



ISSN 2073-3216
(E) ISSN 2518-7120

**ДОНЕЦКИЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ

**Международный
сборник научных трудов**

Выпуск 2 (89)' 2025



ДОНЕЦК - 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Донецкий национальный технический университет»

ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Международный сборник научных трудов

Выпуск 2(89)' 2025

Донецк
2025

УДК 621.01(063)
ББК 34.4
П78

Рекомендовано к изданию
Ученым советом ФГБОУ ВО «ДонНТУ»
(протокол № 5 от 30.05.2025 г.)

Ответственный редактор – Михайлов Александр Николаевич

Редакционная коллегия:

Михайлов А. Н. (председатель), Горобец И. А., Лахин А. М., Баласанян Б. С.,
Бахадиров Г. А., Брешев В. Е., Бутенко В. И., Витренко В. А.,
Мазуру С., Овчинников Е. В., Пантеленко Ф. И., Поветкин В. В.,
Суслов А. Г., Тока А., Хандожко А. В.

Прогрессивные технологии и системы машиностроения :
П78 междунар. сб. науч. трудов / Ред. кол.: Михайлов А. Н. (пред.),
Горобец И. А., Лахин А. М. [и др.]; отв. ред. А. Н. Михайлов. –
Донецк : ДонНТУ, 2025. – Систем. требования : просмотрщик PDF-
файлов. – Загл. с титул. экрана.

В международном сборнике приведены вопросы теории и практики обработки изделий прогрессивными методами, показаны достижения и направления развития технологического оборудования, оснастки, металлорежущего инструмента и нанесения специальных покрытий на изделия машиностроения. Рассмотрены аспекты автоматизации производственных процессов и надежности технологического оборудования, а также освещены современные проблемы материаловедения в машиностроении.

В издании публикуются труды ученых и ведущих специалистов из разных стран, сборник предназначен для научно-технических работников, ИТР и специалистов в области машиностроения.

Тексты трудов печатаются в авторской редакции.

Издается при содействии Донецкого регионального отделения
«Союз машиностроителей России».

УДК 621.01(063)
ББК 34.4

УДК 621.923

Н. В. Азарова, канд. техн. наук, доц., **С. А. Поезд**, канд. техн. наук, доц.,
А. В. Рудницкий, ст. лаборант, **В. П. Цокур**, канд. техн. наук, доц.
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный технический университет», г. Донецк, ДНР
Тел./Факс: +7 (856) 3010731; E-mail: msmo@fimm.donntu.ru

ШЛИФОВАНИЕ ТВЕРДОГО СПЛАВА VK15 АЛМАЗНЫМИ КРУГАМИ НА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СВЯЗКЕ

В статье приведены данные по исследованию изменений среднего арифметического отклонения профиля обработанной поверхности при алмазном шлифовании твердого сплава VK15 алмазными кругами на связке M2-01, рабочая поверхность которых получена в результате электроэрозионной правки.

Ключевые слова: шлифование, алмазный круг, шероховатость поверхности, твердый сплав.

N. V. Azarova, S. A. Poezd, A. V. Rudnitsky, V. P. Tsokur

GRINDING OF HARD ALLOY VK15 WITH DIAMOND WHEELS ON A METAL BUNDLE

The article presents data on the study of changes in the arithmetic mean deviation of the profile of the treated surface during diamond grinding of the VK15 hard alloy with diamond wheels on the M2-01 bundle, the working surface of which was obtained as a result of electroerosion straightening.

Keywords: grinding, diamond wheel, surface roughness, hard alloy.

1. Введение

На параметр шероховатости (ПШ) обработанных поверхностей оказывает влияние большое количество факторов: высота, форма, характер расположения неровностей и их направление и зависит от принятого вида и режимов обработки; условий охлаждения, типа и состояния используемого оборудования и приспособлений; химического состава и микроструктуры обрабатываемого материала. Перечисленные факторы можно объединить в три группы, связанные с геометрией процесса резания, с пластической и упругой деформацией обрабатываемого материала с текущим состоянием и вибрациями режущего инструмента, физико-химическими процессами в зоне резания. ПШ играет важную роль в работоспособности изделий, снижая трение и износ, увеличивая коррозионную стойкость в связи с однородностью поверхности, повышая прочность и контактную жесткость соединений в связи со снижением концентраторов напряжений [1]. В ГОСТе [2] приведены значения ПШ R_a для плоского чистового шлифования 0,40 ... 1,60 мкм, а для тонкого – 0,05...0,4 мкм. Приводится таблица с рекомендациями по выбору зернистости кругов на металлической связке для получения нужного параметра шероховатости.

Заданного качества обработанной поверхности изделия можно достичь только на оптимальных сочетаниях режимов резания, охлаждающих жидкостей и характеристик режущего инструмента. При финишной обработке деталей из твердых сплавов рекомендуют применять алмазные круги на металлической связке, которая обеспечивает прочное удержание алмазных зерен, снижение удельного расхода алмазов, повышение производительности обработки [2, 3, 4]. Существуют различные способы комбинированного алмазного шлифования, когда дополнительно вводится энергия в зону резания [2] или в зону, смещенную на 180° [5] или 90°. Введение постоянного технологического тока или в виде импульсов принято называть алмазно-эрозионным шлифованием (АЭЭШ), а введение постоянного тока с применением

электролитов –электрохимическим. При АЭЭШ [3, 4, 5] увеличивается удельный расход алмазов, а применение электролитов приводит к пассивации электродов.

ВК15 работает при нагреве до 1000°C и используется при обработке металлов резанием, бесстружковой обработке металлов, в качестве матриц при изготовлении алмазов, в горной промышленности. При исследовании обработки твердого сплава ВК15 алмазным кругом на связке М2-01 авторы [6] утверждают о полной потере режущей способности круга через 30 минут ввиду процесса засаливания, что связано с процессами пассивации электродов при электрохимическом шлифовании. Поэтому исследование влияния продолжительности шлифования на работоспособность алмазного круга и параметр шероховатости является актуальной задачей.

2. Основное содержание и результаты работы

Исследования влияния продолжительности шлифования твердого сплава ВК15 алмазным кругом на параметр шероховатости R_a (среднее арифметическое отклонение профиля) проводили на плоскошлифовальном станке модели 3Г71, модернизированном для электроэрозионной правки алмазных кругов на металлической связке. Определяли параметр шероховатости R_a после правки, а также после 15, 30, 45 и 60 минут работы шлифовальным кругом 1А1 250×76×15×5 АС6 160/125-4-М2-01. Круг перед установкой статически балансировали на ножах.

Перед каждым экспериментом круг правили для удаления с рабочей поверхности круга следов предыдущей обработки, удаляя 0,04 мм алмазоносного слоя по высоте. Электроэрозионную правку круга перед экспериментом осуществляли на медном электроде с использованием источника технологического тока ИТТ-35 на следующих режимах: напряжение холостого хода 55 В, поперечная и вертикальная подача ручная для обеспечения силы тока 7...8 А. В качестве смазочно-охлаждающей жидкости использовали 0,3% раствор кальцинированной соды в воде.

После электроэрозионной правки РПК представляет собой поверхность с развитым рельефом, сформированным выступающим из металлической связки алмазными зернами. Режимы резания: скорость резания – 35 м/с, продольная подача – 3, 6, 9, 12 м/мин, глубина резания – 0,015 мм.

Среднее арифметическое отклонение профиля R_a определяли на профилометре модели 283 по шести измерениям. Доверительный интервал для шести измерений, равный $\pm 0,018$ мкм был рассчитан с использованием дисперсии, определенной по выборке из 100 измерений R_a .

На рисунке 1 приведены изменения ПШ R_a в течение 60 мин при различных способах шлифования: при алмазном электроэрозионном шлифовании (АЭЭШ) твердого сплава ВК15, когда в зону обработки подаются прямоугольные импульсы от генератора ШГИ 100/125 (рис. 1, а, б) и при шлифовании без подачи импульсов в зону резания (рис. 1, в). Во всех трех случаях после правки ПШ R_a составляет 1,25...1,3 мкм, но уже через 15 мин шлифования снижается до значения 0,5...0,7 мкм вне зависимости от способа шлифования. После 15 мин и до 60 мин шлифования ПШ R_a находится в пределах 0,25...0,5 мкм. Рассмотрим также влияние увеличения скорости детали от 3 м/мин до 12 м/мин на среднее арифметическое отклонение профиля шлифованной поверхности (рис. 1). Рассмотрим также влияние увеличения скорости детали от 3 м/мин до 12 м/мин на среднее арифметическое отклонение профиля шлифованной поверхности (рис. 1). Как видим, значительной потери режущей способности шлифовального круга не наблюдается.

Рассмотрено также влияние увеличения скорости детали от 3 м/мин до 12 м/мин на среднее арифметическое отклонение профиля шлифованной поверхности (рис. 1).

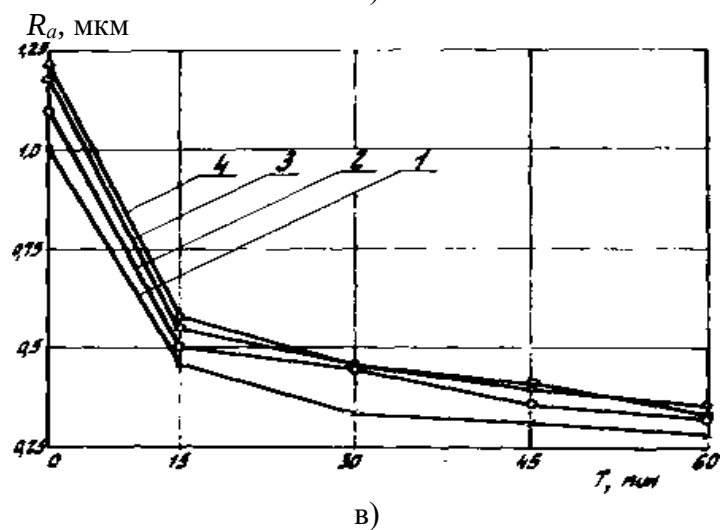
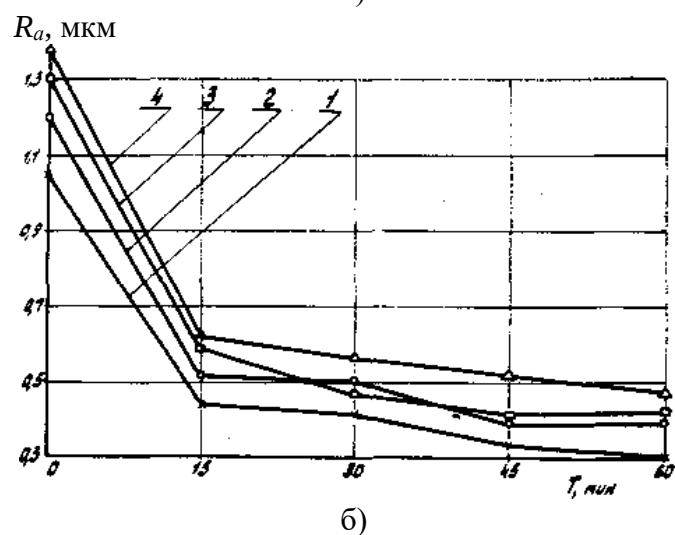
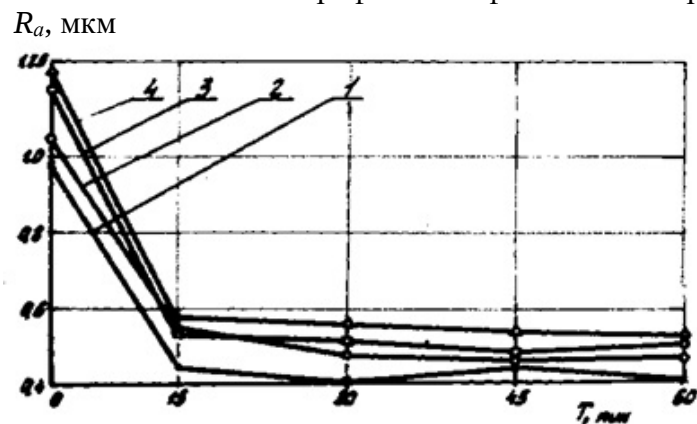


Рисунок 1. Влияние времени обработки на среднее арифметическое отклонение профиля R_a при АЭШ сплава ВК15 кругом АС6 160/125-4-М2-01

а) – $f = 8 \text{ Гц}$; б) – $f = 22 \text{ Гц}$; в) – без тока.

1 – $V_0 = 3 \text{ м/мин}$; 2 – $V_0 = 6 \text{ м/мин}$; 3 – $V_0 = 9 \text{ м/мин}$; 4 – $V_0 = 12 \text{ м/мин}$.

Для понимания полученных результатов дополнительно исследовали изменение рабочей поверхности круга в 30 точках (6 радиальных и 5 осевых сечений), которые представлены на рисунке 2. Из графиков видно, что после ЭЭП РПК в разных сечениях по высоте другая на 10...20 мкм, а после 60 мин шлифования при вводе технологического тока 22кГц в 5 сечении происходит симметричное изменение, что указывает, что импульсы с частотой 22кГц очищают зерна от продуктов шлифования.

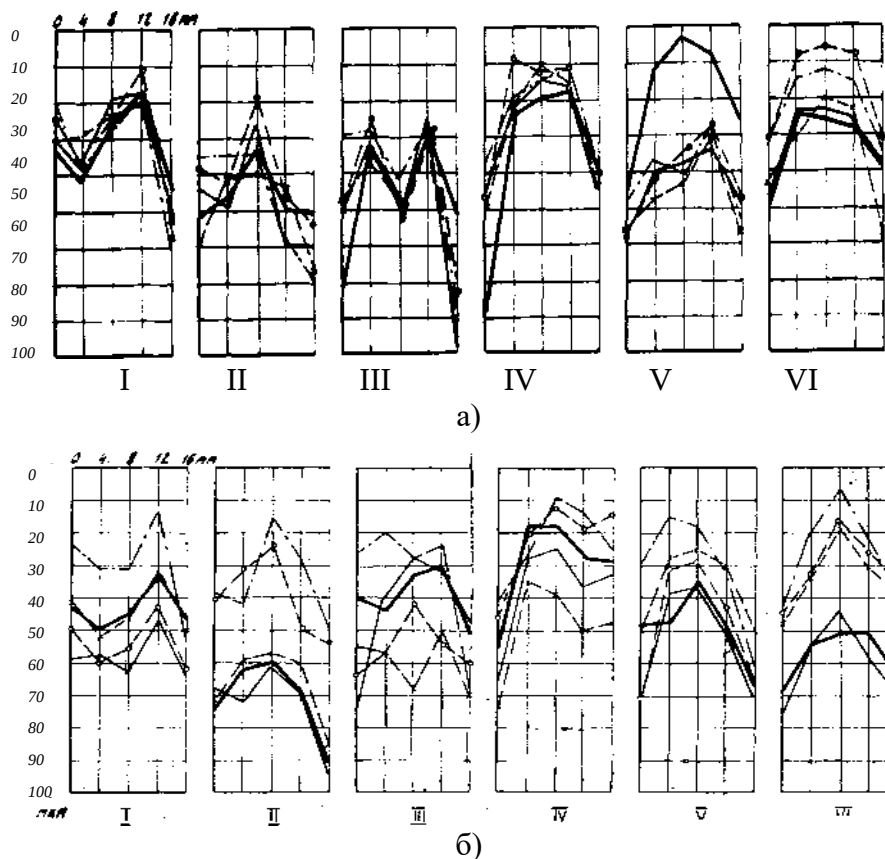


Рисунок 2. Влияние электрических режимов и времени обработки твердого сплава ВК15 на осевой профиль круга АС6 160/125-4-М2-01 (генератор ШГИ 125-100 мм)

а) $f = 22$ кГц; б) – без тока;

— — — — — - после правки; - - - - - после 15 мин;
 — — — — — - после 30 мин; — — — — — - после 45 мин;
 ————— - после 60 мин.

При шлифовании без введения электрического тока картина иная. Вначале шлифования после ЭЭП зерна расположены на одной высоте (отличие 10 мкм), но через 60 мин наблюдается не только снижение высоты рабочего профиля (сечения II, V, VI), но и вначале снижение, а затем повышение (I, III, IV сечения). Это говорит о том, что зерна частично разрушились или удалены, а на оставшейся части зерен начал намазываться обрабатываемый материал. Высота профиля разнится до 30 мкм, а в сечениях I, III, IV наблюдаем увеличение высоты профиля из-за налипания на алмазные зерна обрабатываемого материала.

Были проведены эксперименты по определению удельного расхода алмазов при шлифовании твердого сплава ВК15 с вводом технологического тока в зону резания и без тока, которые представлены на рис. 3.

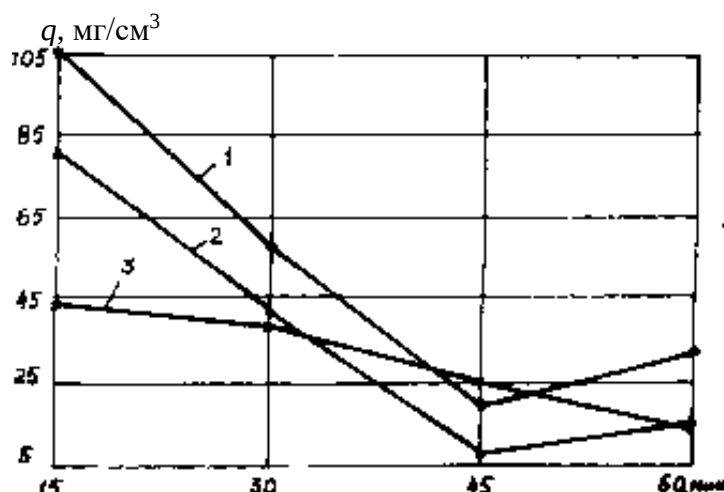


Рисунок 3. Влияние времени шлифования на удельный расход алмазов при шлифовании кругом АС6 160/125-4-М2-01 твердого сплава ВК15
1 – АЭЭШ при $f = 8$ кГц; 2 – АЭЭШ при $f = 22$ кГц; 3 – АШ

3. Заключение

Приведенные результаты экспериментов показывают, что правка импульсным током на технологическом источнике ИТТ-35 позволяет работать алмазному кругу в течение 60 мин, обеспечивая достижимый параметр шероховатости $R_a = 0,35$ мкм, а при обработке с введением в зону резания импульсного тока $R_a = 0,50$ мкм. ПШ после правки 1,1...1,2 мкм, а после 15 мин шлифования уменьшается в 2,2 раза.

