связок за счет значительного снижения содержания олова в них по сравнению с обычными связками на основе Cu-Sn имеют меньшую себестоимость изготовления.

Еще большее снижение себестоимости изготовления алмазного инструмента, а именно алмазных головок, возможно за счет применения

технологии конденсаторной точечной сварки для соединения алмазнесущей головки со стальным закаленным хвостовиком.

Как известно [13], конструкция алмазной головки состоит из двух составных частей - это алмазнесущая часть и корпус в виде хвостовика. Эти детали состоят из разных материалов и их изготавливают обычно по отдельности. Затем они соединяются, используя метод пайки серебряными припоями или диффузионной сваркой [14,15]. Оба метода основаны на объемном длительном нагреве почти до 600°C. В производстве оба этих метода достаточно затратные и малоэффективные. Связано это с тем, что требуется оснастка для пайки или сварки, которую приходится изготавливать из дорогостоящих жаропрочных материалов. Время соединения при этом составляет до 30 мин. Сам хвостовик в этом случае изготавливается из быстрорежущей инструментальной стали Р6М5, которая значительно увеличивает себестоимость производимых головок. Использование других, менее теплостойких сталей приводит к разупрочнению хвостовика, что впоследствии не обеспечивает необходимой точности при шлифовании из-за отгиба хвостовика.

В связи с этим, в настоящей работе была поставлена задача исследования возможности разработки такого метода, который обеспечивает соединения, не уступающие по прочности соединениям, получаемым вышеописанными методами, но при этом дает возможность использовать в качестве хвостовика закаленные углердистые инструментальные стали марок У8А, У9А, У10А, У12А по ГОСТ 1435 с твердостью 60...63HRC. Для решения этой задачи требуется, чтобы при соединении хвостовика и алмазнесущей головки не происходило бы объемного нагрева соединяемых деталей выше 200°C. Наиболее подходящим методом для таких требований является метод конденсаторной (импульсной) точечной сварки, который имеет много преимуществ [16,17] и может обеспечить необходимую прочность соединения хвостовика с алмазносной частью головки. Этот метод точечной сварки, за счет экономии электроэнергии, времени и расходных материалов, позволит снизить стоимость инструмента и даст возможность наиболее массово использовать такой тип инструмента при обработке.

Однако практическое применение метода конденсаторной (импульсной) сварки для соединения стального закаленного хвостовика с алмазной головкой на металлических связках, тем более, на наноструктурированной медной связке не изучено и требует, во-первых, разработки дополнительного прижимного устройства для обеспечения соосности соединяемых деталей алмазной головки. Во-вторых, необходимо проведение исследований влияния геометрических форм соединяемых поверхностей деталей и режимов их сварки на прочностные свойства соединения.

Для проведения исследования был изготовлен сварочный аппарат с емкостью конденсаторной батареи 10000 мФ и регулируемым диапазоном напряжения от 10В до 100В. Емкость конденсаторов была выбрана, исходя из диаметра хвостовика, который в нашем случае составлял 6 мм. Ёмкость взята с запасом для хвостовиков большего диаметра, ее можно менять, добавляя или убирая конденсаторы из батареи.

Изначально планировалось разработать и изготовить прижимное устройство полностью заново, однако, в таком случае это сильно бы увеличило его стоимость и не позволило бы использовать сварочные аппараты промышленного изготовления со стандартными прижимными устройствами. Поэтому было принято решение взять за основу стандартный сварочный пистолет и при помощи доработок обеспечить необходимую точность при сварке инструмента.

В стандартном исполнении аппарат конденсаторной сварки с прижимным устройством в виде пистолета широко используется для приваривания шпилек к стальным поверхностям. При этом в пистолет вставляется шпилька, и затем пистолет со шпилькой устанавливается на лист стали при помощи 3-х упоров. Для соединения алмазной головки с хвостовиком такой метод не приемлем, т.к. нужно обеспечить высокую соосность хвостовика и головки, не допустить смещения в процессе сварки за счет надежного крепления и обеспечить хороший контакт с электродами сварочного аппарата.

Для решения данной проблемы были предложены специальные переходники, которые обеспечивают соосное расположение алмазонасущей части относительно хвостовика и высокую точность соединения. Переходник состоит из двух основных частей (рис.1.): полипропиленовый переходник (3), в который вставляется пистолет (1); соединительная муфта (4) из текстолита, в которую снизу вставляется алмазная головка (5), а сверху поджимается хвостовиком (2), вставленным в цанговый зажим пистолета. Муфта (2) в сборе с переходником (3), образуют соединительное устройство, которое обеспечивает необходимую соосность соединения хвостовика с алмазонасущей головкой.

Муфта является основной частью, которая центрует алмазонасущую часть с хвостовиком и сохраняет такое положение деталей до конца сварки. Недостатком этой муфты является то, что для каждого конкретного инструмента необходима будет своя муфта, потому как муфта рассчитана на определенный диаметр хвостовика, диаметр и высоту головки.

В качестве второго контакта используется толстая медная пластина (6) для того, чтобы обеспечить наилучший контакт, наименьшее сопротивление и отвести излишки тепла, образующиеся при сварке.

Перед проведением сварочных работ необходимо подготовить свариваемые поверхности обеих деталей, обеспечивая нужную геометрию и хороший электрический контакт. Процесс соединения методом конденсаторной сварки производится в следующей последовательности (см. рис.1):

- готовый хвостовик (2) устанавливается в цангу сварочного пистолета (1);
- на пистолет устанавливается полипропиленовый переходник (3);
- алмазонасущая головка (5) снизу устанавливается в соединительную муфту (4), которая затем вставляется в переходник;
- производится зарядка конденсаторной батареи до необходимого напряжения;
- пистолет в сборе с приспособлениями и свариваемыми деталями устанавливается так, чтобы торец алмазной головки уперся в медную пластину (6) которая является вторым электродом аппарата. Затем прижимается пистолет

до тех пор, пока пружина не перестанет сжиматься, и нажимается кнопка разряда;

- для извлечения сваренного инструмента сначала удерживая за переходник (3) вытаскивается плавно сварочный пистолет (1) из приспособления. Затем муфта 4 с алмазной головкой вытаскивается из переходника (3);

- на последнем этапе готовый инструмент выталкивается из муфты со стороны хвостовика.

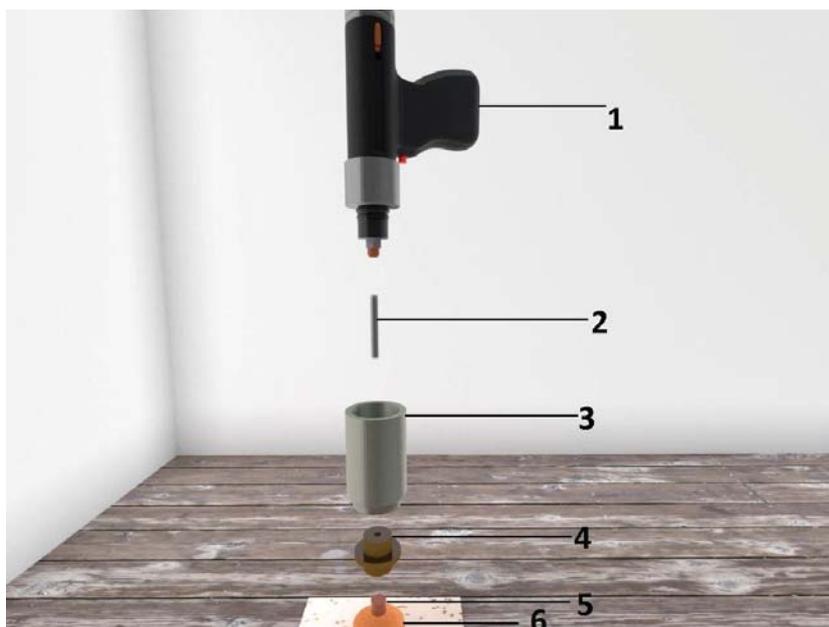


Рис. 1. Сварочный пистолет с дополнительным прижимным устройством:
1 - сварочный пистолет; 2 – хвостовик; 3 - полипропиленовый переходник;
4 - текстолитовая муфта; 5 - алмазная головка; 6 - медный электрод

Изучение влияния геометрии поверхности свариваемых деталей и режимов сварки (напряжение зарядки) на качество шва проводили на модельных головках диаметром 12 мм и высотой 10 мм, изготовленных из наноструктурированной медной связки без добавления алмазного порошка. В качестве хвостовика применяли калиброванные термообработанные прутки диаметром 6 мм из стали У8. Исходная твердость прутков составляла ~ 40HRC.

Качество соединения оценивали визуально по наличию несплошностей в соединении, а также исследованием микроструктуры и измерением микротвердости шва и зон термического влияния. Измерение микротвёрдости сварного соединения проводили на полуавтоматическом микротвердомере NMV-G21ST (Шимадзу, Япония) при нагрузке 100 г. Образцы в виде шлифов для исследования структуры и определения микротвердости сварного шва и зон термического влияния вырезались из сваренных вышеописанным методом модельных образцов инструмента. Травление шлифов для выявления структуры проводили 10%-ым раствором аммиака.

Как видно из микрофотографии сварного соединения (рис.2, а), сварное соединение сплошное, с четкой границей со стороны стали У8. Сварной шов

имеет толщину не более 50 мкм. Микротвердость стали на границе со швом (первый отпечаток слева от крестика) составляет 300 HV_{0,1}(31...32 HRC), а через 0,25 мм от шва микротвердость практически такая же, как в исходном состоянии - 380...390 HV_{0,1} (~40 HRC). Таким образом, со стороны стального хвостовика из термообработанной стали У8 при приваривании его к цилиндрической наноструктурированной медной связке методом конденсаторной сварки образуется зона термического влияния шириной не более 0,25 мм. При этом разница в твердости в этой зоне не превышает 10 HRC.

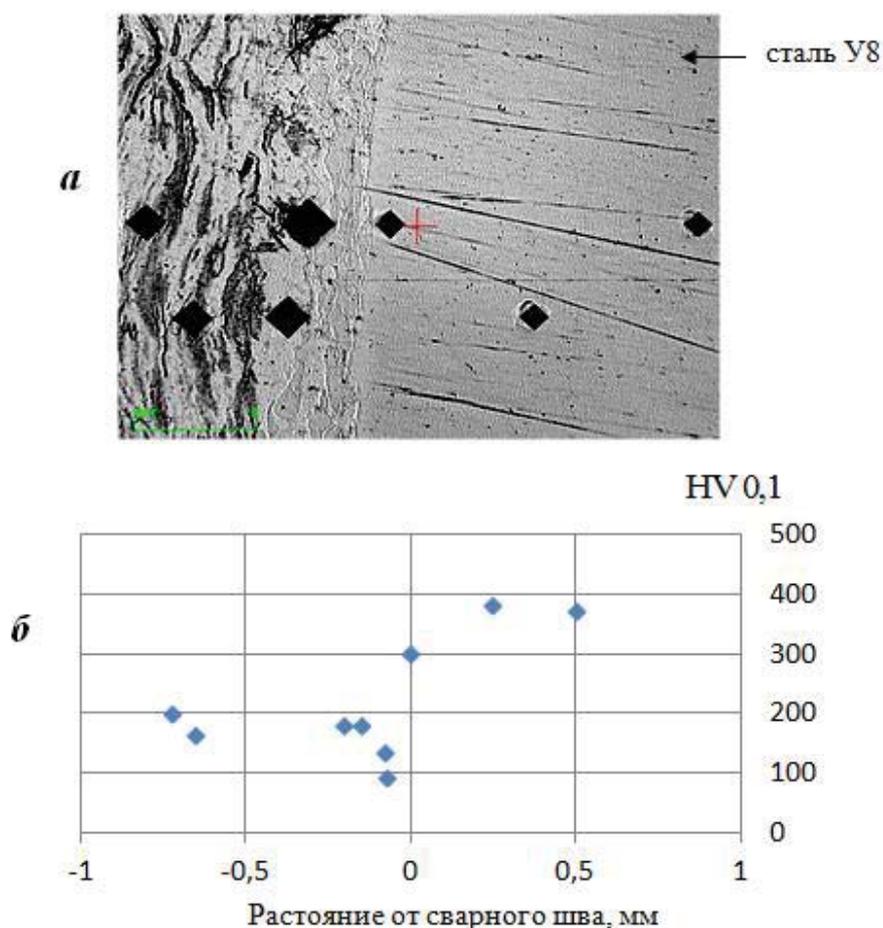


Рис 3. Распределение микротвердости в области сварного соединения стального хвостовика с наноструктурной медной связкой: а) структура сварного соединения с отпечатками индентора; б) график зависимости микротвердости (HV_{0,1}) от расстояния до сварного шва

Со стороны наноструктурированной медной связки наблюдается значительное снижение микротвердости сварного соединения. Если микротвердость наноструктурной связки составляет около 200 HV_{0,1}, то микротвердость в области сварного шва и зоны термического влияния со стороны медной наноструктурированной связки снижается до 100 HV_{0,1}. Причиной такого снижения прочности со стороны медной наноструктурной связки является более низкая температура её плавления по сравнению со сталью. Поэтому в процессе конденсаторной сварки в первую очередь

происходит плавление, в большей части, наноструктурированной медной связки, что сопровождается её разупрочнением за счет структурных изменений.