Изменение продольной подачи стола) от 3 до 12 м/мин не повлияла на ПШ при алмазном шлифовании твердого сплава ВК15 на скорости резания – 35 м/с и глубине резания – 0,015 мм. При введении в зону резания импульсного тока ПШ увеличился в 1,3 раза. Удельный расход алмазов, который в 1,8 раза выше за первые 30 мин с введением в зону резания импульсного тока, после 60 мин шлифования сопоставим с алмазным шлифованием. На представленных графиках координат РПК видно, что ЭЭП позволяет обеспечить выступание зерен близких к окружности. В процесс шлифования РПК представляет собой череду впадин и выступов, но при соблюдении оптимальных режимов резания алмазный круг будет обновляться, обеспечивая получение заданного качества поверхности.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Исследование в технологии механической обработки / А. Е. Древаль, С. Г. Васильев, Д. В. Виноградов, О. В. Маликов // Электронный журнал МВТУ им. Баумана, 2014, №12, С. 22-28.
2. ГОСТ Р 70117 -2022. Шероховатость поверхности. Рекомендации по выбору: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 23 мая 2022 г. №359-ст.: введен впервые: дата введения 2023-01-01 / разработан Федеральным государственным унитарным предприятием «Всероссийский научно-исследовательский институт, Центр». – М.: РСТ, 2022. – 20с.
3. Механика и производительность алмазного шлифования с учетом износа зерен / Ф. В. Новиков, Ю. Г. Гуцаленко, В. И. Полянский, В. В. Ивкин // Резание и инструменты в технологических системах. – Харьков, 2018 – Выпуск 88 С. 142-157.

4. Аверкина Н. Е. Правка алмазных дисковых кругов на металлической связке. URL: [conf.sfu-kras.ru>sites/mn2013/thesis/s057/s57-004.pdf](http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2013/thesis/s057/s57-004.pdf) (дата обращения 26.05.2025). Текст: электронный

5. Голубев, И. В. Круглое наружное шлифование со стабилизацией режущей способности токопроводящего инструмента электрическими разрядами: Автореф. дис.канд. техн. наук: 05.03.01. – М., 1985 – 16 с.

6. Янюшкин А. С., Архипов П. В., Торопов В. А. Механизм процесса засаливания шлифовальных кругов// Вестник машиностроения. 2009. №3. С.62-69.

Поступила в редколлегию 07.04.2025 г.

УДК 621.793:669.717

М. А. Белоцерковский, д-р техн. наук, проф., **А. И. Комаров**, канд. техн. наук, **И. А. Сосновский**, **Д. В. Орда**, **А. А. Курилёнок**, канд. техн. наук, доц.

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, РБ

тел.: 250-15-42; E-mail: sos3@tut.by

ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СТРУКТУРА ЦИНК-АЛЮМИНИЕВЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧАЕМЫХ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКОЙ

В статье представлены данные по результатам изучения структуры и триботехнических свойств покрытия из цинк-алюминиевого сплава ZnAl30, сформированного на внутренней поверхности стальной втулки методом центробежной индукционной наплавки. Структура наплавленного покрытия в условиях центробежного вращения имеет композиционное градиентное строение, представленное матричным Zn-Al сплавом, армированным включениями $Al_{13}Fe_4$ и диффузионным цинковым слоем на поверхности стальной втулки. Триботехнические испытания последовательно сошлифованных слоев покрытия показали, что коэффициент трения изменяется по глубине градиентного покрытия имеет экстремум минимального значения в интервале 0,005-0,012, что соответствует уровню антифрикционных свойств. Данные значения сохраняются в широком интервале давлений (до 25 МПа) при скорости скольжения 0,2 м/с.

Ключевые слова: цинк, алюминий, сплав, покрытие, индукционная наплавка, втулка, структура, коэффициент трения.

M. A. Belotserkovsky, A. I. Komarov, I. A. Sosnovskiy, D. V. Orda, A. A. Kurilyonok

TRIBOTECHNICAL PROPERTIES AND STRUCTURE OF ZINC-ALUMINIUM COATINGS OBTAINED BY CENTRIFUGAL INDUCTION SURFACING

The article presents data on the results of studying the structure and tribological properties of a coating made of zinc-aluminum alloy ZnAl30, formed on the inner surface of a steel bushing by the method of centrifugal induction surfacing. The structure of the deposited coating under centrifugal rotation conditions has a composite gradient structure, represented by a matrix Zn-Al alloy reinforced with inclusions of $Al_{13}Fe_4$ and a diffusion zinc layer on the surface of the steel bushing. Tribological tests have shown that the friction coefficient has an extremum of the minimum value by the coating thickness and is 0.005-0.012, which corresponds to the level of antifriction properties. These values are maintained in a wide pressure range (up to 25 MPa) at a sliding speed of 0.2 m/s.

Keywords: zinc, aluminum, alloy, coating, induction surfacing, bushing, structure, friction coefficient.

1. Введение

Повышение эксплуатационных свойств и долговечности узлов трения является одной из основных задач машиностроения, поскольку износ трущихся поверхностей является основной причиной поломки машин и механизмов. Разработка триботехнических материалов с повышенными или функционально направленными характеристиками для узлов трения машин и механизмов является актуальной задачей, ее реализация может осуществляться путем разработки новых или совершенствования известных материалов, или технологических приемов их использования. Перспективным технологическим решением является нанесение градиентных покрытий известных трибоматериалов, что экономически более целесообразно, чем изготовление цельноматериальных элементов узлов трения машин и механизмов. Формирование градиента свойств по толщине покрытия обеспечивает совмещение функциональных свойств для улучшения эксплуатационных характеристик материала.

В работе [1] описаны физико-механические и триботехнические свойства антифрикционных градиентных серебряно-алмазных покрытий, осаждаемых из бесцианистых электролитов на асимметричном переменном токе. Вблизи подложки наносится твердый мелкокристаллический осадок, а вблизи поверхности зерна делаются крупнее и менее твердыми, что обеспечивает повышенные триботехнические свойства покрытия и его адгезии с основой. Структура и свойства антифрикционных градиентных серебряно-алмазных покрытий могут быть улучшены введением нанодобавок [2].

Аналогичные результаты получены в [3], где предложен способ получения толстых хромовых покрытий с градиентом микротвердости по толщине. Показано, что электролитические хромовые покрытия с положительным градиентом обладают высокой адгезионной прочностью к стальной подложке, что обусловлено кристаллизацией на поверхности раздела «основа – покрытие» осадка хрома с низкими растягивающими напряжениями.

Анализ источников показывает, что градиент структуры покрытия обуславливается технологическими приемами наложения поля внешних сил: электромагнитных, термических, центробежных. В работе [4] показано, что центробежное литье смеси мелкодисперсного порошка феррита стронция с эпоксидной смолой позволяет достичь градиентного распределения ферромагнитного материала в образце с ориентацией многодоменных частиц в окружном направлении. Градиент распределения частиц при центробежной наплавке фиксируется и в работе [5], где в условиях вакуума были изготовлены трубы из сплава AlLi 2060. Поскольку медьсодержащая эвтектика имеет более высокую плотность, чем матричный сплав, она накапливается во внешнем слое и повышает его твердость как упрочняющая фаза. При этом скорость вращения оказывает основной эффект на сегрегацию включений в объеме структуры под действием центробежной силы. В работе [6] также показано, что фактический химический состав экспериментального сплава $Mg-8,42Gd-3,94Y-0,93Zn-0,34Zr$ по толщине покрытия имеет градиент распределения легирующих элементов, однако у тонкостенных заготовок состав практически одинаков. Перераспределение легирующих компонентов в первую очередь связано с плотностью образуемых ими включений, так включения, имеющие плотность меньше матричного сплава, оттесняются внутрь, тогда как более плотные – наружу. Согласно [7], при центробежном формовании отливок из сплава $AlSi_{19}$, первичный Si имеет плотность $2,33 \text{ г/см}^3$, а Mg_2Si – $1,88 \text{ г/см}^3$, что было меньше, чем у матрицы из алюминиевого сплава ($2,7 \text{ г/см}^3$), благодаря этому включения смещаются по направлению к поверхности.

Технологические параметры центробежного формования заготовок оказывают активное воздействие на структуру и свойства наплавляемого сплава. В [8] приведены данные влияния схемы расположения (горизонтальная или вертикальная), скорости вращения, а также модифицирующей добавки SiC на качество отливок и механические свойства сплава $AlSi_7Cu_3Mg$. Показано, что увеличение скорости вращения заготовки, а также введение в состав керамических включений, обеспечивает диспергирование структуры наплавляемого сплава за счет увеличения центров кристаллизации, что качественно влияет на прочностные свойства.

Однако при выборе технологических режимов наплавки следует учитывать плотность материала, вязкость образующегося расплава, а также шероховатость стенок формы, так в [9] приведены результаты компьютерного моделирования процесса горизонтального центробежного литья стали. Согласно данным, для каждого материала существует критическая скорость вращения заготовки, при снижении которой металл «льется дождем» или падает с верхней части формы на дно во время вращения формы и

скапливается в нижней части заготовки, формируя неравномерность распределения по периметру. При этом на начальном этапе процесса вязкость расплавленного металла и шероховатость стенок литейной формы оказывает активное воздействие на гомогенизацию расплавленного металла.

Анализ данных показал, что технология центробежного литья является перспективной при изготовлении полых заготовок на основе тел вращения с функционально-градиентной структурой, обеспечивая ряд заданных свойств, например, наплавка покрытия с высокими триботехническими характеристиками при удовлетворительном уровне адгезии покрытия с основой. В Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси разработана технология нанесения покрытий на внутреннюю поверхность детали методом центробежной наплавки в условиях индукционного нагрева [10–12]. В процессе наплавки происходит полное расплавление шихтового материала с образованием единого расплава, что позволяет наносить сплавы необходимого состава и (или) проводить их модифицирование в процессе наплавки.

Цель настоящей работы – изучить структуру и механические свойства покрытия на основе сплава ZnAl30, полученного методом центробежной индукционной наплавки на внутреннюю поверхность стальной втулки, для возможного использования градиентных покрытий в качестве альтернативы бронзовым.

2. Материалы и методики испытаний

В настоящей работе в качестве шихтового материала использовали цинковый сплав марки ЦАМ4-1 (ГОСТ 19424-97) и технически чистый алюминий марки А0 (ГОСТ 4784-97). Шихта для наплавки формировалась из кускового материала с соотношением компонентов для получения образцов покрытий с составом ZnAl30. Количество материала в шихте рассчитывалось для получения покрытия толщиной 4–5 мм.

Покрытие на внутренней поверхности цилиндрической стальной заготовки, изготовленной из стали 20 (ГОСТ 1050-2013), наплавлялось путем индукционного нагрева и центробежного формования шихты, состоящей из сплава ZnAl30 и покровного флюса (40% NaCl, 30% NaF, 10% KCl, 10% ZnCl, 10% Na₃AlF₆) в количестве 5% от массы наплавляемого сплава.

Нагрев производился ступенчато до температуры 720–740 °С при скорости вращения 1500 мин⁻¹. После достижения заданных параметров процесса производилась изотермическая выдержка в течение 5 минут с последующим динамическим охлаждением до температуры 250–300 °С [10].

Центробежная индукционная наплавка осуществлялась на оборудовании, включающем генератор токов высокой частоты типа ЛПЗ-2-67М, мощностью 60 кВт, частотой 66 кГц, рамочный дугообразный индуктор, программный регулятор ТРМ 151 (ООО «Овен», Беларусь), инфракрасный пирометр TemPro-2200 и установку центробежной индукционной наплавки (конструкции Объединенного института машиностроения НАН Беларуси) с регулируемой частотой вращения. Температура нагрева определялась пирометром TemPro-2200, время нагрева контролировалось электронным секундомером ИВІР-203М ТУ 4282-001-33865949-2009.

Структурно-фазовое состояние образца покрытия исследовалось на торцевых шлифах с половинчатым травлением двумя растворами: водный раствор HF (1%) + H₂SO₄ (15%) для выявления структуры покрытия и спиртовой раствор HNO₃ (4%) для выявления диффузионного слоя – методом металлографического анализа на микроскопах ХJM300 и МИМ - 8, оснащенных цифровой регистрацией изображений. Морфология покрытия и диффузионного слоя дополнительно исследовались с использованием

сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). СЭМ выполнялась на приборе VEGA II TESCAN (Чехия) с использованием энергодисперсионной приставки типа InCa 350 Cambrige Instrument GB для элементного анализа.

Фазовый состав покрытия исследовали на автоматизированном комплексе на базе рентгеновского дифрактометра ДРОН-3М с использованием $\text{CuK}\alpha$ -излучения и применением вторичной монохроматизации рентгеновского пучка. Химический анализ покрытий осуществлялся методом рентгенофлуоресцентного анализа на приборе Epsilon 1 компании PANalytical.

Триботехнические испытания образцов проводили на многофункциональном трибометре MFT-5000 (Rtec Instruments, США) по схеме возвратно-поступательного перемещения образца относительно неподвижного стального контртела. Контртелом служила торцевая поверхность цилиндра диаметром 3 мм, изготовленного из стали ШХ15 (твердость 60-62 HRC). Триботехнические испытания покрытия проводились после механической обработки образца покрытий с последующей ступенчатой шлифовкой на абразивах P240-P600-P1000. Испытания выполняли при нагрузках 30, 60, 120 и 150Н, что соответствует давлениям 5, 10, 20 и 25 МПа. Амплитуда перемещения составляла 10 мм, а частота – 10 Гц. Продолжительность испытаний в нагруженном состоянии составляла 90 минут. По результатам испытаний определяли коэффициент трения (COF).

3. Результаты и их обсуждение

Структура покрытий. Металлографические исследования структуры образцов покрытий на основе сплава ZnAl30 показали, что наплавленный слой имеет композиционное строение: цинк-алюминиевый сплав армированный железосодержащими интерметаллидными включениями. Цинк-алюминиевый сплав имеет градиентную структуру, поскольку цинк, имеющий высокую плотность $\sim 7,13 \text{ г/см}^3$, под действием центробежных сил, отесняется к стальной основе, а алюминий (плотность $\sim 2,7 \text{ г/см}^3$) к поверхности (рисунок 1). Армирующая фаза имеет неравномерное распределение: у стальной основы мелкие частицы (до 30 мкм), затем следует «полоса» из включений, а с поверхности крупные включения (до 100 мкм).

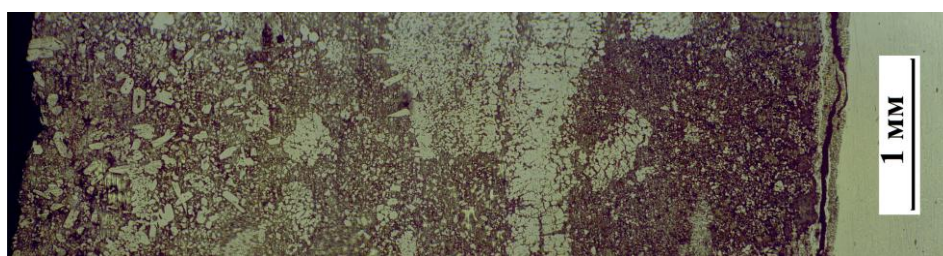


Рисунок 1. Структура образца покрытия ZnAl30

Приведенные данные подтверждаются результатами сканирующей микроскопии покрытия ZnAl30 по толщине (рисунок 2). На поверхности стальной втулки образуются диффузионный цинковый слой толщиной до 300 мкм (см. рисунок 2 б), структура которого имеет гетерогенное строение (рисунок 3), начиная от стальной основы: до 10 мкм прослойка, содержащая 20–25 масс.% Zn; 10–50 мкм зона столбчатых зерен Fe-Zn (23–26 %), между которыми располагаются зерна Fe (27–34 %) - Zn; по мере смещения структура представлена фазой Zn (75–80 масс.%) - Fe с округлыми включениями Fe-Zn (25–30 масс.%).

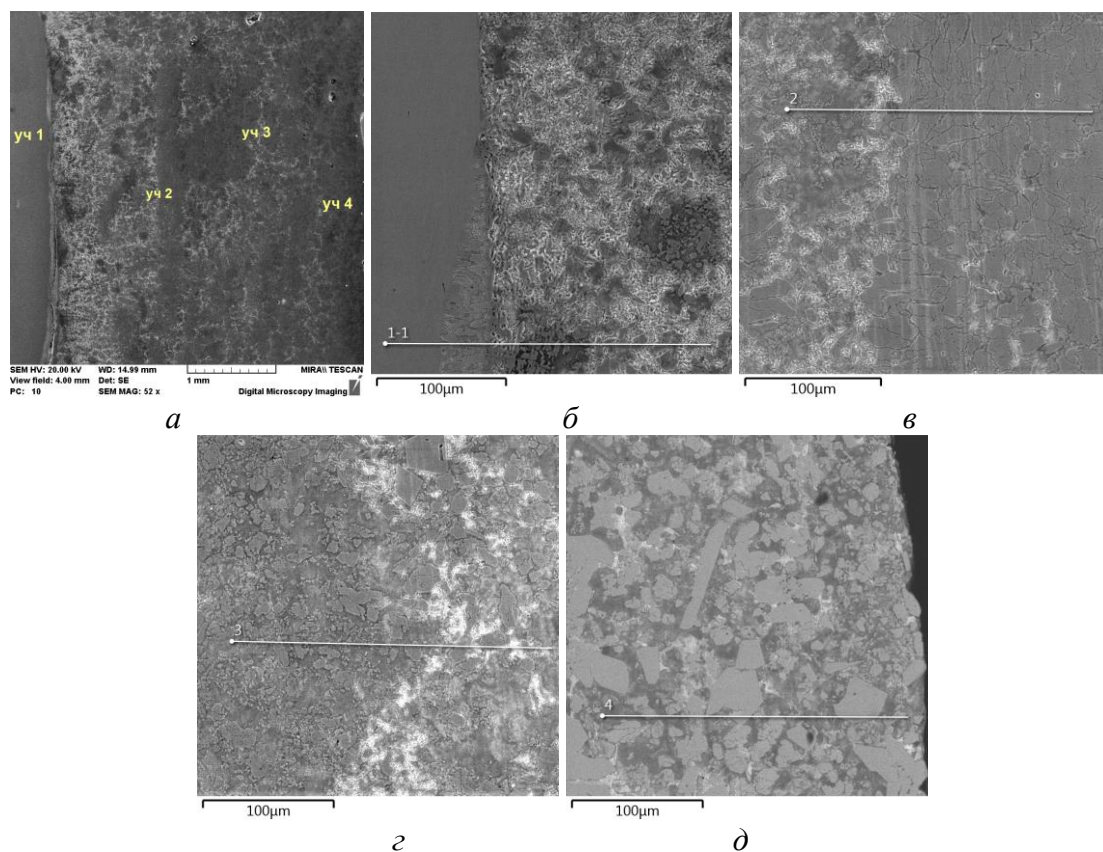


Рисунок 2. Структура покрытия $ZnAl_{30}$ (а) и его различных участков по толщине (б-д)
 а – общий вид; б – граница со сталью; в – граница с «полосой» включений;
 г – середина; д – поверхность

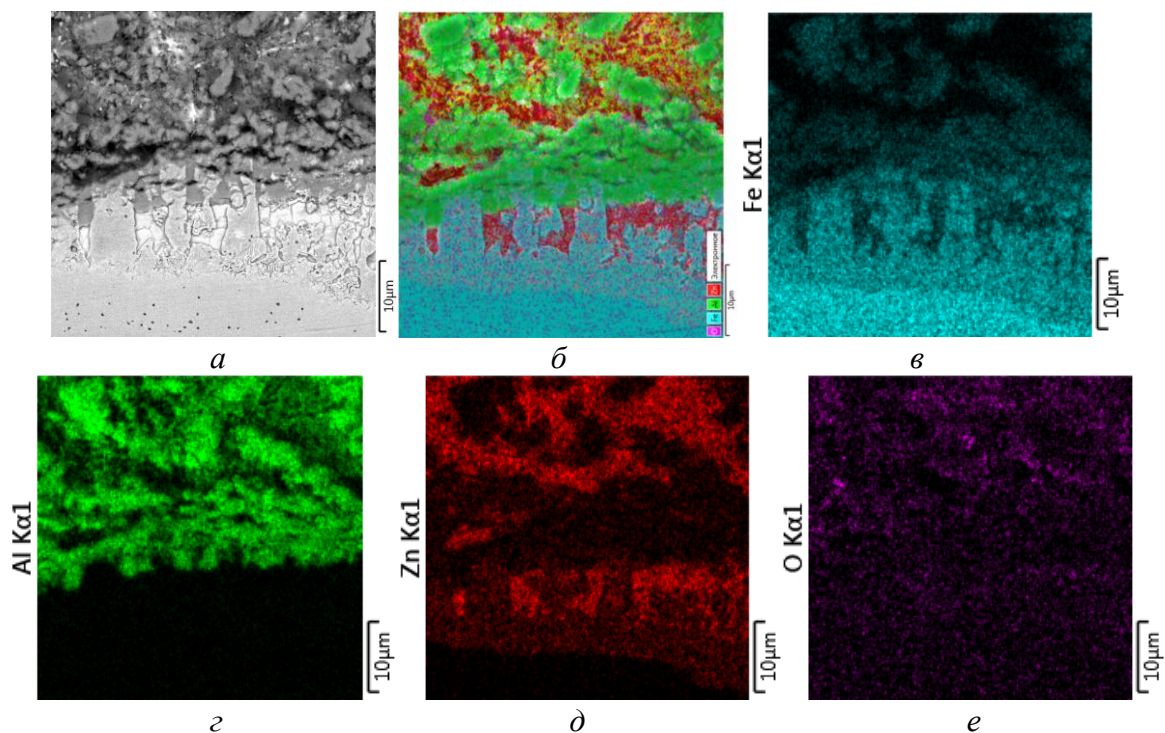


Рисунок 3. Структура (а, б), карты распределения элементов в диффузионном слое (в-е)

Согласно полученным результатам, алюминий не участвует в образовании диффузионного слоя, что подтверждается данными концентрационных кривых (рисунок 4). Также следует отметить, что цинк не образует с железом включений в объеме покрытия, пики содержания железа точно совпадают со впадинами содержания цинка. В объеме покрытия железо образует с алюминием интерметаллидное включение $Al_{13}Fe_4$ (Al_3Fe).

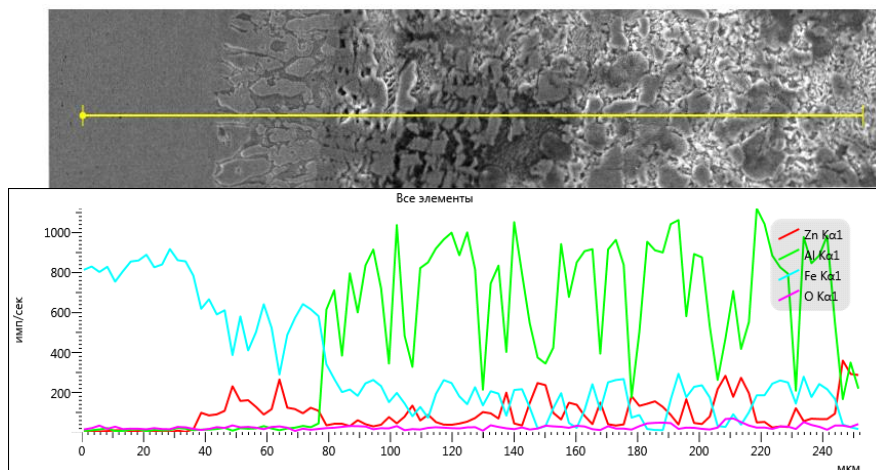


Рисунок 4. Концентрационные кривые распределения элементов покрытия на участке диффузионного слоя

Отличительной особенностью формирования структуры после наплавки, является наличие в матричном сплаве «полосы» включений $Al_{13}Fe_4$ (Al_3Fe), которая, предположительно, формируется в процессе образования и роста диффузионного слоя. Поверхность слоя растворяется, а высвободившееся при этом железо образует с Al прослойку интерметаллида, толщина которой увеличивается до некоторого критического значения, после чего «полоса» интерметаллидов отслаивается и под действием внешних сил перемещается в объем покрытия (рисунок 5). «Полоса» из интерметаллида $Al_{13}Fe_4$ представляет собой скопление частиц неправильной формы, плотно сжатых между собой с цинковым сплавом по границам.

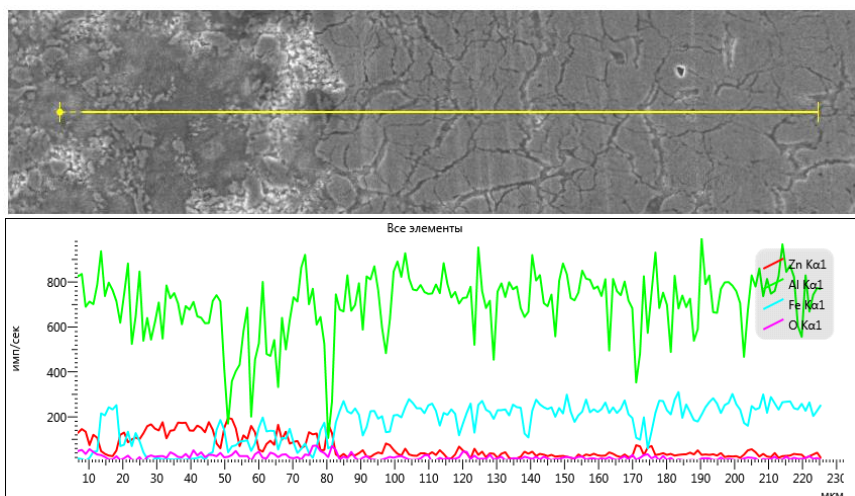


Рисунок 5. Концентрационные кривые распределения элементов покрытия на участке границы с интерметаллидной «полосой»

За «полосой» интерметаллидов следует композиционная структура из матричного цинк-алюминиевого сплава, армированного включениями $Al_{13}Fe_4$, размер которых не превышает 20 мкм (рисунок 6). По мере перехода к поверхностной структуре размер армирующих частиц увеличивается и в поверхностной структуре составляет 100–120 мкм (рисунок 2 д).

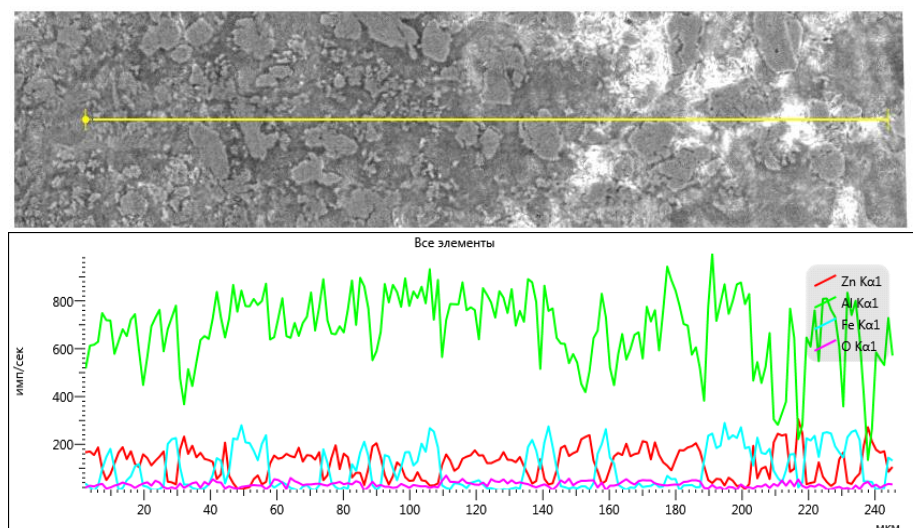


Рисунок 6. Концентрационные кривые распределения элементов в середине покрытия

Триботехнические испытания образцов проводились после механической обработки поверхностного слоя и последующим снятием слоев до стального основания. Поскольку распределение как матричного сплава, так и железосодержащих включений имеет неравномерное распределение по толщине, был определен химический состав испытываемых поверхностей, который представлен в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав поверхности образца ZnAl30

Номер слоя	Толщина покрытия от основы, мм	Содержание элемента, масс. %				
		Al	Si	Fe	Cu	Zn
Слой 1	3,0	43,291	0,566	10,960	0,663	44,521
		43,522	0,518	11,326	0,646	43,989
Слой 2	1,8	43,520	0,239	11,505	0,659	44,077
		43,546	0,221	11,721	0,630	43,190
Слой 3	0,9	36,381	0,263	9,500	0,674	53,182
		40,549	0,259	10,956	0,605	47,631
Слой 4	0,4	24,542	0,476	19,789	0,71	54,435
		21,842	0,518	16,921	0,626	59,655
Слой 5	0,2	2,650	0,025	45,083	0,830	50,728
		1,254	0,043	49,892	0,632	48,112
Основа (Сталь 20)	0	0,215 (C)	0,387	98,885	0,525 (Mn)	-
		0,234 (C)	0,231	99,453	0,421 (Mn)	-

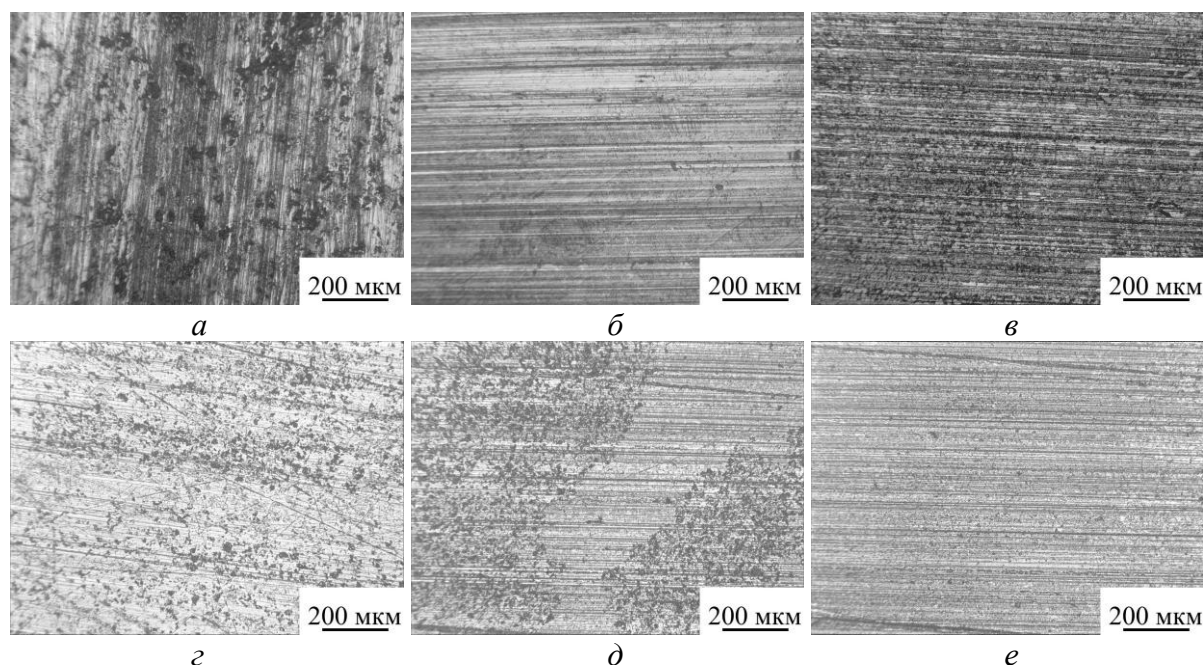
После первичной механической обработки с целью удаления поверхностных дефектов, толщина покрытия составила порядка 3 мм, которое и подвергалось дальнейшим исследованиям. В таблице 2 представлены значения коэффициента трения на различной глубине покрытия при нагрузках 30, 60, 120 и 150 Н.

Таблица 2. Коэффициент трения образца покрытия из ZnAl30

Номер слоя	Нагрузка			
	30	60	120	150
Слой 1	0,0250-0,0290	0,0210-0,0230	0,0240-0,0290	0,0420-0,0450
Слой 2	0,0028-0,0064	0,0006-0,0015	0,0018-0,0021	0,0010-0,0020
Слой 3	0,0010-0,0018	0,0010-0,0012	0,0005-0,0008	0,0014-0,0016
Слой 4	0,0061-0,0077	0,0067-0,0085	0,0034-0,0045	0,0072-0,0082
Слой 5	0,0029-0,0048	0,0033-0,0044	0,0028-0,0055	0,0042-0,0060

На рисунке 7 представлена морфология поверхностей трения на различной глубине покрытия после испытаний при всех исследуемых нагрузках. Анализ структуры поверхностей трения после испытаний показал, что поверхность контртела имеет схожую структуру и не изменяется при испытаниях на различной глубине покрытия ZnAl30 (см. рисунок 7 б), имеет равномерный износ окислительно-абразивного характера. Анализ структуры поверхностей трения образца показал, что в ходе испытаний включения $Al_{13}Fe_4$ склонны к растрескиванию и выкрашиванию (см. рисунок 7 а).

Слои, содержащие в структуре испытуемого слоя включения меньшего размера с равномерным распределением, имеют более низкие значения коэффициента трения (см. рисунок 7 в, г).



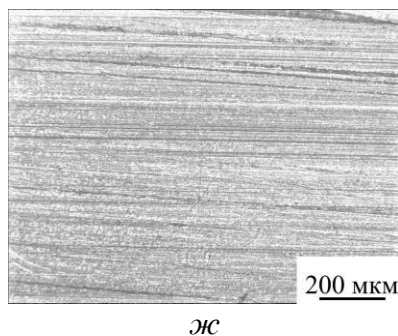


Рисунок 7. Поверхность трения образца (*а, в-ж*) и контртела (*б*) после триботехнических испытаний

а – образец, слой 1; *б* – контртелo, слой 1; *в* – образец, слой 2; *г* – образец, слой 3;
д, е – образец, слой 4; *ж* – образец, слой 5

При использовании полученных практических данных была установлена эмпирическая зависимость изменения коэффициента трения покрытия от толщины оставшегося покрытия и нагрузки при испытаниях, что позволило определить оптимальные параметры нанесения покрытия и глубины механической обработки заготовок, а также эксплуатационные нагрузки. Так наименьшее значение коэффициента трения, 0,005–0,012, наблюдается на глубине покрытия 1–2 мм, которой соответствует композиционная структура Zn-Al (25–35 %) армированная включениями $Al_{13}Fe_4$ с размером частиц до 20 мкм, при нагрузке испытаний до 150 Н (25 МПа), позволяя использовать данные покрытия как альтернативное бронзовым.

4. Заключение

Структура образцов покрытий на основе цинк-алюминиевого сплава, полученных методом центробежной индукционной наплавки, имеет композиционное строение: цинк-алюминиевый сплав армированный железосодержащими интерметаллидными включениями $Al_{13}Fe_4$ (Al_3Fe). На поверхности стальной втулки образовывается диффузионный цинковый слой толщиной до 300 мкм, структура которого имеет гетерогенное строение.