Задачу обеспечения достаточной прочности соединения алмазонасушей части головки с хвостовиком, можно будет разрешить, если в процессе формирования алмазонасушей головки запрессовывать по центру головки стальную цилиндрическую вставку с таким же диаметром, что и диаметр хвостовика в области соединения. Тогда хвостовик можно будет приваривать к стальной вставке алмазонасушей головки, что обеспечит более высокую прочность соединения.

Таким образом, полученные экспериментальные данные позволяют сделать следующие выводы:

1. Метод конденсаторной сварки и специальное прижимное устройство позволяют обеспечить сварное соединения алмазной головки и стального закаленного хвостовика с необходимой точностью.

2. Зона термического влияния со стороны стального хвостовика из стали У8 не превышает 0,25 мм, уменьшение микротвердости стали в зоне термического влияния не превышает 10 HRC.

3. Наименьшая микротвердость в области шва и, соответственно, прочность соединения наблюдается со стороны наноструктурированной медной связки, что требует дальнейших исследований для обеспечения эффективного применения метода конденсаторной сварки для решения поставленной задачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Смирнов В.М. Дисперсно-упрочненная связка на основе порошковой меди для алмазного инструмента / В.М. Смирнов, Д.А. Тимофеев, Е.П. Шалунов // Современные технологии в машиностроении и литейном производстве: матер. 2-ой междунар. науч.- практ. конф., Чебоксары, 11-14 окт. 2016 г. - Чебоксары: Чуваш. гос. ун-т, 2016. - С.317-320
2. Смирнов В.М. Высокоэффективная связка «оловянная бронза – механолегированные гранулы» для изготовления алмазных инструментов / В.М. Смирнов, И.С. Голушов, В.С. Григорьев // Современные технологии в машиностроении и литейном производстве: матер. III междунар. науч.- практ. конф., Чебоксары, 4-6 декабря 2016 г.– Чебоксары: Чуваш. гос. ун-т, 2017. - С.358-365.
3. Пат. на изобретение RUS № 2 644 225. Связка на основе меди для изготовления алмазного инструмента // В.М. Смирнов, Е.П. Шалунов, Д.А. Тимофеев; заявл. 24.04.2017; опубл. 08.02.2018/ Бюл. № 4.
4. Смирнов В.М. Получение и свойства антифрикционного композиционного материала оловянная бронза – механолегированные гранулы / В.М. Смирнов, Е.П. Шалунов // Современные технологии в машиностроении и литейном производстве: матер. III-ей Междунар. науч.- практ. конф., Чебоксары, 4-6 дек. 2017 г. – Чебоксары: Чуваш. гос. ун-т, 2017. – С. 350-357.
5. Смирнов В.М. Исследование композиционных материалов на основе оловянной бронзы с наполнителями из дисперсно-упрочненных гранул меди / В.М. Смирнов, Е.П. Шалунов, Д.А. Тимофеев // Проектирование и современные технологии в машиностроении, металлургии и их кадровое обеспечение: матер. III-ей Всеросс. науч. – практ. конф., Чебоксары, 20-21 апр. 2017 г. – Чебоксары: Чуваш. гос. ун-т, 2017. – С. 323-329.
6. Шалунов Е.П. Износостойкие подшипники скольжения из наноструктурных материалов для мощных электродвигателей / Е.П. Шалунов, В.М. Смирнов, И.П. Урянский // Вестник Чувашского университета. Технические науки. – 2015. - № 1. – С. 131-139.

7. Шалунов Е.П. Пути повышения надежности подшипников скольжения дизель-генераторных установок для аварийного энергоснабжения систем безопасности атомных электростанций / Е.П. Шалунов, В.М. Смирнов, А.В. Воронин // Вестник Чувашского университета. Технические науки. – 2017. - № 1. – С. 200-210.
8. Смирнов В.М. Дисперсно-упрочненные сплавы на основе меди системы Cu-Al-C-O / В.М. Смирнов, Н.Р. Смирнова, Е.П. Шалунов, А.Л. Матросов // Технические науки: сегодня и завтра: тез. докл. юбилейной итог. науч. конф. – Чебоксары: Чуваш. гос. ун-т, 1997. - С. 280-281.
9. Шалунов Е.П. Реакционное механическое легирование порошковой меди кислородом и углеродом / Е.П. Шалунов, В.М. Смирнов // Вестник Чувашского университета. – 2012. - № 3. – С. 252-259.
10. Шалунов Е.П. О механизмах формирования структуры и свойств композиционных материалов системы Cu-Al-C-O, получаемых на основе метода реакционного механического легирования / Е.П. Шалунов, В.М. Смирнов // Вестник Чувашского университета. - 2013. - № 3. - С. 314-322.
11. Dovydenkov V.A. Experience of production and use of precipitation strengthened copper based materials made by mechanical alloying / V.A. Dovydenkov, E.P. Shalunov // Powder Metallurgy. - 1998. - Т. 1. - С. 372.
12. Shalunov E. Development, production and application of DISCOM[®] copper nanocomposites as highly resource electrode and electric contact materials / E. Shalunov, A. Matrosoy, L. Chen: Proceedings of the Euro International Powder Metallurgy Congress and Exhibition, Euro PM 2008. – Mannheim: EPMA, 2008. – pp. 33-38.
13. ГОСТ 17122-85. Головки алмазные шлифовальные. Технические условия. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2000. – 10 с.
14. Люшинский А.В. Диффузионная сварка разнородных материалов / А. В. Люшинский. – М.: Академия, 2006. - 208 с.
15. Борисов М.А. Способ электроабразивной обработки труднодоступных поверхностей / М.А. Борисов, Д.А. Дементьев, В.А. Мишин. // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2017. № 4. – С. 15-16.
16. Аппарат точечной сварки – эффективное оборудование для монтажных работ. – Режим доступа: <http://tutmet.ru/apparat-tochechnoj-svarki-mashinasamodelnaja.html>
17. Портал о металлообработке, все о конденсаторной сварке. – Режим доступа: <https://wikimetall.ru/oborudovanie/kondensatornaya-svarka.html>

АВТОРЫ

Голюшов Иван Сергеевич – студент магистратуры машиностроительного факультета, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (ivan.golyshov.97@mail.ru).

Смирнов Валентин Михайлович - канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры технологии машиностроения, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (vms53@inbox.ru).

Цай Виктор Николаевич – зав. каф. технологии машиностроения, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары.

THE AUTHORS

Golyushov Ivan Sergeevich – Master student at the Faculty of Mechanical Engineering, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (ivan.golyshov.97@mail.ru).

Smirnov Valentin Mikhailovich –Dr.(phys.&math), associate professor of Mechanical Engineering Technology Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (vms53@inbox.ru).

Tsai Viktor Nikolaevich - Head of Mechanical Engineering Technology Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary.

ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТИ ЗУБЬЕВ ФРИКЦИОННОГО ДИСКА

LASER SURFACE TREATMENT OF A TEETH OF THE FRICTION DISK

**СМИРНОВ В.М.¹, ИВАНОВ А.В.²,
ИВАНОВСКИЙ А.А.¹, НИКИТИН Д.С.¹**

(¹Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия)

²АО «ЧЭАЗ», Чебоксары, Россия

³ПАО «ПРОМТРАКТОР», Чебоксары, Россия)

**SMIRNOV V. M.¹, IVANOV A. V.²,
IVANOVSKY A.A.¹, NIKITIN D.S.¹**

(¹Chuvash State University named after I.N. Ulyanov, Cheboksary, Russia)

²JSC "CHEAZ", Cheboksary, Russia

³PJSC «PROMTRAKTOR», Cheboksary, Russia)

Аннотация. Приведены результаты исследования возможности лазерного упрочнения поверхности зубьев металлокерамического фрикционного диска при помощи оптоволоконного лазера LDesigner F2. Показано, что наиболее оптимальным режимом лазерного упрочнения поверхности зубьев фрикционного диска является режим обработки лазером с оплавлением поверхности, который позволяет регулировать глубину и твердость зоны упрочнения.

Annotation. The results of the study of the possibility of laser hardening of the surface of the teeth of a metal-ceramic friction disc using fiber laser LDesigner F2 are presented. It is shown that the most optimal mode of laser hardening of the surface of the teeth of the friction disc is the laser treatment mode with melting of the surface, which allows you to adjust the depth and hardness of the hardening zone.

Ключевые слова: металлокерамический фрикционный диск, зубья, лазерное упрочнение, оптоволоконный лазер, режим обработки.

Key words: metal-ceramic friction disc, teeth, laser hardening, fiber laser, the processing mode.

В современных гусеничных и колесных машинах получили широкое применение гидромеханические трансмиссии с дисковыми фрикционными муфтами, основным элементом которых являются фрикционные диски [1-3]. Конструктивно многодисковая фрикционная муфта представляет собой пакет из ведущих и ведомых фрикционных дисков, которые чередуются между собой. Ведущие и ведомые фрикционные диски коробки передач имеют традиционную форму кольца с зубьями эвольвентного профиля по наружному или внутреннему диаметру.

Фрикционные диски являются одним из наиболее проблемных элементов современных транспортных машин и доля отказов по фрикционным дискам достигает до 30 % от всех отказов трансмиссий. По результатам анализа эксплуатации гусеничных машин основной причиной отказов фрикционных устройств является выход из строя фрикционных дисков, причем до 63 % фрикционных дисков выходит из строя из-за коробления и 17 % из-за износа. Для энергонасыщенных тракторов типа «Кировец» более 55 % отказов приходится на гидромеханическую передачу, при этом до 80 % вызвано выходом из строя фрикционов вследствие износа и коробления фрикционных дисков [4]. Увеличение мощности промышленных тракторов особенно сказывается на износостойкости шлицев (зубьев) фрикционных металлокерамических дисков, что по видимому, связано с недостаточной прочностью стальной основы.

Фрикционные диски промышленных тракторов изготавливаются в виде стальной несущей основы, в большинстве случаев из стали 65Г, на которую наносят с двух сторон сплошной, пористый порошковый фрикционный слой на основе меди методами порошковой металлургии [5]. На обеих поверхностях при этом формируют систему маслоотводящих каналов. Основным завершающим технологическим процессом нанесения металлокерамического слоя на стальную основу является спекание при температуре 600...800 °С. Спекание также может проводиться под давлением, что обеспечивает некоторое снижение температуры спекания и более прочное сцепление фрикционного слоя к стальной основе. Однако процесс спекания в любом случае при таких температурах снижает прочностные свойства основы, малолегируемой стали 65Г, и возникает необходимость последующего упрочнения зубьев фрикционных дисков, эксплуатируемых в узлах промышленных энергонасыщенных тракторов.

С целью сохранения износостойкости зубьев контртела – вала, твердость поверхности зубьев фрикционных дисков не должна превышать 30...36 HRC. Более высокая твердость нежелательна, так как в условиях знакопеременных ударных нагрузок, возникающих при переключении скоростей, может происходить усталостный износ поверхности, как зубьев фрикционного диска, так и вала. Как показывают расчеты, глубина упрочняемого слоя по профилю зуба должна составлять 0,8...1,6 мм.

Наиболее перспективным методом поверхностного упрочнения изделий, долговечность которых лимитируется износостойкостью и сопротивлением усталости, особенно если упрочнение другими методами затруднено вследствие сложности конфигурации детали и возможности ее значительного коробления при нагревании до закалочных температур, является термическое упрочнение лазером [6,7].

Целью настоящей работы являлось определение параметров лазерной обработки поверхностного слоя стали 65Г, а именно, скорости сканирования лазерным лучом, которая обеспечить упрочнения поверхностного слоя до вышеуказанных значений твердости и глубины.