Отличительной особенностью формирования структуры после наплавки, является наличие армирующих включений $Al_{13}Fe_4$ (Al_3Fe) в матричном сплаве, которые, предположительно, формируются в процессе образования и роста диффузионного слоя. Поверхность слоя растворяется, а высвободившееся при этом железо образует с Al прослойку интерметаллида, толщина которого увеличивается до некоторого критического значения, после чего интерметаллиды отслаиваются и под действием внешних сил перемещаются в объем покрытия.

Установлена эмпирическая зависимость изменения коэффициента трения покрытия ZnAl30 от толщины оставшегося покрытия и нагрузки испытаний, согласно которой наименьшее значение коэффициента трения, 0,005–0,012, наблюдается при толщине 1–2 мм, которой соответствует композиционная структура Zn-Al (25–35 %), армированная включениями $Al_{13}Fe_4$ с размером частиц до 20 мкм, при нагрузке испытаний до 150 Н (25 МПа), позволяя использовать данные покрытия как альтернативное бронзовым.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Градиентные антифрикционные серебряно-алмазные покрытия / М. В. Ненашев [и др.] // Известия Самарского научного центра РАН. – 2011. – Т. 13, № 4-3. – С. 824–829.
2. Свойства градиентных серебряно-алмазных покрытий / И. Д. Ибатуллин [и др.] // Изв. Самарского науч. центра РАН. – 2012. – Т. 14, № 1-2. – С. 554–557.
3. Салахова, Р. К. Получение положительного градиента микротвердости как способ повышения адгезии электролитических хромовых покрытий / Р. К. Салахова, А. Б. Тихообразов, Р. М. Назаркин // Труды ВИАМ. – 2018. – № 3(63). – С. 77–84. – DOI: [dx.doi.org/ 10.18577/2307-6046-2018-0-3-77-85](https://doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-3-77-85).
4. Kaszuwara, W. The anisotropy of bonded ferrite magnets obtained by centrifugal casting in magnetic field / W. Kaszuwara, J. Zygmuntowicz, B. Michalski // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2022. – Vol. 555. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2022.169364>.
5. Effects of different process parameters on microstructure evolution and mechanical properties of 2060 Al–Li alloy during vacuum centrifugal casting / M. Xin [et al.] // Journal of Materials Research and Technology. – 2022. – Vol. 21. – Pp. 54–68. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.08.147>.
6. Microstructural evolution and enhanced mechanical properties of Mg–Gd–Y–Zn–Zr alloy via centrifugal casting, ring-rolling and aging / Z. Ma [et al.] // Journal of Magnesium and Alloys. – 2022. – Vol. 10, iss. 1. – Pp. 119–128. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jma.2020.11.009>.
7. Effect of Mg and Cu on microstructure, hardness and wear on functionally graded Al–19Si alloy prepared by centrifugal casting / C. Contatori [et al.] // Journal of Materials Research and Technology. – 2020. – Vol. 9, iss. 6. – Pp. 15862–15873. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.11.050>.
8. Saad, M. A. The effect of reinforced SiC on the mechanical properties of the fabricated hypoeutectic Al–Si alloy by centrifugal casting / M. A. Saad // Engineering Science and Technology, an International Journal. – 2019. – Vol. 22, iss. 4. – Pp. 1125–1135. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2019.02.009>.
9. Analysis of molten metal distribution in the mold of a horizontal centrifugal casting / M. A. Barron, D. Y. Medina, J. Reyes // Open Journal of Applied Sciences. – 2020. – Vol. 10, no. 7. – Pp. 444–454. – DOI: <https://doi.org/10.4236/ojapps.2020.107031>.
10. Способ нанесения двухслойного покрытия на внутреннюю поверхность детали: пат. ВУ № 23365 / М. А. Белоцерковский, А. И. Комаров, И. А. Сосновский, Д. В. Орда, А. А. Курилёнок, Д. О. Искандарова. – Опубл. 30.04.2021.
11. Структура и свойства легированных покрытий из сплава ZnAl30, полученных методом центробежной индукционной наплавки / А. И. Комаров и [др.] // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. – Минск, 2022. – Вып. 11. – С. 299–305.
12. Анализ структуры и триботехнических свойств легированных покрытий на основе сплава системы Zn–Al, полученных методом центробежной индукционной наплавки / А. И. Комаров и [др.] // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. – Минск, 2023. – Вып. 12. – С. 340–345.

Поступила в редколлегию 09.04.2025 г.

УДК 681.7.054.43; 621.671

В. Е. Брешев, д-р техн. наук, доц., **Ю. С. Долженко**, ассист.

Луганский государственный университет имени Владимира Даля, г. Луганск, Россия

Тел. +79591596616; E-mail: veb_lug@mail.ru.

КОНЦЕПЦИЯ СОЗДАНИЯ БЕСКОНТАКТНЫХ ПРИВОДОВ ВРАЩЕНИЯ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В МАШИНАХ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В работе представлена разработанная обобщённая концепция создания бесконтактных приводов вращения для эффективного применения в машинах различного назначения – безвальных динамических насосах, станках резки монокристаллов, сатураторах и др. машинах. Сформулированы основные научно-технические задачи на пути создания бесконтактных приводов вращения и подходы к их решению. Представлены результаты исследования технико-технологических преимуществ и конструктивных особенностей бесконтактных приводов с кольцевыми роторами, проанализированы варианты их конструкций и способов эффективного применения в машинах для зачистки емкостей, центробежно-вихревых и центробежных безвальных насосах, бесшпиндельных станках резки монокристаллов.

Ключевые слова: концепция, бесконтактный привод, свободный ротор, безвальный динамический насос, бесшпиндельный станок резки монокристаллов.

V. E. Breshev, Y. S. Dolzhenko.

THE CONCEPT OF CREATING CONTACTLESS ROTARY ACTUATORS AND THEIR APPLICATION IN MACHINES FOR VARIOUS PURPOSES

The paper presents the developed generalized concept of creating contactless rotary actuators for effective use in machines for various purposes – non-stop dynamic pumps, single crystal cutting machines, saturators, and other machines. The main scientific and technical tasks on the way to create contactless rotary actuators and approaches to their solution are formulated. The results of a study of the technical and technological advantages and design features of contactless drives with annular rotors are presented, their design options and methods of effective use in tank stripping machines, centrifugal vortex and centrifugal pumps, spindle-less single crystal cutting machines are analyzed.

Keywords: concept, contactless drive, free rotor, limbless dynamic pump, spindle-less single crystal cutting machine.

1. Введение

В машиностроении, станкостроении и приборостроении нашли широкое применение узлы и механизмы, в которых выполняют полезную работу или реализуют целевые процессы роторы, совершающие вращательное движение на различных скоростных режимах и под различными нагрузками. Как правило, роторы имеют механические опоры в виде подшипников качения или скольжения, а крутящий момент им сообщается через механические передачи различного типа (зубчатые, винтовые, ременные и др.). Последние передают силы и моменты за счёт механического контакта, которому свойственны значительные силы трения, износ, микросоударения, деформации. Исключение механического контакта заменой механических опор и механических передач действием электромагнитных, газо- или гидродинамических сил позволяет, в ряде случаев, снять технические ограничения, связанные с износом и деформациями узлов, вибрациями, непродуктивными потерями на трение и, таким образом сделать роторные машины высокоскоростными, более надёжными и энергоэффективными [1-5].

Анализ последних достижений в области оборудования и технологии механической и физико-технической обработки показывает устойчивую тенденцию к

разработке и применению высокоскоростного и энергоэффективного оборудования. По этой причине во всём мире разрабатываются шпиндельные узлы и приводы бесконтактного типа, в том числе на опорах с газовой смазкой [2, 4, 5], на электромагнитных и гибридных опорах [1, 5]. Отсутствие твердотельного механического контакта в так называемых бесконтактных приводах вращения открывает новые технико-технологические возможности для применения в роторных машинах различного назначения, особенно высокоскоростных и прецизионных [2, 5]. Вместе с тем, на сегодняшний день не существует обобщённой концепции по созданию бесконтактных приводов вращательного движения, которая бы содержала основные подходы к их структурному синтезу, конструированию, вариативности конструктивных исполнений, а также решению научно-технических задач передачи сил и моментов без механического контакта, обеспечению при этом устойчивости вращающихся роторов.

2. Цель исследования

Разработка обобщённой концепции создания бесконтактных приводов вращения для машин различного назначения – станков резки монокристаллов, станков шлифования, безвальных динамических насосов, импеллеров и др. машин.

3. Постановка задачи

На пути создания машин, отдельных узлов, приводов или механизмов со «свободным» ротором, который не имеет механических опор, наиболее сложной и принципиальной является научно-техническая задача обеспечения статической и динамической устойчивости ротора при передаче крутящего момента и выполнении полезной работы [1-5]. При вращении без или под воздействием заданной внешней (технологической) нагрузки, ротор должен сохранять устойчивое требуемое положение в рабочем пространстве машины на различных скоростных режимах, то есть обладать устойчивостью вращательного движения [6]. Для решения данной задачи необходимо установить общий принцип пространственного распределения действующих на ротор сил различной природы, определить методы расчёта и аналитические выражения для главного вектора и главного момента действующих сил (сил реакции, движущих сил, сил сопротивлений). Затем, на этой основе, сформулировать условия статической и динамической устойчивости роторов бесконтактных приводов, а имитационным моделированием и натурными экспериментами подтвердить основные полученные результаты [1, 2, 4, 5]. Таким образом, может быть обоснована возможность создания бесконтактных приводов вращения для машин различного назначения, разработаны основные принципы их создания.

4. Методика исследований, модели и основные результаты

Для разработки концепции создания бесконтактных приводов, рассмотрим их технико-технологические и конструктивные особенности. Они, с одной стороны, лежат в основе получаемых технических преимуществ машинами с бесконтактными приводами, а с другой стороны, требуют решения научно-технических задач обеспечения статической и динамической устойчивости роторов в условиях отсутствия механических опор и механических передач. В этом случае передача сил и моментов между узлами (детальными) привода, совершающими относительное движение, происходит полями сил при отсутствии твердотельного контакта. Перечислим основные из них [1, 5, 7-9]:

1. Вращающийся «свободный» ротор удерживается в пространстве силовым полем или несколькими полями сил различной природы, а технологическая нагрузка, приложенная по его кромкам или по поверхностям, может оказывать как стабилизирующее, так и дестабилизирующее действие. При этом главный момент движущих сил должен быть регулируемым и стабильным независимо от частоты вращения и положения ротора в поле сил, а главный вектор должен находиться в обратной связи со смещениями, вызванными различными возмущающими факторами.

2. «Свободный» ротор выполняет полезную работу и, одновременно, является вторичным элементом специальной электрической машины, газо- или гидростатических турбин и подшипников. Совмещение ротором функций опор и вторичных элементов движителей (электродвигателей и турбин) позволяет конструкцию привода и машины сделать более простой и компактной (рациональной).

3. Сокращение количества и массы движущихся узлов, испытывающих динамические нагрузки, исключение интенсивно изнашивающихся поверхностей, вследствие отсутствия механического контакта при движении, приводит к повышению уровня надёжности машин с бесконтактными приводами, снижению непроизводительных потерь, уменьшению потребляемой мощности машины при прочих равных условиях.

4. Передача мощности (вращающего момента) на ротор осуществляется силовыми полями различной природы и поэтому имеет мягкий демпфирующий характер. Благодаря этому исключаются соударения, значительно снижаются вибрационные нагрузки. Последние характерны для передаточных и исполнительных механизмов, так как вызваны колебаниями валов, карданных, ременных, фрикционных или зубчатых передач, дисбалансом шпиндельных узлов, шумом и биениями в подшипниках качения или скольжения и т.д.

5. Крутящий момент на ротор эффективно передаётся через любую не электропроводящую среду или стенку (стекло, воздух, жидкости, пластики, композитные материалы) поэтому ротор специальной электрической машины может совершать устойчивое вращение изолированно от внешней среды или остальной части машины (индуктора) и выполнять полезную работу, получая энергию посредством силового электродинамического поля через прочную и герметичную стенку.

6. В предельно простом случае «свободным» ротором бесконтактного привода может быть плоское кольцо из парамагнитного материала. Если нанести алмазный абразивный слой на его внутреннюю кромку, то кольцевой ротор превращается в режущий инструмент, который способен разрезать заготовки новым способом – «напроход». Если нанести абразивный слой на поверхности плоского кольца, то оно превращается в рабочий орган машины для зачистки внутренних поверхностей. Если же установить на одну из поверхностей лопатки, то ротор превращается в рабочее колесо центробежного насоса, компрессора, импеллера или сатуратора.

5. Анализ возможностей применения бесконтактных приводов со свободным ротором

Перечисленные технико-технологические и конструктивные особенности бесконтактных приводов со «свободным» ротором могут эффективно использоваться в машинах и устройствах различного назначения. Рассмотрим некоторые из них.

Сатураторы, импеллеры, машины для зачистки ёмкостей. Отсутствие передаточного механизма и устойчивое вращение ротора без вала позволяет осуществлять его управляемое плоскопараллельное движение через герметичную стенку, как показано на рисунке 1.

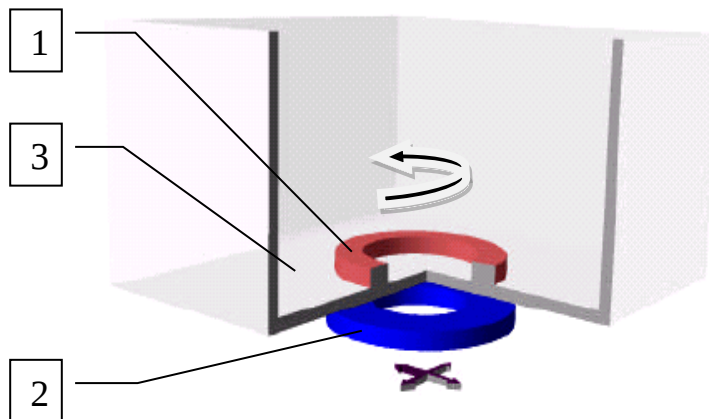


Рисунок 1. Работа, выполняемая вращающимся «свободным» ротором в замкнутом изолированном объёме

Свободный ротор 1 изолирован от индуктора силового поля 2 и совершает полезную работу (обработка поверхности, перемешивание содержимого ёмкости) в изолированном объёме 3 [1].

Вторым важным направлением применения бесконтактных приводов со «свободным» ротором являются динамические насосы и компрессоры. Основой работы данных машин является устойчивое вращательное движение кольцевого ротора в перекачиваемой среде, который снабжён лопатками (лопастями) расчётного профиля. В этом случае ротор будет в рабочем пространстве машины создавать поток жидкости или газа. Его важным техническим преимуществом является отсутствие вала с муфтами, уплотнениями и механическими передачами. Данную конструкцию принято называть «безвальной». На рисунке 2 показана конструкция центробежного (динамического) насоса с рабочим колесом без механических опор [1, 5].

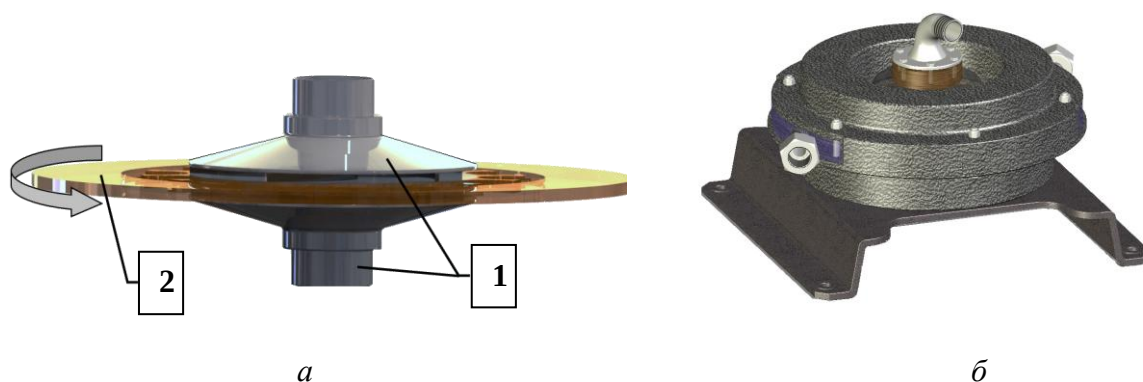


Рисунок 2. Ротор динамического насоса новой конструкции (а) и его 3D-модель (б): 1 – сдвоенное центробежное колесо; 2 – кольцевой ротор

В насосе сдвоенное центробежное колесо закреплено в центре кольцевого ротора (рисунок 2, а). Последний совмещает в себе функции системы опор и вторичного элемента электродвигателя, а весь вращающийся узел состоит из сдвоенного центробежного колеса и неподвижно соединённого с ним спицами кольцевого медного ротора.

Другим вариантом конструкции безвального динамического насоса является центробежно-вихревой насос, показанный на рисунке 3 [1, 5].

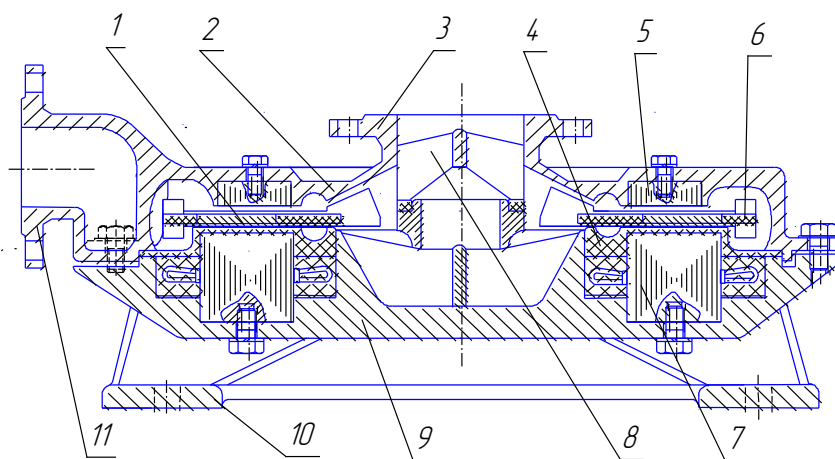


Рисунок 3. Центробежно-вихревой насос с рабочим колесом – «свободным» кольцевым ротором: 1 – рабочее колесо с кольцевым ротором; 2 – крышка насоса; 3 – фланец по подающей магистрали; 4 – пластиковый изолирующий колпак; 5 – дополнительный магнитопровод; 6 – лопасти рабочего колеса; 7 – индуктор силового поля; 8 – входной патрубок; 9 – корпус; 10 – крепление корпуса; 11 – фланец выходной горловины

Его рабочее колесо имеет внутреннюю центробежную часть и наружную вихревую. Медный кольцевой ротор находится внутри рабочего колеса, изготовленного из полимерного материала.