Лазерную обработку поверхности пластины из стали 65Г толщиной 3 мм, вырезанной из металлокерамического фрикционного диска, производили с помощью оптоволоконного иттербиевого импульсного лазера LDesigner F2 в непрерывном режиме с оплавлением поверхности обработки. Обработку выбранной области стальной пластины размером 10x10 мм² осуществляли путем последовательного сканирования этой области лучом лазера (многопроходная обработка) с перекрытием зон сканирования. Максимальная средняя мощность лазерного излучения составляла 50 Вт. Размер пятна фокусировки лазерного пучка ~ 40 мкм, а перекрытие полос сканирования составляло 10мкм. Таким способом были обработаны лазерным лучом пластины из стали 65Г при разных скоростях сканирования: 10, 25, 50 и 100 мм/с.

Измерение микротвердости обработанной лазером области в зависимости от глубины слоя проводились на поперечных шлифах на микротвердомере Shimadzu HMV-G21ST при нагрузке 0,1кг. Результаты измерения микротвердости для наглядности автоматически переводились в единицы HRC.

Результаты измерения микротвердости упрочненного слоя стали 65Г в зависимости от глубины слоя представлены в виде графика на рисунке ниже. Если твердость необработанной лазером стальной пластины, основы фрикционного диска, составляет 13...15 HRC, то микротвердость обработанного лазером поверхностного слоя стали 65Г увеличивается по сравнению с необработанной в зависимости от скорости сканирования. Как видно из графика (см. рис.), чем выше скорость сканирования (перемещения) лазерного луча, тем выше твердость и меньше глубина упрочняемого лазером поверхностного слоя пластины из стали 65Г.

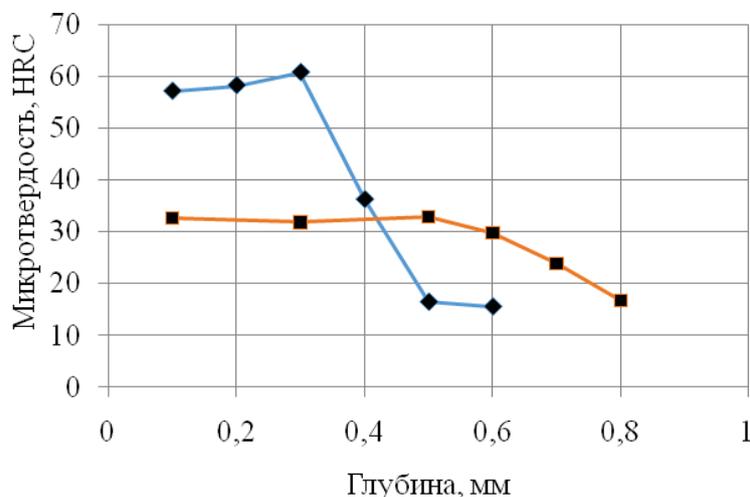


Рис. Графики зависимости микротвердости упрочняемого слоя стали 65Г от глубины при разных скоростях сканирования лазером: ■ - 10 мм/с; ◆ - 25 мм/с.

Заданная по техническим условиям поверхностная твердость 30...36 HRC шлицев фрикционных дисков из стали 65 Г может быть достигнута, как видно из графика, при скорости сканирования (обработки) лазером, равной 10 мм/с. Глубина упрочненного слоя достигает при этом до 0,8 мм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трансмиссии гусеничных и колесных машин /В.М. Труханов [и др.]; под ред. В.М. Труханова. – М.:Машиностроение, 2001. – 736 с.
2. Шарипов, В.М. Проектирование механических, гидромеханических и гидрообъемных передач тракторов /В.М. Шарипов. – М.: МГТУ «МАМИ», 2002. – 300 с.
3. Володько, О.С. Повышение ресурса гидродожимных муфт коробок передач с гидроуправлением: монография/ О.С.Володько, М.С. Приказчиков. – Кинель: РИЦ СГСХА, 2015. – 157 с.
4. Антонюк В.Е. Особенности конструкции и технологии изготовления фрикционных дисков гусеничных и колесных машин/ В.Е. Антонюк// Механика машин, механизмов и материалов. – 2016. № 3 (36) – С. 43-52.
5. Ильющенко, А.Ф. Спеченные металлокерамические фрикционные композиционные материалы и изделия/ А.Ф. Ильющенко, А.А. Дмитриевич, А.В. Лешок // Известия национальной академии наук Беларуси. – 2011, №2. – С.10-17.
6. Григорьянц А.Г. Технические процессы лазерной обработки./ А.Г. Григорьянц, И.Н. Щиганов, А.И. Мисюров. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 664 с.
7. Особенности образования структуры при лазерной обработке/ Н.А. Смирнова , А.И. Мисюров// Вестник МГТУ им.Н.Э.Баумана. – Серия "Машиностроение". 2012. – Спец.выпуск № 5 "Лазерные технологические процессы в машиностроении". – С. 115-130.

АВТОРЫ

Смирнов Валентин Михайлович - канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры технологии машиностроения, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (vms53@inbox.ru).

Иванов Алексей Валерьянович - главный технолог ИПК Реконт АО «ЧЭАЗ», Россия, Чебоксары.

Ивановский Александр Алексеевич - студент машиностроительного факультета, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары.

Никитин Денис Сергеевич - студент магистратуры машиностроительного факультета, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары.

THE AUTHORS

Smirnov Valentin Mikhailovich - Dr.(phys.&math), Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (vms53@inbox.ru).

Ivanov Alexey Valer'yanovich - Chief Technologist of IPK Rekонт JSC “ChEAZ”, Russia, Cheboksary.

Ivanovsky Alexander Alexeyevich - a student of engineering faculty, Chuvash State University, Russia, Cheboksary.

Nikitin Denis Sergeevich - master's degree student of engineering faculty, Chuvash State University, Russia, Cheboksary.

ОТСЛАИВАНИЕ ТОНКИХ ПОКРЫТИЙ

LAYING THIN COATINGS

ПЕТРУШИН С. И., ГУБАЙДУЛИНА Р. Х., СИРОДЖИДИНОВ Ш.А.
(ЮТИ ТПУ, г. Юрга, Россия)

PETRUSHIN S. I., GUBAIDULINA R. H., SIRODJIDINOV SH.A.
(UTI TPU, Yurga, Russia)

***Аннотация.** Представлена расчетная схема для определения термических остаточных напряжений на границе раздела износостойкого покрытия и основного материала. Получены условия отсутствия трещин при изготовлении композиционных материалов. Приведены формулы для расчета критических значений нагрузки на двухслойный композит при растяжении.*

***Abstract.** A design scheme for determining thermal residual stresses at the interface of the wear-resistant coating and the base material is presented. The conditions for the absence of cracks in the manufacture of composite materials are obtained. The formulas for calculating the critical values of the load on a two-layer composite under tension are given.*

***Ключевые слова:** износостойкие покрытия; прочность композита; термические остаточные напряжения; отслаивание поверхностного слоя; трещины между слоями.*

***Keywords:** wear resistant coatings, composite strength, thermal residual stresses, peeling of the surface layer; cracks between layers.*

Введение

Износостойкие покрытия, наносимые на поверхности инструментальных и конструкционных материалов, широко применяются в машиностроении с целью повышения долговечности трущегося поверхностного слоя при одновременном сохранении прочностных характеристик изделия. Так, например, ведущие инструментальные фирмы [1,2] наносят на поверхность режущих лезвий из быстрорежущих сталей и твердых сплавов различные комбинации из тонких слоев карбидов и нитридов тугоплавких материалов и окиси алюминия (TiC, TiN, Al₂O₃ и др.). При этом общая толщина покрытия не превышает 10–20 мкм. В случае превышения данной величины покрытие становится хрупким и может отслоиться как при воздействии рабочих нагрузок, так и в процессе нанесения слоев. Подобное явление может возникать также при хромировании, никелировании и ряде других процессов, где имеется четкая граница между слоями (отсутствует значительная диффузионная зона). При

отслаивании появляются межслойные трещины на границе раздела покрытия и основного материала (подложки). Рассмотрим общий подход к решению задачи трещиностойкости покрытия на основе анализа термических остаточных напряжений (ТОН), изложенного в работах [3,4].

Методика и теория расчета

Изделие с покрытой поверхностью представляет собой двухслойный композиционный материал (КМ), в котором верхний слой имеет исчезающе малую величину по сравнению с подложкой. Прочность многослойных КМ определяется не только пределами прочности материалов слоев, но и межслойной прочностью. Часто именно прочность границы между двумя смежными слоями является лимитирующей с точки зрения обеспечения сплошности композита. Обусловлено это тем, что изготовление КМ сопровождается нагревом изделия до значительной температуры (T_H). После спекания, наплавки, нанесения покрытия, послойного синтеза и т.п. происходит охлаждение композита до температуры окружающей среды (T_0). При этом в связи с различием в значениях коэффициента линейного расширения (КЛР) между двумя смежными слоями на их границе возникают ТОН. В случае превышения ими предела прочности материала какого-либо слоя возникают холодные межслойные трещины, и КМ становится непригодным для работы в данном изделии.

Когда величина ТОН меньше пределов прочности материалов слоев, монолитность КМ обеспечивается, однако их наличие может снизить прочностные характеристики изделия. Слой материала с большим КЛР при охлаждении стремится сократить свои размеры больше, чем слой с меньшим КЛР. В результате первый слой будет растянут вторым, а второй будет сжат первым. В материале с большим КЛР возникнут растягивающие ТОН, а в материале с меньшим КЛР – сжимающие ТОН [3].

Рассмотрим двухслойный КМ, синтезированный при разнице температур $\Delta T = T_H - T_0$ и нагруженный только ТОН (рис.1). Материал 1 имеет КЛР α_1 , модуль упругости E_1 и коэффициент Пуассона μ_1 , а материал 2 – α_2 , E_2 и μ_2 , причем $\alpha_1 > \alpha_2$. Так как толщина единичного слоя в композиционном изделии, как правило, значительно меньше его длины и ширины, то в нем при охлаждении будет реализовано плоское напряженное состояние, закон Гука для которого имеет вид [5]:

$$\text{для слоя 1 (растяжение)} - \sigma = \frac{\varepsilon E_1}{1 - \mu_1} ; (1)$$

$$\text{для слоя 2 (сжатие)} - \sigma = \varepsilon E_2 (1 - \mu_2) . (2)$$

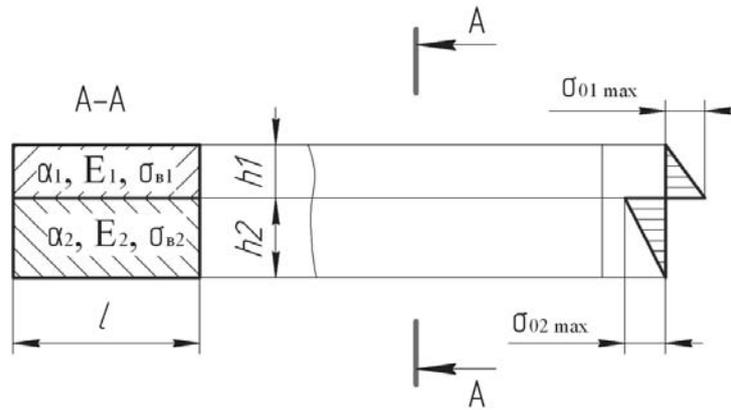


Рис.1. Схема двухслойного КМ, нагруженного только ТОН ($\alpha_1 > \alpha_2$).

При отсутствии внешних нагрузок максимальные значения ТОН σ_0^{\max} будут находиться на границе раздела слоев. На верхней поверхности слоя 1 и нижней поверхности слоя 2 ТОН равны нулю, а внутри слоев они распределяются линейно (см.рис.1). Если обозначить через $F_1 = bh_1$ площадь поперечного сечения слоя 1, а через $F_2 = bh_2$ – слоя 2, где b – ширина слоев, h_1 и h_2 – их толщины, то имеем условие равновесия сил:

$$\frac{1}{2} \sigma_{o1}^{\max} bh_1 = \frac{1}{2} \sigma_{o2}^{\max} bh_2.$$

Отсюда

$$\sigma_{o2}^{\max} = \sigma_{o1}^{\max} \frac{h_1}{h_2}. \quad (3)$$

Отсутствие термических трещин на межслойной границе КМ должно обеспечиваться условием равенства деформаций [5]. Деформация в слое 1 от термического охлаждения $\varepsilon = \alpha \Delta T$ направлена в противоположную сторону по отношению к остаточной деформации от ТОН, а в слое 2 эти деформации складываются. Отсюда с учетом выражений (1) и (2) имеем:

$$\alpha_1 \Delta T - \frac{\sigma_{o1}^{\max} (1 - \mu_1)}{E_1} = \alpha_2 \Delta T + \frac{\sigma_{o2}^{\max}}{E_2 (1 - \mu_2)}. \quad (4)$$

Для рассматриваемого случая ($\alpha_1 > \alpha_2$) большую опасность с точки зрения появления межслойных трещин в КМ представляет максимальное растягивающее напряжение в слое 1. Его величина определится из (4) и (3) следующим образом:

$$\sigma_{o1}^{\max} = \frac{\Delta T (\alpha_1 - \alpha_2)}{\frac{1 - \mu_1}{E_1} + \frac{1}{E_2 (1 - \mu_2)} \frac{h_1}{h_2}}. \quad (5)$$

Обозначим далее предел прочности на растяжение материала слоя 1 через σ_{b1} , а через $k > 1$ – коэффициент запаса, учитывающий отклонение фактических физико-механических характеристик материалов слоев КМ от расчетных ($k_{\min} \approx 1,5$). Тогда условие трещиностойкости двухслойного КМ (см.рис.1), остывшего на разницу температур ΔT и пока не нагруженного рабочими тепловыми и силовыми нагрузками, примет следующий вид:

$$\frac{\sigma_{b1}}{k} \geq \frac{\Delta T(\alpha_1 - \alpha_2)}{\frac{1 - \mu_1}{E_1} + \frac{1}{E_2(1 - \mu_2)} \frac{h_1}{h_2}}. \quad (6)$$

Важно отметить, что условие (6) позволяет перейти к первому этапу проектирования слоистых КМ, связанному с обеспечением их сплошности при изготовлении. Для этого выразим из (6) отношение толщин слоев:

$$\frac{h_1}{h_2} \geq \left[E_1 \Delta T(\alpha_1 - \alpha_2) k - (1 - \mu_1) \sigma_{b1} \right] \frac{E_2(1 - \mu_2)}{E_1 \sigma_{b1}}. \quad (7)$$

Неравенство (7) задает границу для отношения толщин слоев в двухслойном КМ, после перехода через которую в шве будут возникать межслойные термические трещины.

Если рассмотреть случай, когда $\alpha_1 < \alpha_2$, то для него аналогичным путем было получено следующее условие трещиностойкости:

$$\frac{h_1}{h_2} \leq \frac{\sigma_{b2} E_2}{\left[\Delta T(\alpha_2 - \alpha_1) k E_2 - (1 - \mu_2) \sigma_{b2} \right] E_1 (1 - \mu_1)}, \quad (8)$$

где σ_{b2} – предел прочности материала слоя 2.

При выводе неравенства (8) учитывалось то обстоятельство, что здесь после охлаждения слой 1 будет сжат, а слой 2 – растянут.

Полученные результаты

На основе изложенного рассмотрим проблему отслаивания покрытий. Выражения (7) и (8) задают условия отсутствия отслаивания покрытия от подложки при отсутствии внешних нагрузок на КМ. На рис.2 представлен пример расчета границ трещиностойкости по (9) и (10) для двухслойного КМ, состоящего из Стали 60 ($\sigma_b = 1500$ МПа; $\alpha = 11,5 \cdot 10^{-6} 1/^\circ C$; $\mu = 0,3$; $E = 218500$ МПа) и вольфрамокобальтового твердого сплава ВК8 ($\sigma_b = 1590$ МПа; $\alpha = 5,1 \cdot 10^{-6} 1/^\circ C$; $\mu = 0,23$; $E = 598400$ МПа). Из него следует, что отношение толщин слоев существенно зависит от рабочей температуры изготовления КМ. Термические трещины будут полностью отсутствовать при нагреве не выше $500^\circ C$, что соответствует, например, условиям низкотемпературной пайки мягкими припоями. При большей температуре процесса (пайка твердыми припоями, совместное спекание порошков, наплавка и др.) необходимо обязательно учитывать соотношение толщин слоев КМ. Как следует из рис.2, при $\alpha_1 > \alpha_2$ (покрытие сталью твердосплавной подложки) с увеличением рабочей температуры толщина верхнего слоя КМ должна возрастать прямо пропорционально, а при $\alpha_1 < \alpha_2$ (покрытие стали твердым сплавом) – уменьшаться по гиперболической зависимости.

Следует заметить, что после охлаждения двухслойного КМ как в первом, так и во втором случае в стальном слое будут образовываться ТОН растяжения, а в слое твердого сплава – ТОН сжатия, то есть мы имеем предварительно напряженный композиционный материал. В случае невыполнения условий (7) и (8) на границе раздела слоев возникают холодные трещины и данная композиция становится неработоспособной.

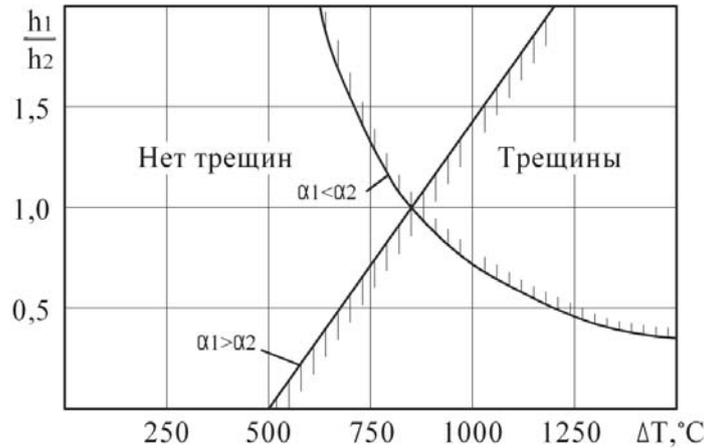


Рис. 2. Границы трещиностойкости для двухслойного КМ.

Рассмотрим двухслойный композит прямоугольного сечения шириной b , синтезированный при разнице температур $\Delta T = T_{\dot{\epsilon}} - T_0$ и нагруженный как растягивающей силой P , так и ТОН (рис.1). Верхний материал толщиной h_1 имеет КЛР α_1 , модуль упругости E_1 и коэффициент Пуассона μ_1 , а нижний материал толщиной $h_2 - \alpha_2$, E_2 и μ_2 , причем $\alpha_1 < \alpha_2$. В результате действия силы P в бруске возникнут напряжения растяжения

$$\sigma_{\delta} = \frac{P}{(h_1 + h_2) \cdot b} \quad (9)$$

Таким образом, формула (8) позволяет рассчитать максимальную величину ТОН на верхней границе нижнего слоя, а формула (9) – на нижней границе верхнего слоя двухслойного композита. Если к этим остаточным напряжениям добавить рабочие растягивающие нагрузки согласно (9), то суммарные напряжения на границе раздела слоев будут равны:

$$\text{– для слоя 1 – } \sigma_{\Sigma 1} = \frac{\Delta T(\alpha_2 - \alpha_1)}{\frac{1}{E_1(1-\mu_1)} - \frac{1-\mu_2}{E_2} \cdot \frac{h_1}{h_2}} + \frac{P}{(h_1 + h_2) \cdot b}; \quad (10)$$

$$\text{– для слоя 2 – } \sigma_{\Sigma 2} = \frac{\Delta T(\alpha_2 - \alpha_1)}{\frac{1-\mu_2}{E_2} - \frac{1}{E_1(1-\mu_1)} \cdot \frac{h_2}{h_1}} + \frac{P}{(h_1 + h_2) \cdot b}. \quad (11)$$

Обозначим далее предел прочности на растяжение материала слоя 2 через σ_{b2} , а через $k > 1$ – коэффициент запаса, учитывающий отклонение фактических физико-механических характеристик материалов слоев КМ от расчетных ($k_{\min} \approx 1,5$). Тогда условие трещиностойкости двухслойного КМ (см.рис.1), остывшего на разницу температур ΔT и нагруженного растягивающей силой P , примет следующий вид:

$$\frac{\sigma_{b2}}{k} \geq \frac{\Delta T(\alpha_2 - \alpha_1)}{\frac{1-\mu_2}{E_2} - \frac{1}{E_1(1-\mu_1)} \cdot \frac{h_2}{h_1}} + \frac{P}{(h_1 + h_2) \cdot b}. \quad (12)$$

Важно отметить, что условие (7) позволяет перейти к первому этапу проектирования слоистых КМ, связанному с обеспечением их сплошности при изготовлении. Так как для тонких покрытий соотношение толщин стремится к нулю, то из (7) имеем:

$$0 \geq [E_1 \Delta T (\alpha_1 - \alpha_2) k - (1 - \mu_1) \sigma_{b1}] \frac{E_2 (1 - \mu_2)}{E_1 \sigma_{b1}}. \quad (13)$$

Неравенство (13) задает границу для отношения толщин слоев в двухслойном КМ, после перехода через которую в шве будут возникать межслойные термические трещины.

ВЫВОДЫ

1. Дополнительные нагрузки, которые совместно с ТОН определяют условия возникновения трещины и отслаивания покрытия. При решении проблемы отслаивания тонких покрытий необходимо учитывать термические остаточные напряжения, возникающие на границе раздела при изготовлении композиционного материала.

2. При нагрузке внешними силами материал испытывает дополнительные нагрузки, которые совместно с ТОН определяют условия возникновения трещины и отслаивания покрытия.

ЛИТЕРАТУРА

1. coromant.ru@sandvik.com
2. www.secotools.com
3. Петрушин С. И., Сапрыкин А. А., Дуреев В. В. Проектирование и производство изделий из инструментальных композиционных материалов.– Томск: Изд-во ТПУ, 2014.–205 с.
4. Petrushin S. I. Calculation of residual stresses in multilayer composite materials. // Applied mechanics and materials ISSN: 1660-9336/ – 2013. – №1. – С. 95–100.
5. Машиностроение. Энциклопедический справочник. Т. 1, Кн. 2. Инженерные расчеты в машиностроении.– М.: Машгиз, 1948.– 447с.
6. Баженов С. Л., Берлин А.А., Кульков А.А., Ошмян В.Г. Полимерные композиционные материалы.–Долгопрудный: Изд. «Интеллект», 2010.– 352 с.
7. Баничук Н. В. Оптимизация анизотропных свойств деформируемых сред в плоских задачах теории упругости.// Известия АН СССР. МТТ,1979.– №1.– С.71–77.
8. Баничук Н. В. Оптимизация формы упругих тел.– М.: Наука, 1980.–145 с.
9. Баничук Н. В., Кобелев В.В., Рикардс Р.Б. Оптимизация элементов конструкций из композитных материалов. – М.: Машиностроение, 1988.– 294 с.
10. Болотин В.В., Новиков Ю. Н. Механика многослойных конструкций. – М.: Машиностроение, 1980. – 375 с.
11. Кабалдин Ю.Г. Принципы конструирования композиционных и инструментальных материалов с повышенной работоспособностью.– Владивосток.: Изд. института машиноведения и металлургии, 1990. –58 с.
12. Кристенсен Р. Введение в механику композитов. – М.: Мир, 1982. – 334 с.
13. Ломакин В. А. Теория упругости неоднородных тел. – М.: Изд. Моск. университета, 1976. – 368 с.
14. Андреева А.В. Основы физикохимии и технологии композитов: учеб. Пособие для вузов. – М.: ИПРЖР, 2001. – 192 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Петрушин Сергей Иванович, д-р техн. наук, профессор кафедры технологии машиностроения Юргинского технологического института (филиала) Национального исследовательского Томского политехнического университета. 650000, г.Юрга, Кемеровской области, ул. Ленинградская 26, р.т. 8-(384-51)-777-61. E-mail: psi@tpu.ru.

Губайдулина Рауза Хамидовна, канд. техн. наук, доцент кафедры технологии машиностроения Юргинского технологического института (филиала) Национального исследовательского Томского политехнического университета. 650000, г.Юрга, Кемеровской области, ул. Ленинградская 26, р.т. 8-(384-51)-777-61. E-mail: victory_28@mail.ru.

Сиродждинов Шукрулло Абдувалиевич, студент гр. 10А51 Юргинского технологического института (филиала) Национального исследовательского Томского политехнического университета. 650000, г.Юрга, Кемеровской области, ул. Ленинградская 26, р.т. 8-(384-51)-777-61, E-mail: sas52@tpul.ru.

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Petrushin Sergey Ivanovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Russia, Yurga Institute of Technology of National Research Tomsk Polytechnic University, Kemerovo Region, Yurga, 26, Leningradskaya, tel. (384-51)-777-61, E-mail: psi@tpu.ru.