В радиальном направлении рабочие колёса центробежно-вихревого и динамического насосов удерживаются электродинамическими силами, действующими на кольцевой ротор, а в осевом направлении обтекающий поток создаёт условные (не выделенные конструктивно) гидродинамические опоры, исключая механический контакт между рабочими колёсами и корпусами насосов. Показанные на рисунках 2 и 3 насосы имеют ряд технических и эксплуатационных преимуществ:

- единственной движущейся деталью в насосах является рабочее колесо, содержащее кольцевой ротор и совершающее устойчивое вращение в силовом поле в жидкой среде без механической передачи вращающего момента;
- в конструкции насосов отсутствуют шарикоподшипниковые узлы;
- насосы не имеют вала и уплотнений по движущимся поверхностям (манжет, сальников, щелевых или торцевых уплотнений);
- высокая герметичность внутреннего рабочего пространства позволяют использовать безвальные насосы в качестве погружных или для безопасной перекачки особо опасных (ядовитых) жидкостей;

- высокая надёжность, так как основная часть (более 70 %) отказов динамических насосов связана с неисправностью подшипников или уплотнений по валу, более низкий уровень вибраций и шума;

- простота конструкции, что обеспечивает снижение себестоимости безвальных насосов с роторами без механических опор;

- удобство в эксплуатации и снижение эксплуатационных затрат, так как существенно облегчается ремонт и техническое обслуживание;

Адекватность и техническая реализуемость концепции создания насосов, компрессоров с роторами без механических опор была проверена в натурном эксперименте. Ротор, конструкция которого состоит из двух кольцевых пластин (аналогично ротору 2 на рисунке 2, *а*) [1] с размещёнными между ними лопатками, в эксперименте был помещён в ёмкость с водой и раскручивался. При вращении он создавал поток перекачиваемой жидкости от центра к периферии ёмкости и сохранял свою устойчивость при смещениях ёмкости во время вращения (рисунок 4).

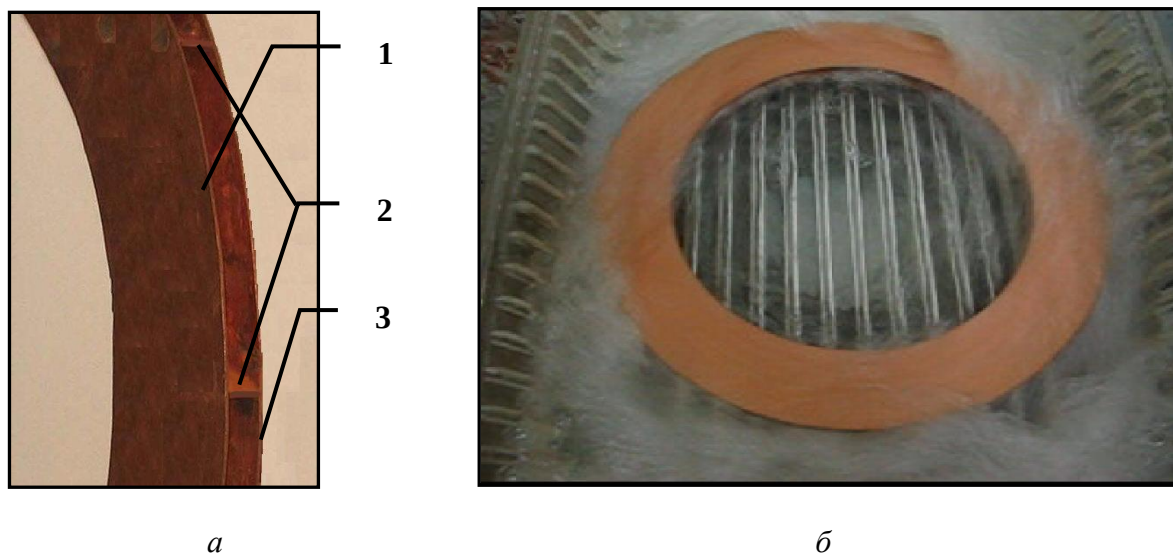


Рисунок 4. Конструкция рабочего колеса (*а*) с кольцевыми медными пластинами 1 и 3, лопатками 2 и его устойчивое вращение (*б*) в ёмкости с водой

Третьим применением привода с кольцевым ротором без механических опор является резка монокристаллов. В этом случае «свободный» кольцевой ротор используется в качестве алмазного круга с внутренней режущей кромкой (АКВР). Бесконтактный привод кольцевого ротора позволяет создавать станки резки полупроводниковых монокристаллов на совершенно новом техническом уровне, когда фактически отсутствует массивный шпиндельный узел (так называемая бесшпиндельная конструкция), а инструмент устойчиво вращается за счёт пондеромоторного действия вращающегося силового электромагнитного поля и сил сопротивлений.

Схема узла резания бесшпиндельного станка резки показана на рисунке 5. «Свободный» кольцевой ротор 1 имеет внутреннюю алмазную режущую кромку и вращается без механических опор и электрических контактов в силовом вращающемся электромагнитном поле индуктора 2, внутренней кромкой ротор режет полупроводниковый монокристалл 3 на пластины 4. Резка происходит более

эффективным способом – «напроход», что позволяет уменьшить размеры инструмента примерно в 2 раза, а массу вращающихся деталей примерно в 100...150 и более раз.

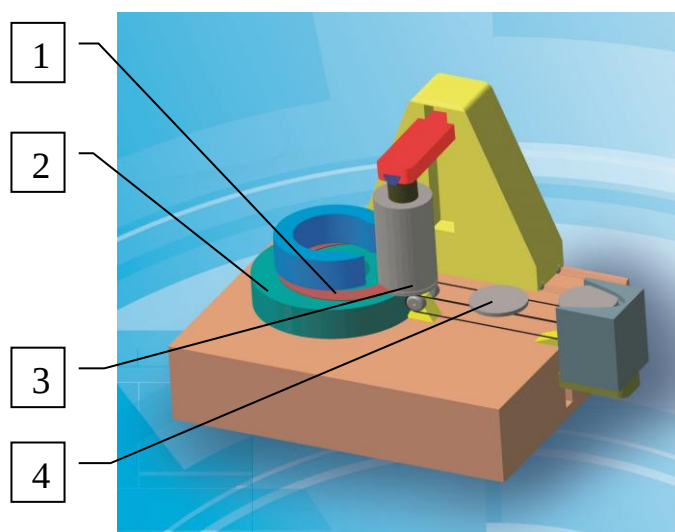


Рисунок 5. Резка монокристаллов на проход свободным кольцевым ротором в бесшпиндельном станке резки

Разработанный и изготовленный действующий экспериментальный макет станка резки монокристаллов показан на рисунке 6 [1, 7, 9].

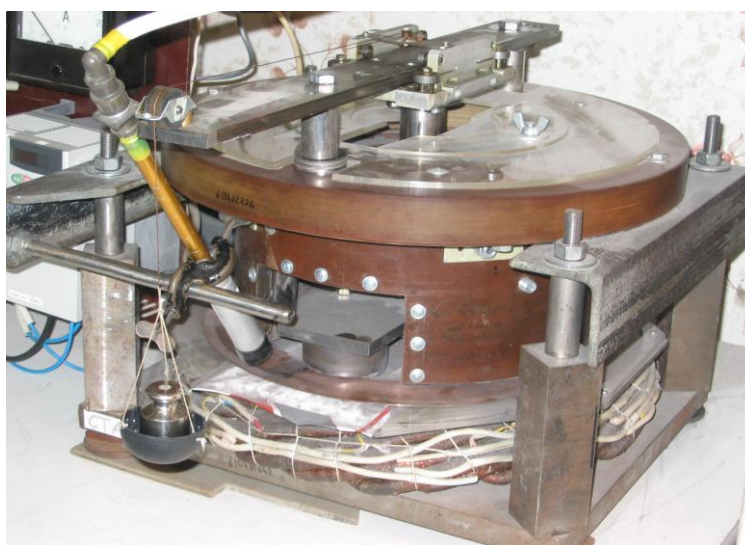


Рисунок 6. Экспериментальный макет станка резки с бесконтактным приводом алмазного круга

Применение алмазного круга без механических опор и электрических контактов при резке монокристаллов позволяет добиться снижения массы станка резки примерно в 7-10 раз, уменьшить энергопотребление станка в 3-4 раза, фактически снять ограничения на размеры по диаметру разрезаемых слитков, которые характерны для станков резки с помощью АКВР традиционной конструкции.

6. Заключение

1. Разработана обобщённая концепция создания бесконтактных приводов вращения для машин различного назначения – станков резки и шлифования, безвальных динамических насосов, импеллеров и сатураторов. В таких приводах кольцевой ротор вращается без механических опор, механических передач и электрических контактов, поэтому условно такие приводы можно считать бесконтактными, а сам ротор – «свободным».

2. Бесконтактные приводы вращения, за счёт исключения механического контакта между движущимися и неподвижными узлами, являются наиболее высокоскоростными, ресурсо- и энергосберегающими, обладают высокой производительностью, надёжностью и долговечностью.

3. Представлены результаты исследования технико-технологических преимуществ и конструктивных особенностей бесконтактных приводов с кольцевыми роторами. Проанализированы и показаны варианты их конструкций и эффективного применения в машинах для зачистки ёмкостей, в центробежно-вихревых и центробежных безвальных насосах, бесшпиндельных станках резки монокристаллов на пластины.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Брешев, В. Е. Приводы машин с кольцевыми рабочими органами без механических опор: монография / В. Е. Брешев, С. В. Шевченко – Луганск: Изд-во ЛНУ им. В. Даля, 2017. – 186 с.
2. Brian Rowe, W. Hydrostatic, Aerostatic, and Hybrid Bearing Design / W. Brian Rowe. – Oxford, 2012 – 334 p.
3. Брешев, В. Е. Анализ технических преимуществ применения аэростатических опор в шпинделях технологических машин / В. Е. Брешев // Вестник ЛГУ им. В. Даля. – 2023. – № 7(73). – С. 141–145.
4. Wiley, J. Air Bearings. Theory, Design and Applications / J. Wiley. – Farid Al-Bender KU Leuven, Department of Mechanical Engineering Leuven Belgium, 2021. – 595 p.
5. Брешев, В. Е. Развитие теории и методов проектирования приводов бесконтактного типа с комбинированным и пассивным обеспечением устойчивости: монография / В. Е. Брешев. – Луганск: Изд-во ЛГУ им. В. Даля, 2016. – 208 с.
6. Брешев, В. Е. Алгоритм исследования динамических процессов в технологическом оборудовании на газостатических подшипниках / В. Е. Брешев, Ю. С. Долженко // Транспортное машиностроение. – 2025. – №1(37). – С. 6-14.
7. Ерошин, С. С. Повышение эффективности машин применением рабочих органов без механических опор / С. С. Ерошин, В. Е. Брешев // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2005. – №5(17). – С. 82–85.
8. Pavel Nosko. The concept of creating non-contact drive for working bodies in machines of various purpose / Pavel Nosko, Vladimir Breshev, Pavel Fil // Polish Academy of sciences in Lublin TEKA Commission of motorization in agriculture. Vol. VIIIA. – Lublin, 2008. – P. 126–133.
9. Брешев, В. Е. Многопараметрический синтез бесконтактных приводов с кольцевыми роторами для рабочих машин / В. Е. Брешев // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении: Науч. журнал. – Луганск: Изд-во ЛГУ им. В. Даля, 2025. – № 1(46). – С. 58–73.

Поступила в редколлегию 11.04.2025 г.

УДК 621.78:535.211

В. С. Голубев, И. И. Вегера, В. Г. Залесский, С. Н. Соколов, А. Н. Миряха

Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь;

ООО «Научно-Производственное Предприятие «Инжект», г. Саратов, РФ.

Тел.: +375 (029) 638-19-50, E-mail: gvs_fti@mail.ru

ИНЖЕНЕРИЯ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОЩНОГО ДИОДНОГО ЛАЗЕРА

Исследованы особенности проведения операций наплавки, модифицирования и легирования на поверхностях стальных образцов с использованием излучения мощного диодного лазера. Широкополосная лазерная наплавка осуществлялась с использованием порошка нержавеющей стали 20X13 и твердосплавного порошка на никелевой основе ZTC-60WCS. Апробирована возможность оплавления аналогичного твердосплавного порошка T-Термо 660, нанесенного в виде шликерной обмазки толщиной ~ 200 мкм. В качестве легирующих материалов в данных экспериментах использовались порошки карбидов В₄С и WС.

Ключевые слова: лазерное легирование, модифицирование, наплавка, поверхностный слой, микроструктура, микротвердость.

V. S. Golubev, I. I. Vegera, V. G. Zalessky, S. N. Sokolov, A. N. Miryakha

SURFACE ENGINEERING OF METALLIC MATERIALS USING A HIGH POWER DIODE LASER

The features of surfacing, modification and alloying operations on the surfaces of steel samples using radiation from a powerful diode laser are investigated. Broadband laser surfacing was carried out using 20X13 stainless steel powder and ZTS-60WCS nickel-based carbide powder. The possibility of melting a similar T-Thermo 660 carbide powder applied in the form of a slip coating with a thickness of ~ 200 μm was tested. B₄C and WC carbide powders were used as alloying materials in these experiments.

Keywords: laser alloying, modification, surfacing, surface layer, microstructure, microhardness.

1. Введение

В последние годы в результате разработки мощных волоконных, диодных, а ранее СО₂ – лазеров, появились возможности развивать различные технологии обработки материалов лазерным излучением [1-8]. Например, сегодня технология лазерного термоупрочнения прямым излучением полупроводникового лазера активно развивается за рубежом и применяется в различных ведущих отраслях промышленности – автомобильной, оборонной, авиационно-космической, судостроении, транспортном машиностроении др. Однако зарубежные лазерные технологические установки и соответствующие полупроводниковые лазеры запрещены к экспорту в Россию действующими санкциями со стороны недружественных стран.

В связи с этим сегодня ООО «Научно-Производственное Предприятие «Инжект» (г. Саратов) активно участвует в разработке и производстве оптоэлектронных компонент - полупроводниковых лазеров, суперлюминесцентных диодов, фотодиодов и др. НПП «Инжект» имеет производственную линию полного цикла изготовления лазерных полупроводниковых излучателей от изготовления полупроводниковых гетероструктур до испытания готовых изделий. В ООО «НПП «Инжект» к настоящему времени разработан и серийно выпускается мощный отечественный полупроводниковый технологический лазер PLD-6. Лазер получил диплом лауреата на Всероссийском конкурсе программы «100 лучших товаров России». Диплом № 2022640101501, декларация соответствия ЕАЭС N RU Д-RU.PA01.B.41144/21 от 08.10.2021г. В ноябре 2023 г. ООО «НПП «Инжект» награжден дипломом победителя

конкурса AMTEXPO AWARDS-2023 в номинации «Научные разработки в области новых материалов и технологий». Следует отметить, что разработанный в Саратове лазер практически не имеет аналогов в России и за рубежом. В этой связи в настоящей работе исследовались особенности проведения таких операций как наплавка, модифицирование и легирование на поверхностях стальных образцов с использованием излучения указанного мощного диодного лазера.

2. Материалы и методики исследований

Образцы для исследования вырезались из листов конструкционной стали типа 40Х толщиной ~ 15 - 20 мм. В подготовке образцов и последующем их изучении принимали участие специалисты в области лазерных технологий Физико-технического института НАН Беларуси. Обработка образцов проводилась на экспериментальной базе ООО «НПП «Инжект» на технологическом лазере PLD-6. Широкополосная лазерная наплавка осуществлялась с использованием порошка нержавеющей стали 20Х13 и твердосплавного порошка на никелевой основе 3ТС-60WCS.

Порошок 3ТС-60WC на основе NiCrSiFeB с добавкой карбида вольфрама WC 60% предназначен для газо-термической порошковой наплавки газовыми горелками. Грануламетрия порошка: 20-100 мкм, грануламетрия WC: 40-120 мкм, форма гранул сферичная, наплавка возможна на стали и чугуны. Покрытия, получаемые после наплавки данного порошка, имеют исключительные износостойкие характеристики в средах абразива, коррозии, эрозии, удара, трения, термических нагрузок, давления. Апробирована также возможность оплавления аналогичного твердосплавного порошка Т-Термо 660, нанесенного в виде шликерной обмазки толщиной ~ 200 мкм на рабочие поверхности измельчающих ножей кормоуборочного комбайна КВК-800 производства ПО «Гомсельмаш». В качестве легирующих материалов в данных экспериментах использовались порошки карбидов В₄С и WC. Предварительно перед лазерной обработкой на поверхности формировали слой, нанося на нее обмазку из вышеуказанных порошков. Толщина слоя составляла ~100 - 150 мкм. В качестве защитного газа при осуществлении процесса легирования использовался аргон. Измерения микротвердости проводились на микротвердомере ПМТ-3, для микроструктурного анализа использовался оптический микроскоп NEOPHOT-2. Элементный состав, морфология поверхности изучались с использованием сканирующего электронного микроскопа «Mira» (фирмы «Tescan»- Чехия) с микрорентгеноспектральным анализатором «INCA Energy 350» (фирмы «Oxford Instruments Analytical»-Великобритания). Погрешность указанного метода измерения весьма высока и составляет 3-5 %.