Gubaidulina Rausa Chamidovna, Candidate of Technical Sciences, assistant professor, Russia Yurga Institute of Technology of National Research Tomsk Polytechnic University, Kemerovo Region, Yurga, 26, Leningradskaya, tel.(384-51)-777-61. E-mail: victory_28@mail.ru

Sirodjidinov Shukrullo Abduvaliyevich, student, Russia, Yurga Institute of Technology of National Research Tomsk Polytechnic, Kemerovo Region, Yurga, 26, Leningradskaya, tel. (384-51)-777-61. E-mail: sas52@tpu.ru.

**ОСНОВНАЯ ФОРМУЛА НАУЧНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ЭТАПОВ
ЭКСПЛУАТАЦИИ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ**

**THE BASIC FORMULA OF THE SCIENTIFIC ORGANIZATION OF
OPERATIONAL PHASES OF ENGINEERING PRODUCTS**

ГУБАЙДУЛИНА Р. Х., ПЕТРУШИН С. И., АНИСИМОВ А.С.
(ЮТИ ТПУ, г. Юрга, Россия)

GUBAIDULINA R. H., PETRUSHIN S. I., ANISIMOV A.S.
(UTI TPU, Yurga, Russia)

***Аннотация.** Предложена формула для определения относительных приведенных затрат при эксплуатации и производстве изделий машиностроения в зависимости от времени. Установлено, что для минимизации совместных издержек потребителя и производителя изделие должно эксплуатироваться в течение экономически обоснованного срока службы*

***Abstract.** A formula for determining the relative reduced costs in the operation and production of engineering products depending on time is proposed. It has been established that in order to minimize the joint costs of the consumer and the manufacturer, the product must be operated for an economically reasonable service life.*

***Ключевые слова:** приведенные затраты; цена изделия; эксплуатация машины; организация производства.*

***Keywords:** reduced costs; product price; machine operation; organization of production.*

Экономические проблемы последних лет требуют поиска эффективных направлений развития промышленного производства и, прежде всего, машиностроения [1,2]. Сейчас появился такой комплексный показатель времени существования изделий машиностроения, как «жизненный цикл изделия» (ЖЦИ), который состоит из этапов: проектирование, производство, эксплуатация и утилизация изделий [3].

Одним из основных этапов жизненного цикла изделий машиностроения является период ее эксплуатации [4]. Именно его анализ позволяет найти ключ для построения оптимальной экономики на основе экономически обоснованного срока службы изделия [5]. Критерием оптимальности этапа эксплуатации должна служить справедливая цена изделия, устанавливаемая путем минимизации суммарных затрат производителя и потребителя. Обеспечение этого условия приводит к исключению из рыночной экономики ситуаций, связанных как с «диктатом производителя», так и с «диктатом потребителя» [6].

На основе известной формулы приведенных затрат $Z = C + EK$, получена формула для расчёта текущих приведенных затрат для этапа эксплуатации изделий машиностроения в условных единицах стоимости (у.е.с.), следующего вида [7]:

$$Z_{\tau} = C_{\Pi} \cdot \tau + \frac{Ц}{\tau + 1}, \frac{у.е.с.}{у.е.в.} \quad (1)$$

где C_{Π} – коэффициент пропорциональности, имеющий размерность $у.е.с./у.е.в.^2$

$Ц$ – цена изделия, у.е.с. (условные единицы стоимости),

τ – время эксплуатации, у.е.в. (условные единицы времени),

В знаменатель второго слагаемого добавлена единица для того, чтобы в начальный момент времени эксплуатации ($\tau = 0$) приведенные затраты были равны цене приобретения изделия $Ц$.

Отметим, что выражение (1) определяет не абсолютные, а относительные (текущие) приведенные затраты на эксплуатацию изделия машиностроения. На рис.1 приведены результаты расчетов этих затрат для различных значений цены изделия при постоянной величине $C_{\Pi} = 200 у.е.с./у.е.в.^2$.

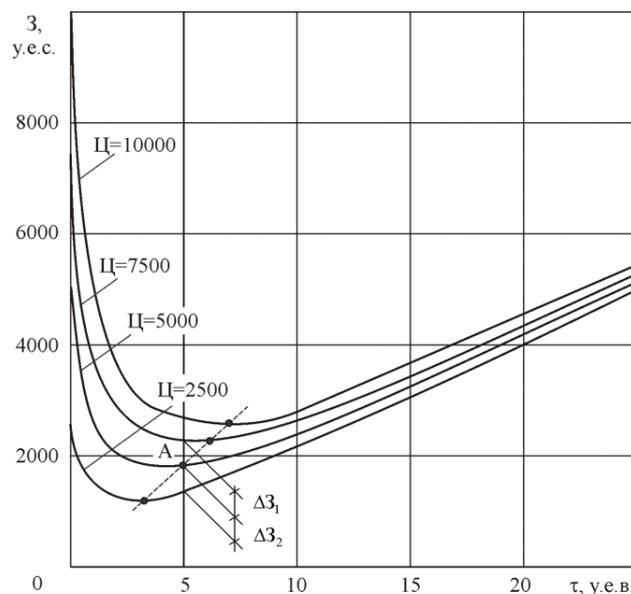


Рис.1. Зависимости текущих приведенных затрат на эксплуатацию изделия при различных ценах его реализации: $C_{\Pi} = 200 у.е.с./у.е.в.^2$

Из рис.1 следует, что функция (1) имеет глобальный минимум текущих приведенных затрат потребителя при определенном сроке эксплуатации изделия. Эксплуатировать машину далее становится нерентабельным, и она подлежит замене. Обозначим этот срок службы через T_{τ} и назовем его «экономически обоснованным сроком службы» (ЭОСС), под которым понимается такой период времени эксплуатации изделия, по истечении которого удельные приведенные затраты достигают своего минимального значения.

Значение ЭОСС получим из формулы (1), взяв производную по времени эксплуатации и приравняв ее к нулю:

$$T_{\text{Э}} = \sqrt{C/C_{\text{п}}}, \text{ у.е.в.} \quad (2)$$

Из (2) следует, что величина ЭОСС зависит не от абсолютных значений первоначальных затрат на приобретение изделия и не от уровня удельных текущих затрат на его эксплуатацию $C_{\text{п}}$, а от их соотношения. Чем выше отношение цены изделия к текущим затратам, тем больше должен быть оптимальный срок его эксплуатации, и наоборот. С уменьшением цены изделия уменьшается и его ЭОСС (см. штриховую линию на рис.1), то есть более дешевое изделие должно иметь меньший оптимальный срок эксплуатации. Кроме того, между ценой данного изделия и его ЭОСС существует жесткая функциональная связь. Она проявляется следующим образом: для известных величин и цена изделия не должна назначаться произвольно, а должна иметь оптимальное значение (справедливая цена) [7].

Результаты расчетов по формуле (1) для различных коэффициентов при постоянной величине цены изделия $C=10000$ у.е.с. приведены на рис.2.

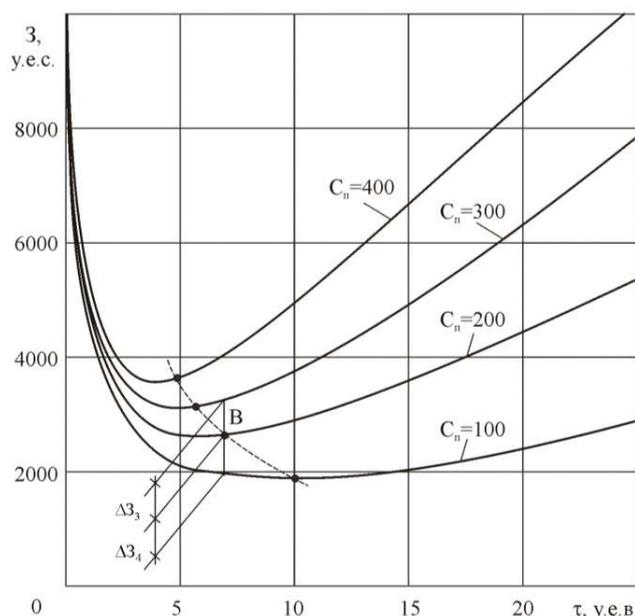


Рис. 2. Зависимости текущих приведенных затрат на эксплуатацию изделия при различной себестоимости эксплуатации: $C=10000$ у.е.с.

Здесь также, как и на рис.1, минимумам удельных приведенных затрат на эксплуатацию соответствуют оптимальные сроки службы изделия. С уменьшением удельных текущих затрат значение ЭОСС увеличивается и наоборот, оно уменьшается с увеличением этих затрат (пунктир на рис. 2).

Таким образом, приведенные на рис.1 и 2 зависимости свидетельствуют о существовании оптимального сочетания между сроком службы изделия, ценой его реализации или приобретения и издержками на его эксплуатацию. В этом случае экономические интересы потребителя и производителя совпадают.

На основе проведенного анализа рисунков 1 и 2 можно сформулировать следующий принцип оптимальной эксплуатации любого изделия машиностроения[9]: для минимизации совместных издержек потребителя и производителя изделие конкретной конструкции и качества должно эксплуатироваться в течение экономически обоснованного срока его службы, значение которого обусловлено величинами первоначальных затрат на приобретение и текущих затрат на эксплуатацию данного изделия [10].

Следует также отметить, что если время эксплуатации изделия совпадет с ЭОСС, машина подлежит замене на новую. В работах [11,12,13] рассмотрены варианты замены изделий, когда новая машина отличается от заменяемой как по цене, так и по технико-экономическим характеристикам. При этом основным такой замены является экономический выигрыш потребителя

ВЫВОДЫ

1. Предложена формула для определения относительных приведенных затрат при эксплуатации и производстве изделий машиностроения в зависимости от времени существования этих этапов жизненного цикла. Показано, что эта зависимость имеет минимум при определенном экономически обоснованном сроке службы как отдельной машины, так и для производственной базы.

2. Критерием оптимальности этапа эксплуатации должна служить справедливая цена изделия, устанавливаемая путем минимизации суммарных затрат производителя и потребителя. Обеспечение этого условия приводит к исключению из рыночной экономики ситуаций, связанных как с «диктатом производителя», так и с «диктатом потребителя».

ЛИТЕРАТУРА

1. Шаумян Г.А. Комплексная автоматизация производственных процессов. – М.: Машиностроение, 1973. – 640 с.
2. Технология машиностроения: В 2-х т. Т. 1. Основы технологии машиностроения. / Под ред. А.М. Дальского – М.: Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 1997. – 564 с.
3. Хилл П. Наука и искусство проектирования. Пер. с англ.– Изд-во МИР, 1973.– 262с.
4. Петрушин С. И., Губайдулина Р. Х. Организация жизненного цикла изделий машиностроения.–Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 200 с.
5. Амеликин С. А., Логунова Н. Ю., Прокопьев Е. А. Определение оптимального срока использования оборудования//Автоматизация и современные технологии. 2006. № 10. С. 3–7.
6. Свифт К.Г., Буккер Дж. Д. Выбор процесса. От разработки до производства.– М.: Изд.дом «Технологии», 2006.– 400с.
7. Расчеты экономической эффективности новой техники: Справочник / Под ред. К. М. Великанова. Л.: Машиностроение, 1990. – 448 с.
8. Понтягин Л.С., Болтянский В.К., Мищенко Е.Ф.– Математическая теория оптимальных процессов.– М.: Наука, 1069.– 366с.
9. Дятчин Н.И. История и закономерности развития техники, функционирования и развития технических объектов и систем. В 2-х т.Т.2.– Барнаул: Изд-во АлтТГУ, 2010.–221с.
10. Петрушин С.И. Выбор оптимальной технологии изготовления изделий машиностроения.– Томск: Издательство ТПУ, 2013.–182 с.
11. Петрушин С. И., Губайдулина Р. Х. Оптимизация перехода на производство новой продукции машиностроения. //Вестник машиностроения.– 2011, №12. – С. 80–83.

12. Petrushin S. I., Gubaydulina R. X., Grubiy S. V. Optimization of Products Life Cycle // Applied Mechanics and Materials. – 2015.– Vol. 770. – p. 662–669.
13. Petrushin S. I., Gubaydulina R. X. New Principles of Mechanical Engineering Organization // 7th International Forum on Strategic Technology (IFOST – 2012): Proceedings: in 2 vol., Tomsk, September 18 – 21, 2012. – Tomsk: TPU Press, 2012. – Vol. 2 – p. 129 – 132.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Губайдулина Рауза Хамидовна, канд. техн. наук, доцент кафедры технологии машиностроения Юргинского технологического института (филиала) Национального исследовательского Томского политехнического университета . 650000, г.Юрга, Кемеровской области, ул. Ленинградская 26, р.т. 8-(384-51)-777-61. E-mail: victory_28@mail.ru.