Для обработки образцов применялся полупроводниковый технологический лазер PLD-6 с выходной мощностью 6 кВт. Лазер полупроводниковый технологический PLD-6 предназначен для генерации лазерного излучения и формирования оптического пучка при использовании в составе технологических комплексов. В состав лазера входят 40 полупроводниковых инжекционных модулей с выводом излучения на световод через оптический соединитель типа SMA 905, 40 блоков питания, блок управления. Лазерное излучение по оптическому жгуту поступает в оптическую головку и через систему линз направляется непосредственно в рабочую зону. Лазер PLD-6 имеет оригинальную конструкцию – это многолучевой лазер, с индивидуальной регулировкой мощности излучения в лучах лазера для конфигурирования лазерной мощности в пятне лазерного воздействия.

Лазер имеет следующие технические характеристики: мощность лазерного излучения, 6 кВт; потребляемая мощность, 20 кВт; пределы регулирования мощности лазерного излучения, 10-100 %; длина волны лазерного излучения в диапазоне, 760-980 нм; габариты блока излучателей (Д x В x Ш), 1072 x 1560 x 74 мм; масса лазера, 500 кг.



а)



б)

Рисунок 1. а – Полупроводниковый лазер PLD-6; б – Широкополосная наплавка с использованием лазера PLD.

Габариты оптической головки (без волоконного кабеля и крепления), Ø 137 x 674 мм. В отличие от широко распространенных волоконных лазеров лазер имеет широкую прямоугольную форму пятна в зоне лазерного воздействия на поверхности детали с размерами ~ от 22x2.

3. Результаты исследований и обсуждение

Лазерное оплавление поверхностного слоя, как известно [1-8], дает возможность осуществления таких процессов, как лазерная наплавка, модифицирование и легирование. Причем модифицирование по существу является промежуточным процессом между наплавкой и легированием, при этом глубина упрочненного слоя под поверхностью и толщина наплавленного над поверхностью невелики (~ 0,1-0,2 мм). При этом присадочные материалы могут наноситься на поверхность инъекцией их в расплав, создаваемый лазерным лучом, газотермическим напылением покрытия, шликерной обмазкой и другими способами. Указанные методы позволяют насыщать поверхностные слои деталей простыми и сложными компонентами и в конечном итоге формировать широкую гамму поверхностных структур. В этой связи цель настоящих экспериментов и состояла в изучении особенностей осуществления всех этих трех вышеуказанных процессов с использованием мощного полупроводникового лазера.

На рисунке 2 а изображена пластина с наплавленными дорожками в один и два слоя.



а)



б)

Рисунок 2. Внешний вид лазерной наплавки порошка: а – 20X13; б – 3ТС - 60WCS порошка стали 20X13.

Толщина слоя наплавки составляла соответственно ~ 1 и $1,8$ мм, твердость слоя наплавки достигала ~ 45 HRC. Структура наплавленного слоя имела характерный для такого процесса мелкодисперсно-дендритный вид, фазовый состав состоял из мартенсита и остаточного аустенита с выделениями мелкодисперсных исходных карбидов хрома.

На рисунке 2 б изображена пластина с наплавленным слоем толщиной $\sim 1,0$ мм твердосплавного порошка на никелевой основе 3TC-60WCS с концентрацией карбида вольфрама 60%. Твердость наплавки достигала $\sim 60-65$ HRC. На рисунке 3 показаны микроструктуры на поперечном шлифе по всей глубине слоя (3 а) и на одном из его участков (3 б, в).

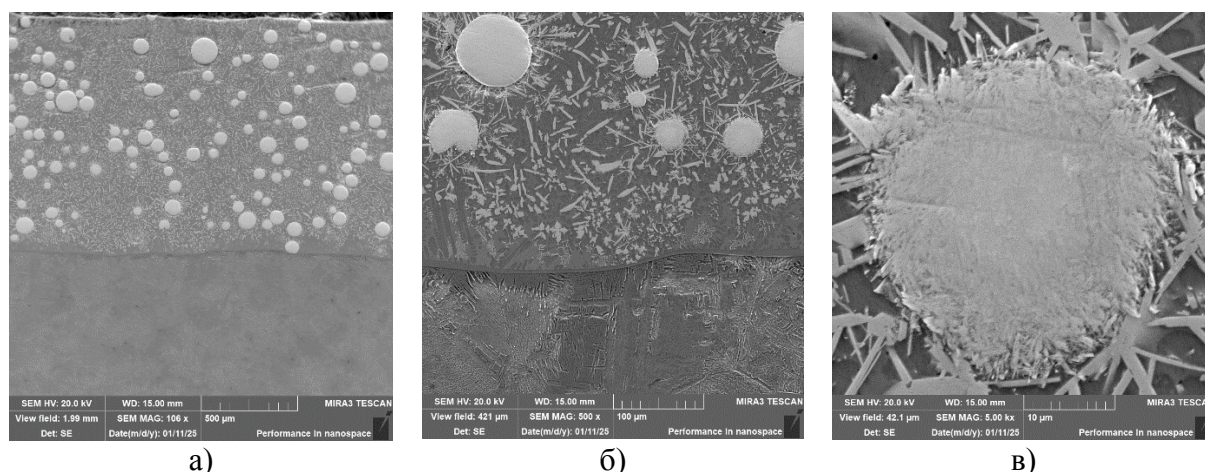
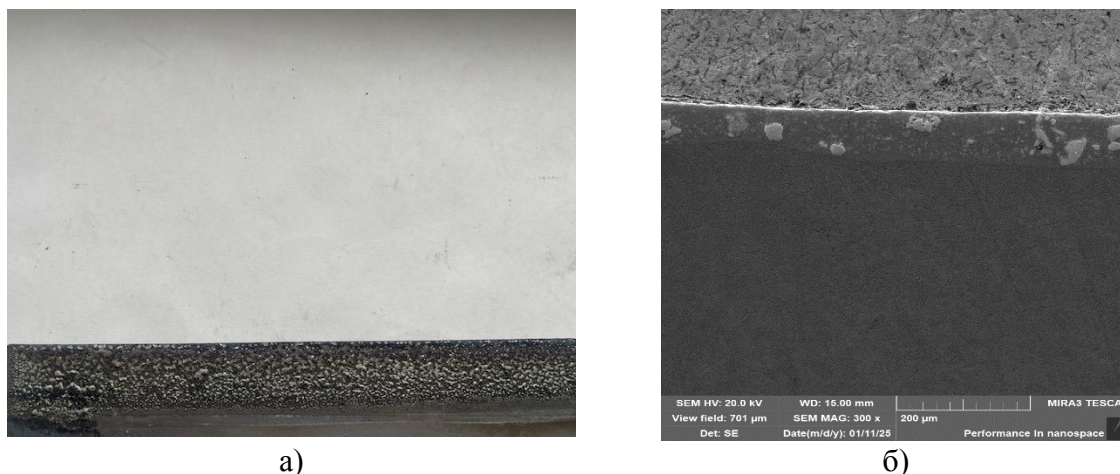


Рисунок 3. Микроструктуры наплавленного слоя порошка 3TC-60WCS с различным увеличением: а – по всей толщине; б - на одном из его участков; в – отдельная частица WC.

Видно, что структура имеет мелкодисперсный характер с сохранением округлых не до конца растворившихся исходных частиц карбидов вольфрама. Их твердость была на уровне $\sim 19000 - 20000$ МПа. Как показано [8], микроструктура наплавленных лазером сплавов существенно отличается от микроструктуры слоев, полученных другими методами (ТВЧ, вакуумной дуги, плазменной струи). Наиболее полно исследована микроструктура сплавов системы NiCrBSi, наплавленных с помощью лазерного излучения и нанесенных другими методами. Фазовый состав этих покрытий во всех случаях близок, в покрытиях обнаруживаются следующие основные фазы: γ -фаза, Ni_3B , карбиды и бориды хрома, зафиксировано также наличие силицида никеля Ni_5Si_2 . При этом на микроструктуре в большинстве случаев видна пластинчатая эвтектика $[\gamma + \text{Ni}_3\text{B}]$, в ее состав может входить также борид CrB , кроме того, возможно образование эвтектики $[\gamma + \text{Cr}_7\text{C}_3]$. В случае лазерной наплавки дифракционные линии отличаются большей размытостью, что может свидетельствовать о повышенной плотности дислокаций и измельчении зерна. Отметим также, что при лазерной наплавке упрочняющие фазы могут иметь свои морфологические особенности. В структуре наплавленных слоев [8], могут присутствовать глобулярные, линейчатые или звездчатые фрагменты. Например, линейчатые фрагменты характерны для карбидов хрома, а звездчатые дендриты - для боридов железа, тогда как глобулярные характерны и для боридов, и для карбидов железа и хрома.

Таким образом из анализа полученных результатов следует, что технология наплавки с использованием указанного мощного диодного лазера может уже быть успешно применена при необходимости создания широких и протяженных износостойких слоев с толщиной слоя 1-2 мм. О возможностях такой наплавки проинформированы специалисты ряда предприятий сельскохозяйственного машиностроения Республики Беларусь. Предполагается, например, провести эксперименты по такой наплавке на выпускаемых в республике деталях плугов и других быстроизнашивающихся деталях рабочих органов сельхозмашин.

Была также апробирована возможность модифицирования, в частности, нанесения достаточно тонкого (0,1-0,2 мм) износостойкого слоя с использованием порошка Т-Термо 660 (никелевая основа с добавкой также 60% карбида вольфрама) на рабочие поверхности измельчающих ножей к кормоуборочному комбайну КВК-800 производства ПО «Гомсельмаш» (рисунок 4). Данный порошок выпускается другим производителем, аналогичен по составу порошку ЗТС-60WCS, и в отличие от последнего, частицы карбида вольфрама в нем не имеют округлого вида.



а) Внешний вид рабочей поверхности измельчающего ножа к кормоуборочному комбайну КВК-800 с наплавкой порошком Т-Термо 660;
б) Микроструктура наплавленного слоя на поперечном шлифе рабочей поверхности кормоуборочного комбайна КВК – 800.

Было апробировано несколько режимов оплавления предварительно нанесенных на рабочие поверхности ножей слоев шликерной обмазки из указанного порошка. На рисунке 4а приведен внешний вид наиболее приемлемого оплавленного слоя, толщина которого составляла ~ 100 мкм. На рисунке 4, б показана микроструктура такого слоя по глубине. В целом результаты по структуре, фазовому составу и микротвердости были близки результатам по наплавке порошка ЗТС-60WCS. Однако исходные частицы, судя по анализу результатов микрорентгеноспектрального элементного состава (Рисунок 5), представляют собой конгломерат непосредственно вольфрама и его карбида (W-WC). Что может быть связано с особенностями метода производства указанного порошка, когда не весь вольфрам успевает прореагировать с образованием его карбида.

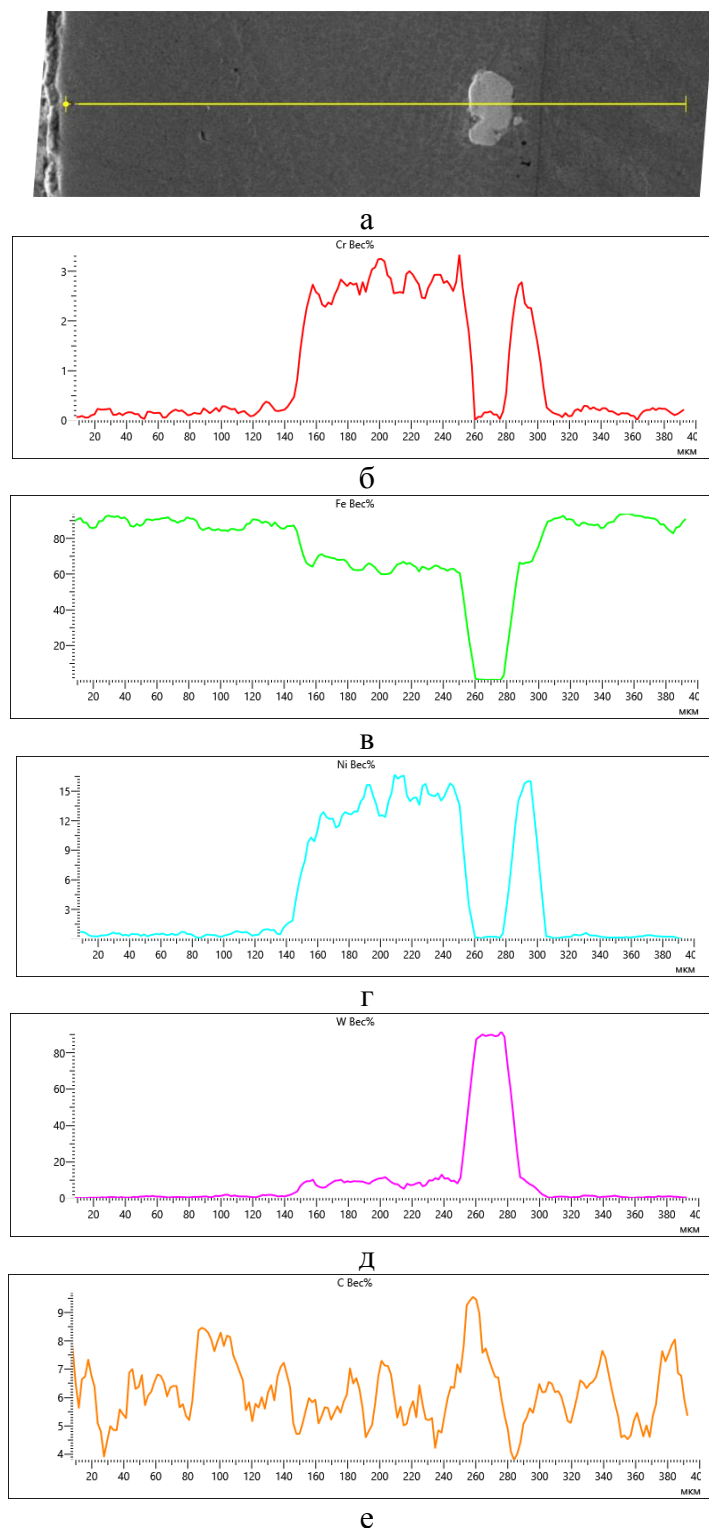


Рисунок 5. Результаты микрорентгеноспектрального анализа распределения элементов по глубине наплавленного слоя порошка Т-Термо 660 на рабочую поверхность измельчающего ножа кормоуборочного комбайна КВК-800: а – микроструктура слоя; б-е – распределение различных элементов.

Тем не менее есть основания считать, что выбранные в данных экспериментах режимы не являются оптимальными с точки зрения решения задачи создания на

рабочих поверхностях такого рода ножей качественных износостойких слоев. Это было связано с тем, что при выбранных режимах на поверхности деталей могло наблюдаться частичное сворачивание расплава в мелкодисперсные капли. Причиной такого поведения расплава, по-видимому, является недостаточная температура его нагрева. Это в свою очередь, по-видимому, связано с достаточно большими размерами зоны фокусировки лазерного излучения (22x2 мм) и соответственно с не очень высокой его плотностью на поверхности. При этом лазерную обработку приходилось вести с более низкими скоростями сканирования луча, что способствовало более глубокому прогреву непосредственно основы делали. Кроме того, следует учитывать особенности такого рода применяемых порошков, представляющих собой механическую смесь за счет добавления частиц карбида вольфрама. Следует отметить, что температура плавления непосредственно NiCrSiB основы используемого порошка составляет $\sim 1050^{\circ}\text{C}$, тогда как температура плавления частиц добавленного карбида вольфрама WC составляет $\sim 2780^{\circ}\text{C}$. Поэтому было бы более целесообразным в этих случаях проводить обработку с более высокими интенсивностями излучения, достигая при этом более высоких температур нагрева применяемого порошка. В этой связи сделан вывод о необходимости продолжения данных экспериментов с использованием мощного диодного лазера с точки зрения оптимизации режимов обработки как по оплавлению предварительно нанесенных, так и по непосредственному нанесению достаточно тонких износостойких слоев ($\sim 0,2$ мм) на рабочие поверхности клинообразных быстроизнашивающихся сельскохозяйственных деталей типа выше указанных ножей.

Что касается лазерного поверхностного легирования, то осуществление такого процесса открывает возможности дополнительного повышения большого ряда или всего комплекса свойств сталей и сплавов: таких как твердость, теплостойкость, коррозионная и жаростойкость, жаропрочность и другие [1-8]. Применяемые в экспериментах химические соединения в качестве легирующих компонентов обладают набором ряда важных свойств. В частности, карбиды металлов помимо высокой твердости, износостойкости, температуры плавления обладают и высокой устойчивостью к взаимодействию с другими химическими веществами. Это же характерно и для боридов, обладающих также высокой твердостью, химической стойкостью, тугоплавкостью. Для них характерно такое свойство, как металлоподобность, то есть они могут обладать высокой электро- и теплопроводностью, магнитными свойствами. Благодаря своей высокой твердости и инертности бориды наравне с карбидами при использовании метода лазерного легирования весьма успешно могут применяться при создании на поверхностях стандартных сталей достаточно глубоких слоев со свойствами необходимых инструментальных сталей, твердых сплавов и т.д. Которые могут находить применение при производстве современных высокоэффективных режущих и абразивных инструментов для различных областей народного хозяйства. Метод лазерного легирования может быть также эффективным для создания жаропрочных и жаростойких поверхностей изделий в энергетической, электротехнической, приборостроительной, авиационно-космической и другой технике.