Петрушин Сергей Иванович, д-р техн. наук, профессор кафедры технологии машиностроения Юргинского технологического института (филиала) Национального исследовательского Томского политехнического университета. 650000, г.Юрга, Кемеровской области, ул. Ленинградская 26, р.т. 8-(384-51)-777-61. E-mail: psi@tpu.ru.

Анисимов Алексей Сергеевич, студент гр. 10А51 Юргинского технологического института (филиала) Национального исследовательского Томского политехнического университета. 650000, г.Юрга, Кемеровской области, ул. Ленинградская 26, р.т. 8-(384-51)-777-61. E-mail: asa36@tpu.ru.

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Gubaidulina Rausa Chamidovna, Candidate of Technical Sciences, assistant professor, Russia Yurga Institute of Technology of National Research Tomsk Polytechnic University, Kemerovo Region, Yurga, 26, Leningradskaya, tel.(384-51)-777-61. E-mail: victory_28@mail.ru.

Petrushin Sergey Ivanovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Russia, Yurga Institute of Technology of National Research Tomsk Polytechnic University, Kemerovo Region, Yurga, 26, Leningradskaya, tel.(384-51)-777-61, E-mail: psi@tpu.ru.

Anisimov Aleksey Sergeevich, student, Russia, Yurga Institute of Technology of National Research Tomsk Polytechnic, Kemerovo Region, Yurga, 26, Leningradskaya, tel.(384-51)-777-61. E-mail: asa36@tpu.ru.

РАЗРАБОТКА МЕНЮ УСТРОЙСТВА ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОТОКОМ ЖИДКОСТИ

DEVELOP A MENU OF THE DEVICE FOR AUTOMATIC CONTROL OF FLUID FLOW

БОРИСОВ М.А., МИШИН С.А.

(Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова,
г. Чебоксары, Российская Федерация,
Казанский (приволжский) федеральный университет,
г. Казань, Российская Федерация)

BORISOV M. A., MISHIN S. A.

(Chuvash state University named I. N. Ulyanov, Cheboksary, Russian Federation,
Kazan (Volga region) Federal University, Kazan, Russian Federation)

Аннотация. Представлены меню устройства для автоматического управления потоком жидкости и фрагмент управляющей программы.

Abstract. The menu of the device for automatic control of fluid flow and a fragment of the control program are presented.

Ключевые слова: программируемое устройство, автоматическое управление, микроконтроллер, поток жидкости, меню контроллера, управляющая программа.

Keywords: programmable device, automatic control, microcontroller, fluid flow, controller menu, control program.

Для автоматического управления потоком жидкости, подаваемой к потребителям, разработан ряд принципиальных схем программируемых устройств [1-3]. Эти устройства могут применяться, в том числе, для автоматического управления процессом подачи электролитов и СОЖ в зону обработки [4-8]. Поэтому разработка меню программируемого устройства, удобного для пользователя является актуальной задачей.

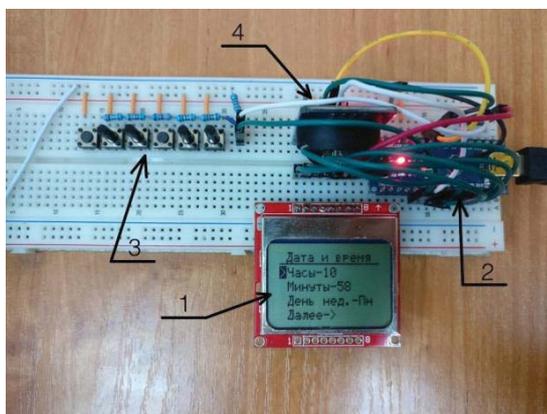


Рисунок 1. Фотография макетной платы устройства

Для составления меню программируемого устройства нами была собрана макетная плата. На рисунке 1 представлена фотография макетной платы устройства.

На макетной плате размещены следующие компоненты:

- 1-экран для вывода информации
- 2-микроконтроллер – Arduino Nano
- 3-блок аналоговой клавиатуры
- 4-модуль часов реального времени



Рисунок 2. Главное меню программируемого устройства

На рисунке 2 представлено главное меню программируемого устройства. Главное меню включает следующие пункты:

- выбор программы
- параметры программы
- настройки

На рисунке 3 представлено меню настройки программируемого устройства



Рисунок 3. Меню настройки программируемого устройства

Меню настройки включает следующие пункты:

- экран
- дата и время
- режим сна

На рисунке 4 представлен пример настройки подсветки экрана.



Рисунок 4. Пример настройки подсветки экрана

На рисунке 5 представлен пример настройки текущей даты.



Рисунок 5. Пример настройки текущей даты

На рисунке 6 представлен пример настройки текущего времени.



Рисунок 6. Пример настройки текущего времени

Ниже представлены фрагменты программ:

- фрагмент программы, структура меню

```

static const uint8_t menuStruct[FILENUMB*FILEREW] PROGMEM = {
    0, T_SCREENSAVER, 0, 0, 0, //
    1, T_FOLDER, 0, 3, 2, // Главное меню(root)
      2, T_FOLDER, 1, 3, 5, // Выбор прог
        5, T_FOLDER, 0, 1, 0, // 1-1
        6, T_FOLDER, 0, 1, 0, // 1-2
        7, T_FOLDER, 0, 1, 0, // 1-3
    3, T_APP, 1, 1, 0, // Парам. прог
    4, T_FOLDER, 1, 3, 11, // Настройки
      11, T_FOLDER, 4, 2, 14, // Экран
        14, T_CONF, 11, 2, 1, // Подсветка
        15, T_CONF, 11, 3, 2, // Контраст
      12, T_FOLDER, 4, 4, 16, // Дата и время
        16, T_CONF, 12, 4, 1, // Часы-
        17, T_CONF, 12, 5, 2, // Минуты-
        18, T_CONF, 12, 6, 3, // День нед.-
        19, T_FOLDER, 12, 3, 20, // Далее->
          20, T_CONF, 19, 7, 1, // Число-
          21, T_CONF, 19, 8, 2, // Месяц-
          22, T_CONF, 19, 9, 3, // Год-
    13, T_CONF, 4, 1, 3, // Сон-
};

```

- фрагмент программы, функция навигации по меню

```

void Menu::navigateMenu(uint8_t button) {
    if (button != 0) {
        if ((button == 5) && (fileSys.type != T_CONF)) {
            idx = fileSys.mode2 + lastItemMenu - 1;
            if (idx > FILENUMB)
                idx = FILENUMB;
            itemMenu = 1;
            valueConfig = 0;
            readMenuStruct(idx);
            lastItemMenu = displayMenu(button);
        } else if ((button == 6) && (appChangeParam == false)){
            idx = fileSys.parent;
            if (idx < 1)
                idx = 1;
            if (fileSys.type == T_CONF)
                itemMenu = fileSys.mode2;
            else
                itemMenu = 1;
            valueConfig = 0;
            readMenuStruct(idx);
            lastItemMenu = displayMenu(button);
        }
        lastItemMenu = displayMenu(button);
        while (!(getButtonState() == 0));
    }
}

```

Вывод: Разработанное меню устройства для автоматического управления потоком жидкости позволяет устанавливать пользователем необходимые настройки работы устройства. параметры программ и их запуск.

ЛИТЕРАТУРА

1. Борисов М.А., Мишин С.А., Сидельников А.М. Разработка конструкции устройства для автоматического управления потоком жидкости, подаваемого к нескольким потребителям. В сборнике: Современные технологии в машиностроении и литейном производстве материалы III Международной научно-практической конференции. 2017. С. 201-206.
2. Борисов М.А., Григорьев В.С., Мишин В.А. Разработка конструкции и алгоритма функционирования программируемого устройства для автоматического управления процессом выборочной доставки жидкости. В сборнике «Современные технологии в машиностроении и литейном производстве». Материалы II-ой международной научно-практической конференции. Чебоксары; Чуваш. гос. ун-т, 2016. с. 243-246
3. Борисов М.А., Мишин В.А. Разработка конструкции программируемого устройства для автоматического управления согласованной работой серводвигателя и насоса. В сборнике: «Проектирование и перспективные технологии в машиностроении и металлургии». Материалы II-ой Республиканской научно-практической конференции. Министерство образования и науки РФ; ФГБОУ ВПО "Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова". 2016. С. 104-110.
4. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Архипов П.В., Попов В.Ю. Исследование влияния электрических режимов на качественные и экономические показатели комбинированной электроалмазной обработки твердосплавных материалов // Научные технологии в машиностроении. 2015. № 3 (45). С. 22-29
5. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Скиба В.Ю., Гартфельдер В.А., Секлетина Л.С. Повышение эффективности алмазного инструмента на металлической связке при шлифовании высокопрочных материалов. Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2017. № 3 (76). С. 17-27.
6. Смирнов В.М., Тимофеев Д.А., Шалунов Е.П., Илларионов И.Е. Свойства и структура связки на основе механолегированных гранул меди для изготовления алмазного инструмента. В сборнике: Проектирование и перспективные технологии в машиностроении и металлургии. Материалы II-ой Республиканской научно-практической конференции. Министерство образования и науки РФ; ФГБОУ ВПО "Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова". 2016. С. 183-188.
7. Зорина М.М., Терентьев Е.А., Цай В.Н. Эффективность применения метода электрохимического шлифования для обработки безвольфрамовых твердых сплавов. Сборник трудов конференции "Мехатроника, автоматика и робототехника", г. Новокузнецк, 2017
8. Зорина М.М., Цай В.Н., Терентьев Е.А. Эффективность применения метода «двойного травления» для обработки безвольфрамовых твердых сплавов. Journal of Advanced Research in Technical Science. № 4. Норт-Чарлстон США. 2017.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Борисов Михаил Анатольевич, 428000, Чувашская Республика, г. Чебоксары, ул. Спиридона Михайлова, дом 3, ЧГУ имени И.Н.Ульянова, доцент кафедры «Технология машиностроения», +79370100536, borisovmgou@mail.ru

Мишин Сергей Александрович, 420000, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Кремлёвская, дом 35, корпус 1, Казанский (приволжский) федеральный университет, аспирант, +79061331278, supers.ya@yandex.ru

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Borisov, Michael A., 428000, Chuvash Republic, Cheboksary, St Spyridon Mikhailov, 3, chgu of a name of I. N. Ulyanov, associate Professor of the Department "Technology of mechanical engineering", +79370100536, borisovmgou@mail.ru

Mishin Sergey, 420000, Tatarstan Republic, Kazan, St Kremlin, 35/1, Kazan (Volga region) Federal University, PhD student, +79061331278, supers.ya@yandex.ru

**РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПАЛЬНОЙ СХЕМЫ ПРОГРАММИРУЕМОГО
УСТРОЙСТВА ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ
ТОКОВЫМИ РЕЖИМАМИ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ЛИТЫХ
ЗАГОТОВОК ПОД ПОКРЫТИЕ КЕРАМИКОЙ**

**DEVELOPMENT OF THE CONCEPT OF THE PROGRAMMABLE DEVICE
FOR AUTOMATIC CONTROL OF CURRENT MODES OF TREATMENT
PROCESS OF CAST BILLETS UNDER THE CERAMIC COATING**

БОРИСОВ М.А., СОФРОНОВ Д.А.

*(Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова,
г. Чебоксары, Российская Федерация)*

BORISOV M. A., SOFRONOV D. A.

*(Chuvash state University named I. N. Ulyanov,
Cheboksary, Russian Federation)*

***Аннотация.** Представлена принципиальная схема программируемого устройства, предназначенного для автоматического управления токовыми режимами процесса обработки литых заготовок под покрытие керамикой. Приведены описание конструкции и порядок работы. Собрана макетная плата устройства. Проведено её тестирование.*

***Abstract.** A schematic diagram of a programmable device designed for automatic control of current modes of the process of processing of cast billets for ceramic coating is presented. The description of the design and operation procedure are given. Assembled breadboard device. It was tested.*

***Ключевые слова:** программируемое устройство, автоматическое управление, токопроводящий инструмент, керамическое покрытие, электрохимическая обработка*

***Keywords:** Programmable device, automatic control, conductive tool, ceramic coating, electrochemical processing*

В настоящее время в зубопротезных лабораториях стоматологических клиник для обработки литых металлических каркасов зубных протезов, изготовленных из никель-хромового или кобальт-хромового сплава, применяют бормашины стоматологические. В качестве инструмента используют твердосплавные фрезы, электрокорундовые головки или боры с алмазными головками.

Недостатки твердосплавных фрез состоят в том, что при ручной обработке с использованием бормашины они могут резко врезаться в металл и срезать тонкие детали протеза, что приводит к неисправимому браку и оставляют на поверхности множество крупных задиров и ступенек, которые

впоследствии приходится дополнительно убирать абразивными электрокорундовыми головками, что увеличивает трудоемкость обработки.