В настоящих экспериментах, также как отмечалось выше при наплавке, в зоне расплава формировалась мелкозернистая гетерофазная структура, в зависимости от режимов с включениями исходных легирующих или дополнительно выделенных фаз. Микротвердость при использовании WC и W_4C в зоне легирования варьировалась соответственно в диапазоне 4000 – 8000 МПа, 8500 – 12000 МПа. Аналогичные результаты наблюдались нами также при использовании для легирования излучения

волоконного лазера мощностью 2 кВт. Ранее [5] нами было показано, что при соответствующей более острой фокусировке излучения волоконного лазера при диаметре кругового пятна ≤ 1 мм глубина легированного слоя может достигать $\sim 1 - 4$ мм, при этом время лазерного воздействия при такой обработке составляло не более 0,3 сек. Особенность обработки в этом случае состояла в том, что для ряда порошков в основных режимах лазерного воздействия шероховатость поверхности была достаточно небольшой на уровне $R_{\max} \leq 50$ мкм. Это позволяло сохранять достаточную толщину упрочненного слоя при последующей механической обработке. В то же время при осуществлении процесса легирования в настоящих экспериментах с применением диодного лазера наблюдалось значительное изменение профиля обработанной поверхности. Перепад максимальных высот пика и впадины профиля мог достигать 1-2 мм.

Как известно [2, 4], вследствие термо-капиллярного эффекта в процессе лазерного легирования происходит конвективный массоперенос в зоне расплавления основного металла, перемешивание и последующее диффузионное перераспределение легирующих элементов. При этом, например, в отличие от обычной химико-термической обработки при лазерном легировании появляется возможность достигать весьма высоких концентраций легирующих компонентов. Такая особенность проведения процесса легирования при использовании диодного лазера, по всей вероятности, связаны с теми же причинами, которые обсуждались выше относительно процесса модифицирования рабочих поверхностей ножей сельскохозяйственного назначения. Это невысокие значения плотности мощности падающего излучения вследствие высоких значений площади его фокусировки. Это в свою очередь сказывается не только на температуре нагрева расплава, но на его вязкости, уровне термо-капиллярных натяжений и на динамике происходящих в нем конвекционных процессов. В этих случаях, по-видимому, было бы целесообразно уменьшать площадь фокусировки падающего излучения, например, за счет уменьшения ширины с 2 до 0,5 мм и менее.

4. Заключение

Лазерная наплавка, в том числе с использованием диодного лазера, принципиально может осуществляться с использованием широкой гаммы порошков металлов и сплавов, разработанных и успешно применяемых для газотермических и плазменных методов напыления и наплавки. В первую очередь, это самофлюсующиеся порошки, например, на никелевой и железной основах, в том числе с карбидом вольфрама и другими весьма твердыми и износостойкими компонентами, порошки на стальной основе различного технологического применения. Большую перспективу для наплавки могут представлять также порошки на основе цветных металлов и сплавов, в частности, медных, алюминиевых, титановых и других сплавов.

Оптимизация применения полупроводникового технологического лазера с целью модифицирования и легирования поверхности различных сталей и сплавов, лазерных технологий автоматизированной обработки материалов может обеспечить импортозамещение, сформирует основу для широкого внедрения лазерных технологий в массовое машиностроительное производства деталей. Внедрение технологий обработки материалов излучением диодных лазеров в промышленности приведет к повышению комплекса поверхностных свойств, в целом ресурса деталей и техники, росту качества и конкурентоспособности продукции отечественного машиностроения.

В целом, при использовании лазерных методов обработки материалов повышается культура производства и увеличивается производительность; реализуется

автоматизированное производство, снижаются производственные дефекты. Возрастает также надежность и повторяемость процесса, что обеспечивает повышение конкурентных преимуществ производителя. Имеется возможность программирования, компьютерного моделирования и оптимизации технологического процесса, что сокращает время подготовки производства и издержки внедрения технологического процесса производства изделий, различающихся по конструкции.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Астапчик, С. А. Лазерные технологии в машиностроении и металлообработке / С. А. Астапчик, В. С. Голубев, А. Г. Маклаков. – Минск: Белорусская наука, 2008. – 252 с.
2. Григорьянц, А. Г. Технологические процессы лазерной обработки / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров; под ред. А. Г. Григорьянца. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. – 664 с.
3. Астапчик, С. А. Лазерные технологии: возможности и перспективы обработки деталей и инструмента / С. А. Астапчик, В. С. Голубев, А. Г. Маклаков // Тяжелое машиностроение. – 2004, № 2. – С. 33–37.
4. Бернацкий, А. В. Лазерное поверхностное легирование стальных изделий (Обзор) / А. В. Бернацкий // Автоматическая сварка. – 2013, № 12. – С. 3 – 10.
5. В. С. Голубев, И. И. Вегера, В. Е. Ходюш, О. В. Дьяченко, К. В. Протасевич. Поверхностное легирование стали Hardox 600 с использованием волоконного лазера. В сб. трудов XV межд. н.-т. конференции «Современные методы и технологии создания и обработки материалов», ФТИ НАН Беларуси, Минск, 2023, с. 72-84
6. В. С. Голубев, И. И. Вегера, О. Чернашеюс, В. В. Чаевский. Лазерная обработка материалов с изменением химического состава поверхностного слоя. / Вестник БарГУ, сер. Технические науки – 2019, Т.7. – С.34-42
7. В. П. Бирюков, Я. А. Горюнов, А. Н. Миряха Определение механических и триботехнических характеристик покрытий при лазерной широкополосной наплавке сталей. Фотоника, Выпуск №2, 2025.
8. Тарасова, Т. В. Особенности формирования структуры наплавленных слоев при лазерной обработке / Т. В. Тарасова, В. С. Голубев, С. Д. Кузьмин // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2014. — № 9. — С. 26—30.

Поступила в редколлегию 15.04.2025 г.

УДК 621.787.4

С. А. Зайдес, д-р техн. наук, проф., **Т. Т. Ле**, аспирант.Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск,
РоссияТел./Факс: +7 9501235382; E-mail: lechung275@gmail.com

ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТАЦИИ УПРОЧНЁННЫХ ВОЛОКОН НА НАПРЯЖЁННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИ КРУЧЕНИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ

В статье исследуется влияние пространственной ориентации упрочнённых волокон, формируемых в результате поверхностного пластического деформирования, на напряжённое состояние цилиндрических образцов при кручении. Проведено численное моделирование в ANSYS для трёх углов наклона волокон: 0° , 45° и 90° . Установлено, что наклон под углом 45° обеспечивает наибольшую равномерность распределения касательных напряжений и максимальную прочность. При ориентации волокон вдоль оси (0°) наблюдается меньшая устойчивость, а при поперечном расположении (90°) — наименьшая. Результаты указывают на необходимость рационального выбора направления упрочнённой текстуры в зависимости от условий эксплуатации деталей.

Ключевые слова: упрочнённые волокна, напряжённое состояние, ANSYS, кручение, касательные напряжения, поверхностное упрочнение.

S.A. Zaides, T.C. Le

INFLUENCE OF STRENGTHENING FIBER ORIENTATION ON THE STRESS STATE DURING TORSION OF CYLINDRICAL SPECIMENS

This paper investigates the influence of the spatial orientation of strengthening fibers, formed by surface plastic deformation (SPD), on the stress state of cylindrical specimens under torsion. Numerical simulations were conducted in ANSYS for three fiber orientation angles: 0° , 45° , and 90° . It was found that a 45° inclination provides the most uniform distribution of shear stresses and the highest torsional strength. Fibers aligned along the axis (0°) exhibit lower resistance, while transverse orientation (90°) results in the weakest performance. The findings highlight the importance of selecting an optimal fiber orientation based on the operational conditions of the component.

Keywords: strengthening fibers, stress state, ANSYS, torsion, shear stress, surface hardening.

1. Введение

Повышение эксплуатационной надёжности цилиндрических деталей, работающих в условиях кручения, требует особого внимания к состоянию их поверхностного слоя. Одним из эффективных способов усиления внешней оболочки таких заготовок является формирование упрочнённой структуры с направленной текстурой путём поверхностного пластического деформирования (ППД). Направление волокон, возникающих в процессе ППД, способно существенно влиять на распределение напряжений, долговечность и устойчивость материала к разрушению [1, 2].

В большинстве известных исследований рассматривались волокна, ориентированные вдоль или поперёк оси, как правило, при растяжении, изгибе или контактных нагрузках [3, 4]. Однако поведение цилиндрических образцов при кручении с учётом пространственной ориентации упрочнённых волокон, особенно под наклонными углами к оси, на сегодняшний день изучено недостаточно. Между тем, именно при кручении возникает выраженная чувствительность напряжённого состояния к направлению структуры, связанная с характером скручивающих напряжений и формированием касательных деформаций [5, 6].

С учётом этого актуальной является задача количественной оценки влияния ориентации волокон на напряжённое состояние при кручении. Настоящая работа направлена на установление взаимосвязи между направлением упрочнённой текстуры и механическим поведением материала под действием крутящего момента на основе численного моделирования.

В связи с этим в настоящей работе реализовано конечно-элементное моделирование с использованием среды ANSYS, позволяющее количественно оценить влияние ориентации волокон на напряжённое состояние образцов.

2. Методика моделирования

Для исследования влияния ориентации упрочнённого слоя на напряжённое состояние цилиндрических образцов при кручении выполнено численное моделирование в среде ANSYS 23.2 [7, 8]. В модели упрочнённый слой представлен системой цилиндрических волокон диаметром d , плотно уложенных на поверхность основного стержня диаметром D под углами $\alpha = 0^\circ, 45^\circ$ и 90° относительно оси образца (рис. 1). Все волокна жёстко соединены между собой и с основным телом.

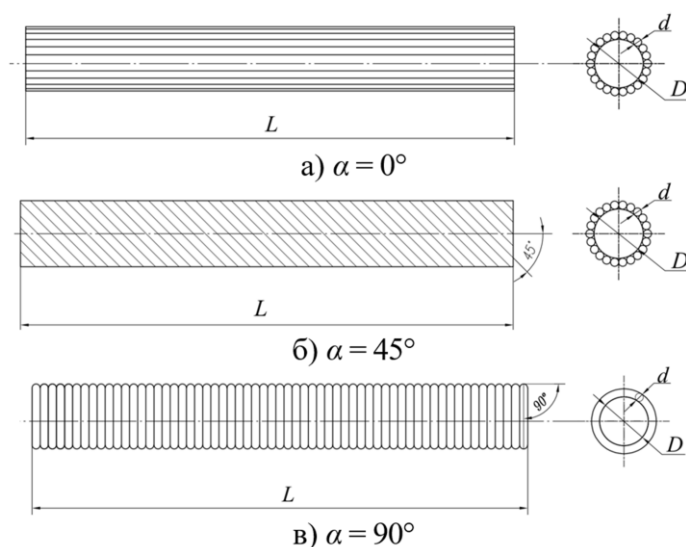


Рисунок 1. Схемы расположения упрочнённых волокон на поверхности цилиндрических заготовок

Характеристики образцов. В качестве заготовки использован цилиндр длиной $L = 300$ мм и диаметром $D = 30$ мм из стали 45 с упруго-пластическими свойствами: $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, $\mu = 0,3$, билинейная диаграмма (предел текучести при кручении $\tau_T = 206$ МПа, предел прочности при кручении $\tau_B = 348$ МПа, модуль упрочнения $E_T = 2000$ МПа). Упрочнённые волокна диаметром $d = 5$ мм выполнены из стали 50 с аналогичными параметрами (E, μ, E_T), но с более высокими пределами: $\tau_T = 216$ МПа, $\tau_B = 363$ МПа.

Нагружение осуществлялось крутящим моментом M , приложенным к одному концу, при жёстком закреплении другого. Сетка — тетраэдрическая с шагом 1 мм, включает 23500 конечных элементов и 124436 узлов. Контакт между волокнами — безззорный, без трения. Схема нагружения и конечно-элементная модель представлены на рис. 2.

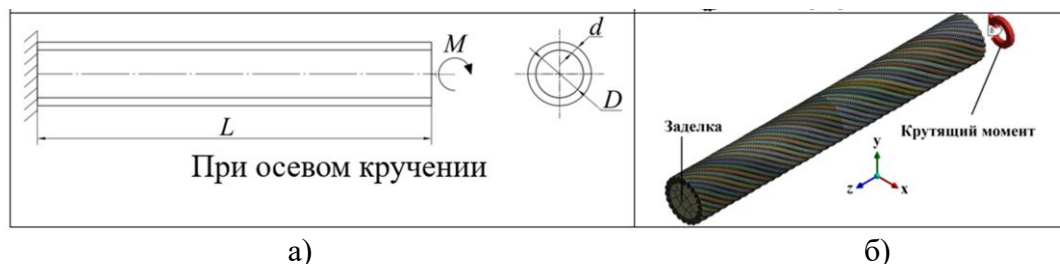


Рисунок 2. Схемы нагружения и конечно-элементные модели цилиндрических образцов

Для оценки напряжённого состояния при кручении цилиндрических образцов рассчитывалась интенсивность касательных напряжений по Мизесу (τ_i^{BP}) на плоскостях Oxy , Oyz и Oxz . Интенсивность определялась по выражению [9, 10]:

$$\tau_i^{BP} = \frac{1}{3} \sqrt{6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)} \quad (1)$$

Построенная модель позволила провести серию расчётов, результаты которых приведены ниже.

3. Результаты расчёта при кручении образцов

На рисунке 3 представлены распределения компонент касательных напряжений τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{xz} по радиусу поперечного сечения образцов при различных углах ориентации упрочнённых волокон α . При $\alpha = 0^\circ$ напряжение τ_{xz} возрастает до 190 МПа на расстоянии $R = 15$ мм, затем незначительно снижается. Компонента τ_{xy} изменяется от нуля в центре до -190 МПа на периферии, а τ_{yz} остаётся близкой к нулю по всей толщине.

При $\alpha = 45^\circ$ наблюдается равномерный рост τ_{xz} до 190 МПа при $R \approx 16,25$ мм, далее наблюдается лёгкое снижение. Компоненты τ_{xy} и τ_{yz} проявляют слабые колебания в приповерхностной зоне, что указывает на минимальное влияние наклонной ориентации волокон на деформацию сдвига.

При $\alpha = 90^\circ$ компонент τ_{xz} достигает 139 МПа при $R = 15$ мм, а τ_{xy} опускается до -100 МПа в той же области, что соответствует зоне геометрической неоднородности. Напряжения τ_{yz} остаются низкими.

Таким образом, максимальные значения касательных напряжений наблюдаются в зоне $R \approx 15$ мм, соответствующей внешнему слою упрочнения. Основной вклад в напряжённое состояние при кручении вносит компонент τ_{xz} , особенно выраженный при ориентации волокон под углами $\alpha = 0^\circ$ и 45° .

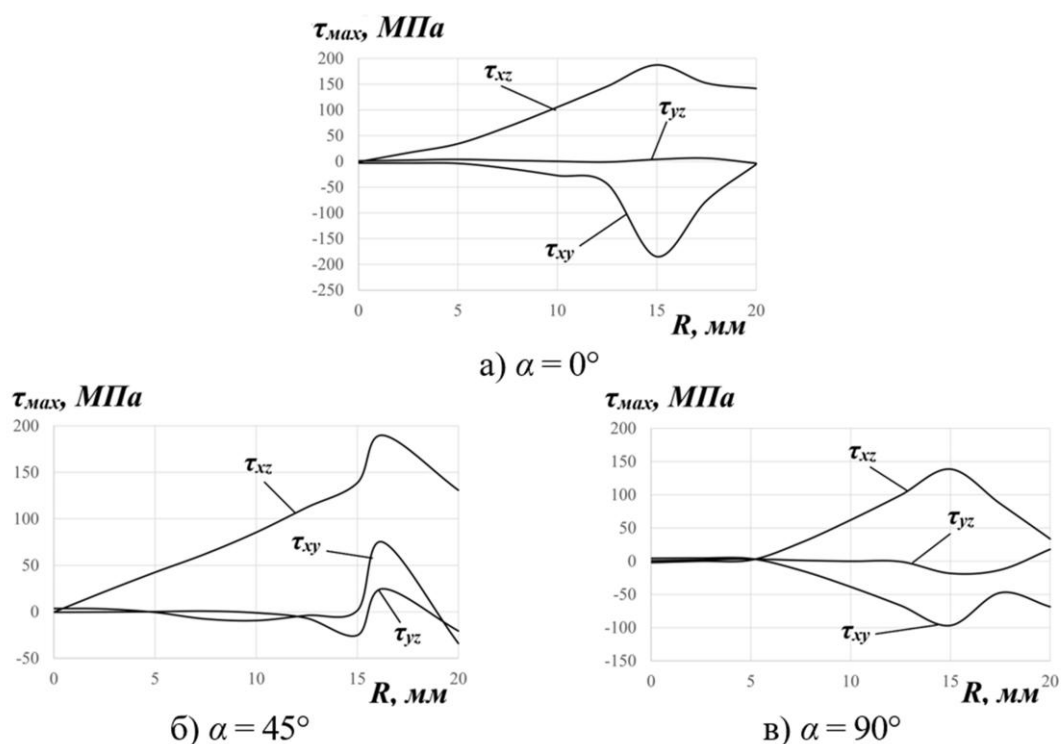


Рисунок 3. Изменение касательных напряжений (τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{xz}) по радиусу цилиндрических образцов при кручении ($M = 1,77$ кН·м)

На рисунке 4 приведены поля распределения интенсивности касательных напряжений в поперечном сечении цилиндрических образцов при крутящем моменте $M = 1,77$ кН·м. Показано, как изменение угла ориентации упрочнённых волокон влияет на уровень и характер напряжённого состояния.