Боры с алмазными головками лишены указанных недостатков. Но их область применения ограничена. Они не могут применяться при шлифовании металлических каркасов зубных протезов под покрытие керамикой. Алмазные головки оставляют мелкие насечки на обработанной поверхности, в которых в процессе обжига керамики могут скапливаться и застаиваться газы. Это приводит к возникновению дефектов керамического покрытия и его отслоениям [1].

Для уменьшения шероховатости поверхности и увеличения производительности обработки можно применить электрохимическое шлифование алмазным инструментом с одновременной непрерывной правкой шлифовального круга [2-6]. Если результат не удовлетворит поставленным требованиям, то после электрохимического шлифования алмазными головками можно дополнительно провести процесс электрохимического полирования. Однако эти процессы выполняются с использованием разного оборудования. Электрохимическое шлифование может осуществляться с использованием модернизированных бормашин стоматологических, а электрохимическое полирование с использованием аппарата для электрохимической полировки АЭП 2.2 [10]. Указанное оборудование оснащено автономными устройствами управления.

Цель работы состоит в разработке конструкции программируемого устройства, позволяющего автоматически управлять токовыми режимами как процесса электрохимического шлифования алмазными головками, так и процесса их электрохимического полирования гладкими электродами с применением только модернизированных бормашин стоматологических.

Для достижения этой цели в качестве аналогов были использованы некоторые решения, примененные в программируемых устройствах для управления токовыми режимами процесса электрохимического шлифования и управления потоками жидкости [7-9]. В частности, они имеют в своем составе блок управления, выполненный на базе микроконтроллера ATmega328. Он автоматически управляет по заданной пользователем программе процессом включения и выключения исполнительных механизмов.

На рисунке 1 показана принципиальная схема разработанного нами устройства. Устройство содержит источник постоянного тока 1 и программируемый от компьютера микроконтроллер, установленный в блок управления 2. Он используется для регулирования длительности и частоты импульсов токов и управляет четырьмя твердотельными реле 7, 8, 9 и 10, установленных в блок коммутации токов 3. Блок коммутации токов 3 имеет два выхода и предназначен для подачи в электрическую цепь «обрабатываемое изделие – электролит – токопроводящий инструмент» поочередно токов прямой и обратной полярности или только тока прямой или обратной полярности. Входы двух твердотельных реле 9 и 10 связаны с положительным полюсом источника тока 1, а входы двух других твердотельных реле 7 и 8 связаны с отрицательным полюсом источника тока 1. При этом выходы твердотельных реле, связанных с одноименными полюсами источника тока соединены с

разными выходами блока коммутации токов 3. В шпиндель 4 установлен токопроводящий инструмент 5. В зону контакта токопроводящего инструмента 5 и изделия 6 подается электролит.

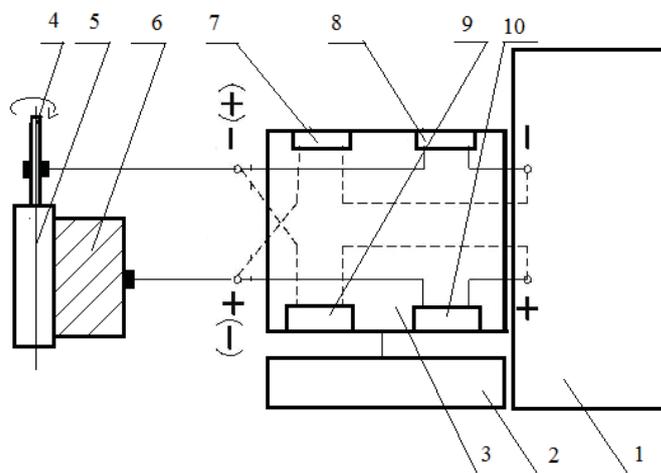


Рисунок 1. Принципиальная схема устройства

Устройство работает следующим образом. Управляющий сигнал поступает с блока управления 2 на твёрдотельные реле 8 и 10, установленные в блоке коммутации токов 3. Силовые цепи реле замыкаются. В результате этого деталь 6 соединяется с положительным полюсом источника тока 1, а токопроводящий инструмент 5, выполненный в виде алмазной головки соединяется с отрицательным полюсом источника тока 1. Происходит электрохимическое воздействие на деталь 6, в результате которого разрушается поверхностный слой детали, удаляемый алмазной головкой 5. Затем управляющие сигналы поступают с блока управления 2 на твёрдотельные реле 8 и 10, размыкая их силовые цепи и на твёрдотельные реле 7 и 9, замыкая их силовые цепи. В результате этого деталь 6 соединяется с отрицательным полюсом источника тока 1, а алмазная головка 5 соединяется с положительным полюсом источника тока 1. Происходит электрохимическое воздействие на алмазную головку 5. В результате разрушается её металлическая связка и обнажаются алмазные зерна. После этого циклы электрохимического воздействия на деталь 6 и алмазную головку 5 повторяются. Затем алмазная головка снимается. В шпиндель устанавливается гладкий электрод. Управляющий сигнал поступает с блока управления 2 на твёрдотельные реле 8 и 10, установленные в блоке коммутации токов 3. Силовые цепи реле замыкаются. В результате этого деталь 6 соединяется с положительным полюсом источника тока 1, а гладкий электрод 5, соединяется с отрицательным полюсом источника тока 1. Происходит электрохимическое воздействие на деталь 6, в результате которого уменьшается высота микронеровностей поверхности детали.

На рисунке 2 приведена фотография собранной нами макетной платы устройства управления. Оно состоит из блока выходов релейного типа, часов реального времени, дисплея и программируемого контроллера, выполненного на базе микроконтроллера ATmega328.

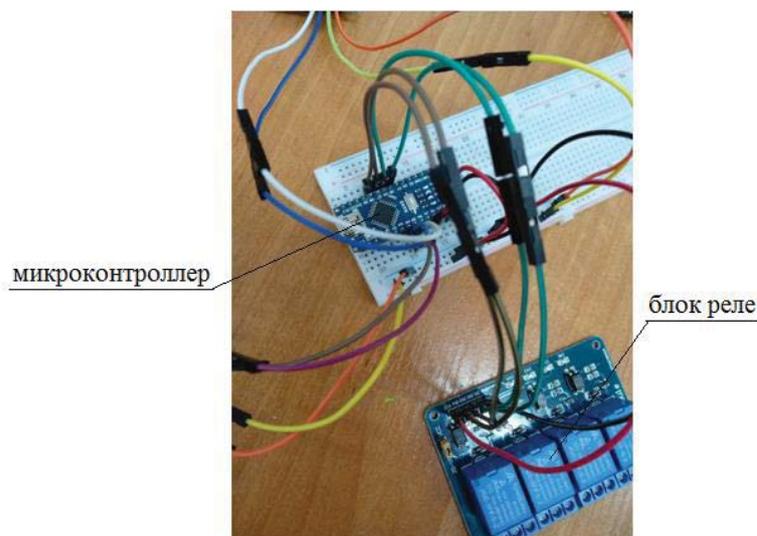


Рисунок 2. Макетная плата устройства управления

Проведенные тестовые испытания макетной платы подтвердили работоспособность предложенной нами схемы устройства для автоматической смены полярности, подключаемых к источнику постоянного тока потребителей и автоматического управления длительностью импульсов тока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Троян И.С. Техника изготовления несъемных металлокерамических конструкций зубных протезов. Учебное пособие. ГБОУ СПО «Волгоградский медицинский колледж». г. Волгоград. 2013 г.- 24 с.
2. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Архипов П.В., Попов В.Ю. Исследование влияния электрических режимов на качественные и экономические показатели комбинированной электроалмазной обработки твердосплавных материалов // Научные технологии в машиностроении. 2015. № 3 (45). С. 22-29
3. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Скиба В.Ю., Гартфельдер В.А., Секлетина Л.С. Повышение эффективности алмазного инструмента на металлической связке при шлифовании высокопрочных материалов. Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2017. № 3 (76). С. 17-27.
4. Смирнов В.М., Тимофеев Д.А., Шалунов Е.П., Илларионов И.Е. Свойства и структура связки на основе механолегированных гранул меди для изготовления алмазного инструмента. В сборнике: Проектирование и перспективные технологии в машиностроении и металлургии. Материалы II-ой Республиканской научно-практической конференции. Министерство образования и науки РФ; ФГБОУ ВПО "Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова". 2016. С. 183-188.
5. Зорина М.М., Терентьев Е.А., Цай В.Н. Эффективность применения метода электрохимического шлифования для обработки безвольфрамовых твердых сплавов. Сборник трудов конференции "Мехатроника, автоматика и робототехника", г. Новокузнецк, 2017
6. Зорина М.М., Цай В.Н., Терентьев Е.А. Эффективность применения метода «двойного травления» для обработки безвольфрамовых твердых сплавов. Journal of Advanced Research in Technical Science. № 4. Норт-Чарлстон США. 2017.
7. Борисов М.А., Мишин В.А., Дементьев Д.А. Разработка программируемого устройства для управления параметрами тока при электрохимической обработке. В сборнике: Проектирование и перспективные технологии в машиностроении, металлургии и их кадровое

обеспечение Материалы III-ей Всероссийской научно-практической конференции. Ответственный редактор И.Е. Илларионов. 2017. С. 188-192.

8. Борисов М.А., Дементьев Д.А., Мишин В.А. Способ электроабразивной обработки труднодоступных поверхностей. Journal of Advanced Research in Technical Science. 2017. № 4. с. 15-16.

9. Борисов М.А., Мишин В.А. Аспекты применения электрохимического шлифования зубопротезных металлических изделий. В сборнике: Новые технологии науки, техники, педагогики высшей школы. Материалы Международной научно-практической конференции. 2017. с. 157-159.

10. Научно-производственный комплекс Аверон. Каталог продукции. Режим доступа: https://www.averon.ru/catalog/polirovka_i_shlifovanie/aep_2_2/

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Борисов Михаил Анатольевич, 428000, Чувашская Республика, г. Чебоксары, ул. Спиридона Михайлова, дом 3, ЧГУ имени И.Н.Ульянова, доцент кафедры «Технология машиностроения», +79370100536, borisovmgou@mail.ru

Софронов Дмитрий Антонович, 428000, Чувашская Республика, г. Чебоксары, ул. Спиридона Михайлова, дом 3, ЧГУ имени И.Н.Ульянова, магистрант кафедры «Технология машиностроения», +79276694000, dmitrii.sofronov-ds@yandex.ru

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Borisov, Michael A., 428000, Chuvash Republic, Cheboksary, St Spyridon Mikhailov, 3, chgu of a name of I. N. Ulyanov, associate Professor of the Department "Technology of mechanical engineering", +79370100536, borisovmgou@mail.ru

Sofronov, Dmitry Antonovich, 428000, Chuvash Republic, Cheboksary, St Spyridon Mikhailov, 3, chgu of a name of I. N. Ulyanov, graduate student of the Department "Technology of mechanical engineering", +79276694000, dmitrii.sofronov-ds@yandex.ru

СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ «ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО»

1. <i>Гартфельдер В.А.</i> Машиностроительному факультету 50 лет	4
2. <i>Семенова Ю.С., Иванкова Е.Е.</i> Проектирование модели пресс-формы для литья под давлением деталей из алюминия	9
3. <i>Кечин В.А., Киреев А.В.</i> Структура и свойства алюминиевых протекторных сплавов в литом и термообработанном состояниях	13
4. <i>Довыденков В.А., Кобылина Е.В.</i> Особенности кинетики процесса инфильтрации композиционных материалов на основе железа с выкодисперсной пористой структурой ..	17
5. <i>Козулин А.А., Жуков И.А., Промахов В.В., Ворожцов А.Б., Хрусталеv А.П.</i> Исследование влияния дисперсного упрочнения и деформационной обработки на структуру, прочностные свойства и характер пластического течения алюминиевых сплавов	23
6. <i>Костин И.В., Лащухин Н.Е., Фролов В.Ф., Ильин А.А., Некрасов Д.А.</i> Влияние распределения потоков расплава в кристаллизаторе при полунепрерывном литье на образование дефекта «Веерная структура»	31
7. <i>Смолко В.А., Антошкина Е.Г.</i> Термодинамические параметры смачивания кварцевых песков связующими	38
8. <i>Шаршин В.Н., Сухорукова Е.В., Сухоруков Д.В., Кечин В.А.</i> Синтез оловянных сплавов для художественного литья	44
9. <i>Деев В.Б., Прусов Е.С., Сметанюк С.В., Приходько О.Г., Пономарева К.В., Сокорев А.А.</i> Эффективные технологии получения модифицированной структуры в литейных алюминиевых сплавах	53
10. <i>Деев В.Б., РИ Э.Х., Прусов Е.С., Сметанюк С.В., Куценко А.И., Рахуба Е.М.</i> Влияние технологии обработки расплава на кристаллизацию литейных алюминиевых сплавов и композитов.....	59
11. <i>Батышев К.А., Георгиевский М.Г., Семенов К.Г., Зеркалов Г. Л.</i> Применение высококачественных литых заготовок для деталей сцепления нового типа.....	66
12. <i>Батышев К.А., Семенов К.Г., Свинороев Ю.А., Зажигин В.В., Свириденко Д.С.</i> Получение качественных отливок ответственного назначения из алюминиевых сплавов.....	71
13. <i>Илларионов И.Е., Гильманшина Т.Р., Ковалева А.А., Борисюк В.А.</i> Исследование величины пригара на поверхности чугунной отливки	78
14. <i>Илларионов И.Е., Гильманшина Т.Р., Ковалева А.А., Борисюк В.А.</i> Теоретические основы формирования свойств разделительных и притивопригарных покрытий для литейных форм: обзор	85
15. <i>Илларионов И.Е., Садетдинов Ш.В., Стрельников И.А.</i> Диаграмма растворимости системы борная кислота гексаметилентетрамин – вода при 25°С, как научная основа современного материаловедения.....	94
16. <i>Батышев А.И., Батышев К.А., Беспалько В.И.</i> Оригинальные методики исследования литейных процессов.....	101
17. <i>Батышев К.А., Свириденко Д.С., Прохоров А.А., Кателин В.А.</i> Производство качественных авиационных отливок с использованием современных программ компьютерного моделирования	106
18. <i>Илларионов И.Е., Садетдинов Ш.В., Фадеев И.В.</i> Исследование влияния загрязнений поверхности автомобильных дорог на коррозию металла.....	111
19. <i>Зорина М.М., Воронцов Ю.И.</i> Исследование процесса сверления высокопрочного чугуна	121
20. <i>Савинов А.С., Постникова А.С., Радомская В.А.</i> Применение разностных схем для идентификации температурных полей в системе «отливка–песчано-глинистая форма» ...	125
21. <i>Свинороев Ю.А., Батышев К.А.</i> Биополимерные связующие на основе технических лингнинов – оценка возможностей	131

22. Пилюшина Г.А., Памфилов Е.А. Повышение коррозионной стойкости железоуглеродистых сплавов при фрикционно-механическом контакте с органическими полимерами ..	138
23. Маринин Е.А., Гаврилов Г.Н., Чирков А.М. Повышение абразивной износостойкости инструментальных сталей деревообрабатывающей промышленности методом лазерной цементации	145
24. Илларионов И.Е., Никитин В.И., Гильманшина Т.Р., Стрельников И.А., Шалунов Е.П., Садетдинов Ш.В., Салов П.М., Королев А.В., Моисеева О.В. О наследственности в формовочных, стержневых смесях и противопригарных покрытиях	150
25. Иванова Л.А., Чернышов Е.А. Влияние комплексного модификатора на технологические свойства жидкостекольных смесей.....	160
26. Жереб П.В., Илларионов И.Е., Гильманшина Т.Р., Ковалева А.А. Лыткина С.И. Оценка активности наполнителей противопригарных покрытий на основе графита по условному критерию активации.....	164
27. Цирульников Е.В., Воробьев А.Г. Издательский дом «Руда и Металлы» и его роль в информационном обеспечении промышленных предприятий, университетов и научных центров горно-металлургического комплекса России и других стран	170

СЕКЦИЯ «ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ»

1. Абраженин А.А. Оценка трудоемкости детали на этапе конструкторского проектирования	184
2. Братухин А.В., Гаврилов Г.Н. Лазерное упрочнение технологической оснастки для серийного производства крепежных изделий	190
3. Буглаев А.М. Механизация электродеформационного упрочнения	196
4. Зверев Е.А., Скиба В.Ю., Вахрушев Н.В., Титова К.А., Цыплухина Д.Р. Определение технологических режимов оплавления плазменных никелевых покрытий токами высокой частоты	201
5. Денисенко А.Ф. Учет точности изготовления деталей подшипниковых узлов металлорежущих станков при назначении предварительных натягов	207
6. Елемесов К.К., Абсадыков Б.Н., Бекмуханбетова Ш.А., Мурзахметова У.А., Сапарбаев Е.Т., Смаилова Г.А. Гидравлическое формирование горячекатаного стального рулона	215
7. Исаметова М.Е., Машеков С.А., Абсадыков Б.Н., Боровик И.И., Нусипали Р.К. Прогнозирование долговечности вала центробежного насоса для перекачки агрессивных сред	223
8. Картонова Л.В. Методологические аспекты выбора конструкционного материала при производстве стальных деталей.....	232
9. Лебедев В.А. Повышение долговечности деталей путем регламентированной упрочняющей обработки	237
10. Лобанов Д.В., Мулюхин Н.В., Секлетина Л.С., Янюшкин А.Р. Модернизация оборудования под процессы комбинированной электроалмазной обработки.....	242
11. Михайлов А.Н., Матвиенко С.А., Лукичев А.В. Основные направления повышения качества деталей функционально-ориентированными комбинированными технологиями ..	248
12. Прусов Е.С. Применение открытого программного обеспечения OPENCALPHAD для термодинамического моделирования в металлургии и материаловедении.....	256
13. Ямников А.С., Родионова Е.Н., Матвеев И.А. Анализ технологического процесса изготовления протяженного корпуса.....	261
14. Рычков Д.А., Смирнова Д.А., Янюшкин А.Р. Алгоритм и интерфейс средства автоматизации выбора режущего инструмента для обработки высокопрочных композитов	267
15. Солер Я. И., Казимиров Д.Ю., Динь Ши Май. Технологические возможности повышения опрной поверхности плоских деталей из сплава ВТ22 при маятниковом шлифовании	274

16. Степанова Е.Ю., Барсуков Г.В., Кожус О.Г., Степанов Ю.С. Резервы повышения экономической эффективности резания материалов сверхзвуковой гидроабразивной струей	290
17. Хвостик Э.А., Оксанич О.З., Серга Г.В. Увеличение технологических возможностей и повышение эффективности вибрационной обработки	296
18. Аврелькин В.А., Солин С.В., Надеждина О.А., Евдокимов Р.С., Порфирьева К.Л., Николаев В.В., Федотова Н.В., Салов П.М. Совершенствование технологий обработки внутренних поверхностей ответственных деталей	302
19. Аврелькин В.А., Шалунов Е.П., Илларионов И.Е., Воронцов Ю.И., Григорьев В.С., Никитин Д.С., Салов П.М., Купцов М.В. Технологии, разработанные Чувашским государственным университетом, совместно с предприятиями Чувашии	307
20. Хасанова А.Р., Галимов Э. Р., Готлиб Е. М., Шарафутдинова Э.Э. Совершенствование свойств и технологии получения эпоксидных композиционных материалов для машиностроения	314
21. Костенко А.В. К вопросу о производстве изделий машиностроения с заданным ресурсом	321
22. Андрианов Б.А., Тимофеев И.А., Шумилов В.Ф. Разработка поляризованного электромагнитного реле на основе ресурсосберегающей технологии	325
23. Илларионов И.Е., Садетдинов Ш.В., Гильманшина Т.Р. Противокоррозионная амидоборатная присадка к моющим средствам для машиностроительной промышленности	328
24. Шеров К.Т., Тусупова С.О. Способ повышения износостойкости и термофрикционных инструментов	335
25. Памфилов Е. А., Пилюшина Г. А., Капустин В. В. Технологическое обеспечения герметичности гидравлических систем машин лесного комплекса	341
26. Гусев В.В., Лазарев Д.С., Моисеев Д.А. Выбор параметров процесса правки свободным абразивом алмазных шлифовальных кругов	346
27. Полтавец В.В. Определение предела прочности сталей в условиях шлифования с использованием методики Л.В. Андреюка	353
28. Терентьев Е.А. Применение различных стратегий обработки при чистовом фрезеровании плоскостей на станках с ЧПУ	361
29. Ратманов В.А., Гаврилов Г.Н. Исследование и разработка технологии прецизионной лазерной микрообработки	365
30. Денисенко А.Ф., Цай В.Н., Григорьев В.С., Сайкин С.С., Плотников В.В., Никитин Д.С., Никифоров А.С., Волкова Е.Е., Владимирова Н.А. Повышение эффективности процесса шлифования за счет поддержания оптимальных нагрузок	373
31. Носов Н.В., Сайкин С.С., Воротников Ю.У., Цай В.Н., Надеждина О.А., Никитин Д.С., Плотников В.В., Игорев В.В. Повышение эффективности процесса при внутреннем шлифовании с осцилляцией в условиях ограниченной жесткости технологических систем ..	381
32. Илларионов И.Е., Шалунов Е.П., Сайкин С.С., Носов Н.В., Денисенко А.Ф., Плотников В.В., Поляков А.С. Салов П.П. Новый метод шлифования сквозных отверстий в условиях ограниченной жёсткости технологической системы	388
33. Лазарев А.Ю., Трушин Н.Н. Модернизация технологической подготовки опытно-конструкторского производства	394
34. Лисицин В.Н., Трушин Н.Н. Исследование процесса фрезерования стеклотекстолита марки СОНФМ концевой фрезой типа СВД	403
35. Титова К. А., Скиба В. Ю., Иванцовский В. В., Вахрушев Н.В. Гибридное технологическое оборудование: повышение эффективности комплексированных металлообрабатывающих станков	411
36. Заживихина Е.И., Маркова С.А., Смирнова С.Н., Заживихин Д.А. Количественное определение цинка в комплексе	414

37. Усов С.В., Батышев К.А., Довыденков П.А. Физико-технические основы создания комбинированных методов обработки деталей машин	420
38. Секлетина Л.С., Гартфельдер В.А., Янюшкин А.Р., Архипов П.В., Медведева О.И. Влияние методов шлифования на энергию адгезии взаимодействующих материалов	424
39. Секлетина Л.С., Архипов П.В., Медведева О.И., Янюшкин А.Р., Гартфельдер В.А. Шлифование твердых сплавов алмазными кругами на токопроводящих связках	430

СЕКЦИЯ «ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ, НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ»

1. Тимофеев И.А., Андрианов Б.А., Шумилов В.Ф. Оптимальная геометрия сердечника электромагнитной системы, изготовленного методом порошковой металлургии	436
2. Шумилов В.Ф., Тимофеев И.А., Андрианов Б.А. Надежность изготовления магнитной системы электрического аппарата	440
3. Шалунов Е.П., Владимирова Ю.О., Терентьев Е.А. Электрод – инструмент из композиционного материала на основе порошковой меди для электроэрозионной резки титанового сплава	443
4. Данилов Н.В., Шалунов Е.П., Архипов И.В. Повышение механических свойств алюминиевых дисперсно-упрочненных композиционных материалов за счет использования при их получении сильных импульсных токов и магнитных полей	452
5. Довыденков А.В., Ярмольк М.В. Исследование структурных особенностей композиционного материала на основе меди и механолегированных наноструктурных гранул системы Cu-Al ₂ O ₃	460
6. Шалунов Е.П., Салов П.М., Левушин А.Н., Владимирова Ю.О. Использование энергии импульсного магнитного поля для получения длинномерных трубчатых электродов-инструментов из композиционных материалов на основе порошковой меди	475
7. Голюшов И.С., Смирнов В.М., Цай В.Н. О возможности конденсаторной сварки для соединения стального хвостовика с алмазной головкой на наноструктурированных медных связках	482
8. Смирнов В.М., Иванов А.В., Ивановский А.А., Никитин Д.С. Лазерная обработка поверхности зубьев фрикционного диска	486

Научное издание

**«СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ
И ЛИТЕЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ»**

Материалы IV Международной научно-практической конференции

г. Чебоксары
18-20 декабря 2018 г.

Редактор-составитель **И.Е. Илларионов**
Ответственный редактор **И.Е. Илларионов**

Подписано в печать 12.12.2018. Формат 60x84/16.
Бумага офсетная. Печать оперативная.
Физ. печ. л. 32,0. Тираж 100 экз. Заказ № К-375.

Отпечатано в типографии «Новое Время».
428034, г. Чебоксары, ул. Мичмана Павлова, 50/1.
Тел.: (8352) 32-33-53, 41-27-98. E-mail: newtimel@mail.ru