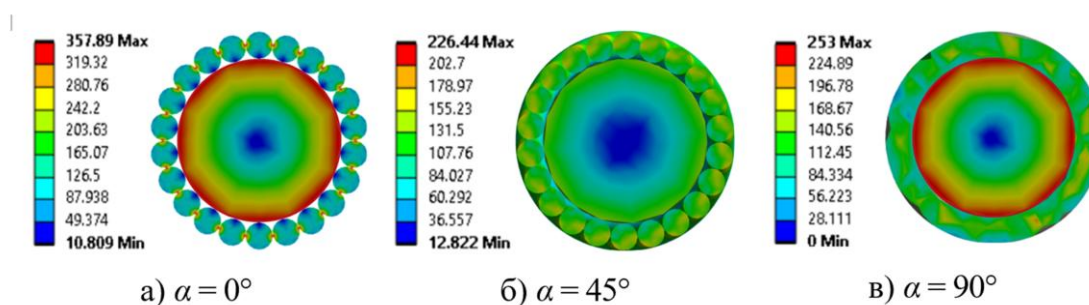


Рисунок 4. Интенсивность касательных напряжений в поперечном сечении образцов при разных углах ориентации волокон ($M = 1,77$ кН·м)

При $\alpha = 0^\circ$ максимальная интенсивность касательных напряжений достигает 357,89 МПа, а минимальная составляет 10,81 МПа. Высокие значения напряжений сосредоточены в приповерхностной зоне, что отражается преобладанием красных и оранжевых оттенков, тогда как центральная часть нагружена существенно меньше (синий цвет).

При $\alpha = 45^\circ$ напряжения распределяются более равномерно по сечению: максимум составляет 226,44 МПа, минимум — 12,82 МПа. Зеленые зоны вдоль

наружного контура указывают на снижение концентрации касательных напряжений, что потенциально повышает устойчивость материала к локальным перегрузкам.

Для $\alpha = 90^\circ$ интенсивность касательных напряжений достигает 253 МПа, а минимальное значение — 0 МПа. Распределение напряжений в этом случае также является достаточно равномерным, однако уступает по однородности варианту с $\alpha = 45^\circ$. При этом области пиков остаются в зонах контакта волокон с основным телом.

На рис. 5 представлены результаты распределения интенсивности касательных напряжений в продольном сечении цилиндрических образцов при различных ориентациях упрочнённых волокон ($\alpha = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$).

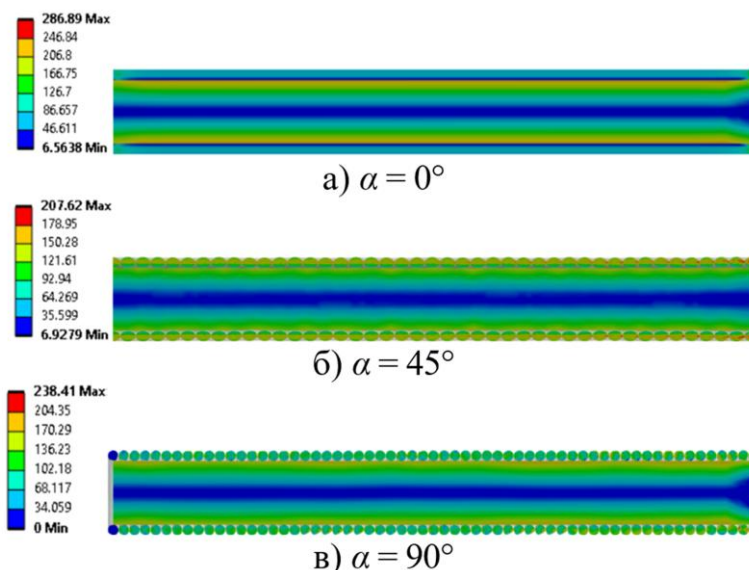


Рисунок 5. Продольные поля касательных напряжений при кручении образцов с различной ориентацией волокон ($M = 1,77 \text{ кН}\cdot\text{м}$)

При $\alpha = 0^\circ$ наблюдается выраженная концентрация напряжений в верхней и нижней зонах образца — максимальные значения достигают 286,89 МПа, в то время как в центральной части напряжения минимальны (до 6,56 МПа). Такая картина указывает на высокую несущую способность вдоль оси, но сопровождается риском локальных перегрузок.

В случае $\alpha = 45^\circ$ напряжения распределяются значительно равномернее: преобладание зелёных и голубых тонов указывает на снижение амплитуды колебаний. Максимальное значение уменьшается до 207,62 МПа, а минимум возрастает до 6,92 МПа, что потенциально улучшает устойчивость к сложным видам нагружения.

При $\alpha = 90^\circ$ вновь наблюдаются зоны концентрации напряжений по периферии, но менее выраженные, чем при $\alpha = 0^\circ$. Максимальная интенсивность достигает 238,41 МПа, оставаясь между предыдущими случаями. Внутренние зоны поперечного сечения, по-прежнему менее нагружены.

Таким образом, наибольшая равномерность распределения касательных напряжений вдоль оси достигается при $\alpha = 45^\circ$, что делает данный угол наиболее рациональным с точки зрения устойчивости конструкции при кручении.

На рисунке 6 представлена зависимость между величиной крутящего момента M и максимальной интенсивностью касательных напряжений τ_i при разной ориентации упрочнённых волокон ($\alpha = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$).

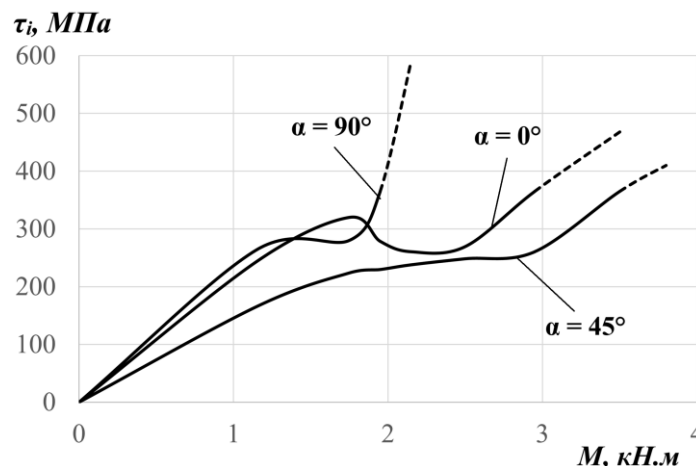


Рисунок 6. Зависимость максимальных касательных напряжений от крутящего момента при различной ориентации упрочнённых волокон

При $\alpha = 90^\circ$ предел текучести ($\tau_T = 216$ МПа) достигается уже при $M = 0,95$ кН·м, тогда как для $\alpha = 0^\circ$ он наступает при $M = 1,08$ кН·м, а для $\alpha = 45^\circ$ — при $M = 1,47$ кН·м. Это указывает на увеличение сопротивления началу пластической деформации при наклонной ориентации волокон.

Аналогичная тенденция наблюдается и для предела прочности ($\tau_B = 363$ МПа): при $\alpha = 90^\circ$ он достигается при $M = 1,95$ кН·м, при $\alpha = 0^\circ$ — при $M = 2,90$ кН·м, и при $\alpha = 45^\circ$ — при $M = 3,43$ кН·м. Таким образом, ориентация волокон под углом 45° обеспечивает наивысшую прочность при кручении, превышая значение для $\alpha = 90^\circ$ примерно на 75 %.

4. Заключение

Результаты численного моделирования позволяют сделать обоснованные выводы о влиянии ориентации упрочнённых волокон на сопротивление цилиндрических образцов при кручении. Установлено, что наилучшие характеристики прочности достигаются при угле наклона волокон $\alpha = 45^\circ$, при котором обеспечивается наиболее равномерное распределение касательных напряжений и максимальная устойчивость к действующему крутящему моменту. Такая конфигурация способствует снижению локальных концентраций напряжений и замедленному наступлению как предела текучести, так и предела прочности.

При $\alpha = 0^\circ$ волокна ориентированы вдоль оси заготовки, что приводит к снижению сопротивления кручению, хотя прочностные характеристики остаются выше, чем при перпендикулярной ориентации. В случае $\alpha = 90^\circ$, когда волокна расположены поперечно к оси образца, наблюдается наименьшая прочность, обусловленная усилением локальных перегрузок и неравномерным распределением напряжений.

Таким образом, традиционные схемы упрочнения с перпендикулярной ориентацией волокон не обеспечивают высокой эффективности при кручении. Оптимальный выбор угла наклона упрочнённых волокон должен производиться с учётом типа нагружения, требуемых механических характеристик и условий эксплуатации. Анализ всех полученных данных показывает устойчивую закономерность: наклон волокон под углом 45° обеспечивает как структурную равномерность, так и максимальную устойчивость при кручении. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании деталей, работающих в условиях знакопеременного кручения, например, в машиностроении, энергетике и авиации.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Santos, V., Uddin, M., Hall, C. Mechanical surface treatments for controlling surface integrity and corrosion resistance of Mg alloy implants: A review // *Journal of Functional Biomaterials*. – 2023. – Vol. 14. – Pp. 1–34.
2. Тамаркин, М. А., Тищенко, Э. Э., Лебедеко, В. Г. Повышение качества поверхностного слоя деталей при обработке поверхностным пластическим деформированием в гибких гранулированных средах // *Вестник ДГТУ*. – 2009. – Т. 9, № 3(42). – С. 213–224.
3. Ветрова, Е. А. Формирование шероховатости поверхностного слоя нежестких деталей типа полый цилиндр в процессе комбинированной обработки резанием и поверхностным пластическим деформированием // *Известия МГТУ МАМИ*. – 2012. – Т. 2, № 2 (14). – С. 38–41.
4. Roland, T., Restraint, D., Lu, K., Lu, J. Fatigue life improvement through surface nanostructuring of stainless steel by means of surface mechanical attrition treatment // *Scripta Materialia*. – 2006. – Vol. 54, Issue 11. – Pp. 1949–1954.
5. Кабатов, А. А. Анализ финишных методов обработки поверхностным пластическим деформированием // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*. – 2013. – № 58. – С. 49–54.
6. Осипок, Т. В., Зайдес, С. А. Оценка неоднородности распределения механических свойств в листовом прокате из низкоуглеродистой стали // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. – 2021. – № 6. – С. 45–54.
7. Паршин, С. В. Конечно-элементное моделирование в решении прочностных задач машиностроения / С. В. Паршин. – Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2024. – 68 с.
8. Жидков, А. В. Применение системы ANSYS к решению задач геометрического и конечно-элементного моделирования / А. В. Жидков. – Нижний Новгород: ННГАСУ, 2006. – 115 с.
9. Кожаринова, Л. В. Основы теории упругости и пластичности / Л. В. Кожаринова. – М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2010. – 136 с. ISBN 978-5-93093-712-1.
10. Новожилов, В. В. Теория упругости / В. В. Новожилов. – 9-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Политехника, 2012. – 409 с. ISBN 978-5-7325-0956-4.

Поступила в редколлегию 15.04.2025 г.

УДК 621.45.038.7

Е. В. Овчинников, докт. техн. наук., **Н. М. Чекан**, канд. физ.-мат. наук, **И. П. Акула**, канд. техн. наук, **А. А. Адамчик**, аспирант, **Д. В. Белоусов**, магистрант
Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, г. Гродно, Беларусь
Тел./Факс: +375 (152) 6234120; E-mail: ovchin@grsu.by

ИЗНОСОСТОЙКИЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБРАБАТЫВАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА В ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ УСЛОВИЯХ СТРОИТЕЛЬНОЙ ИНДУСТРИИ

Увеличение эксплуатационного ресурса обрабатывающего инструмента в строительной отрасли достигается путем применения различного типа покрытий. Одним из перспективных направлений достижения высокого эксплуатационного ресурса является использование вакуумных покрытий. Известны и широко распространены покрытия на основе соединений титана, циркония. Однако в настоящее время интерес сточник зрения технического применения представляют трехкомпонентные покрытия на основе алюминия-титана-азота. Целью данной работы являлось исследование морфологии и физико-механические свойства вакуумных покрытий, получаемых на основе алтинов. Для изучения характеристик защитных слоев на основе алюминия-титана-азота применяли современные методы исследований: оптическая и атомно-силовая микроскопия, микродюраметрия, триботехнические испытания. Установлено, что формирование трехкомпонентных покрытий на основе алюминия, титана и азота позволяет сформировать высокотвердые покрытия даже при малых значениях реакционного газа в вакуумной камере. Морфология формируемых покрытий зависит, как от потенциала подаваемого на подложку, так и от давления реакционных газов в вакуумной камере. Коэффициент трения покрытий на основе AlTiN зависит от величины вакуума, который создавался при формировании покрытий плазмохимическим методом.

Ключевые слова: вакуум, морфология, микротвердость, алтин, трение.

E. V. Ovchinnikov, N. M. Chekan, I. P. Akula, A. A. Adamchik, D. V. Belousov

WEAR-RESISTANT COATINGS FOR OPERATION OF MACHINING TOOLS IN HEAVY-DUTY CONDITIONS OF THE CONSTRUCTION INDUSTRY

Increasing the service life of the processing tool in the construction industry is achieved by using various types of coatings. One of the promising areas for achieving a high service life is the use of vacuum coatings. Coatings based on titanium and zirconium compounds are known and widely used. However, three-component coatings based on aluminum-titanium-nitrogen are currently of interest from the point of view of technical application. The purpose of this work was to study the morphology and physical and mechanical properties of vacuum coatings obtained on the basis of alitines. To study the characteristics of protective layers based on aluminum-titanium-nitrogen, modern research methods were used: optical and atomic force microscopy, microdurametry, tribological tests. It was found that the formation of three-component coatings based on aluminum, titanium and nitrogen allows the formation of highly hard coatings even at low values of the reaction gas in the vacuum chamber. The morphology of the formed coatings depends on both the potential supplied to the substrate and the pressure of the reaction gases in the vacuum chamber. The friction coefficient of AlTiN-based coatings depends on the magnitude of the vacuum that was created during the formation of the coatings using the plasma-chemical method.

Keywords: vacuum, morphology, microhardness, altine, friction.

1. Введение

Базовые материалы, применяемые в строительной, автомобильной, химической и аэрокосмической отраслей характеризуются набором определенных свойств, определяющих высокие эксплуатационные характеристики изготавливаемых из них изделий: электропроводность, высокая износостойкость, твердость, термостойкость и прочность. Эти характеристики также актуальны для различного типа покрытий, применяемых в указанных сферах промышленного производства. Применение

тонкослойных вакуумных систем обусловлен экономической целесообразностью или производственными преимуществами, позволяющими снизить затраты при дальнейшей службе изделий с вакуумными покрытиями, сформированными по технологиям PVD, CVD и PCVD. Благодаря высокой коррозионной стойкости, долговечности и возможности создания разноплановых конструкций с гарантированным сроком службы, достигается снижение себестоимости продукции за счет увеличения интервалов между ремонтами, сокращения расходов на техническое обслуживание и улучшения качества выпускаемой продукции. Применение покрытий, содержащих в своем составе три и более химических элементов позволяет существенно увеличить срок службы модифицированных изделий различного функционального назначения. Распространены защитные слои на основе соединений карбонитрида титана, карбонитрида циркония, а также системы на основе алтинов (соединения на основе алюминия, титана, азота) [1, 2]. Наличие алюминия в данных тонкослойных системах позволяет существенно увеличить термостойкость, получаемых защитных слоев. Интересным направлением развития получения тонкослойных многокомпонентных покрытий является допирование алтинов углеродом, фтором. В результате данного технологического подхода возможно существенно повысить срок эксплуатации модифицированных изделий. Среди основных преимуществ, которые имеют эти покрытия перед классическими материалами на основе карбида титана, нитрида циркония можно отметить: хорошую стойкость к окислению, более высокую микротвёрдость и сохранение исходных физико-механических характеристик покрытий при воздействии высоких температур [3, 4].

Целью данного исследования является изучение многокомпонентных по составу вакуумных покрытий, которые обладают высокой степенью надёжности и долговечности в сравнении с традиционными вакуумными покрытиями на основе нитрида, карбида, карбонитрида титана, циркония.

2. Материалы и методы

В качестве объекта исследований использовали покрытия AlTiN покрытия. Нанесение покрытий осуществлялось в вакуумной установке УВНИПА-1-001, оборудованной катодно-дуговым испарителем с системой электромагнитной фильтрации плазмы, а также ионным источником ИИ-4-0,15. Для удаления тонкого приповерхностного слоя толщиной порядка 100 – 300 нм, содержащего загрязнения, перед нанесением покрытия образцы подвергались интенсивной обработке высокоэнергетичными ионами аргона. При этом происходит нагрев поверхностей до 450 °С, разрушение окисных пленок и частичное удаление растворенных в металле газов. В качестве подложек использовали сталь Р6М5. Поверхность подложек из стали шлифовке и полировке до чистоты не ниже 8 – 10 класса. Для измерения микротвердости покрытий, сформированных на металлах, использовали микротвердомер НWММТ-Х7. На индентор прикладывалась нагрузка от 1 Н и 30 Н, с постепенным возрастанием значений. Длина царапины составляла 10 мм. Триботехнические исследования проводили на машине трения типа FT-2. Испытания проводили при нормальной нагрузке на образец до 30 Н, линейной скорости скольжения 0,036 м/с, температуре поверхности стали (20±5) °С

3. Результаты исследований

Применяя многокомпонентные покрытия, в частности системы титан-алюминий-азот, титан-алюминий-кремний-азот, допированных углеродом, фтором

можно повысить срок эксплуатации изделий. Среди основных преимуществ, которые имеют эти покрытия перед классическими материалами на основе карбида титана, нитрида циркония можно отметить: хорошую стойкость к окислению, более высокую микро твёрдость и сохранение исходных физико-механических характеристик покрытий при воздействии высоких температур. Установлено, что термостойкость покрытий, содержащих в своём составе Al приводит к формированию соединений на основе оксида алюминия. Данный защитный слой позволяет существенно снизить скорость окисления покрытия и резко увеличить адгезионное взаимодействие тонкослойных вакуумных покрытий с поверхностными слоями обрабатываемого инструмента, что обуславливает высокие эксплуатационные характеристики модифицированных изделий. Покрытия формируемых методом плазмохимического осаждения из нитридов переходных металлов широко используются в различных отраслях промышленности. Основным направлением использования данных соединений является повышение эксплуатационных свойств режущего инструмента, защита различных изделий и их компонентов от износа, эрозии и коррозии [5]. Среди них покрытия $Ti_{1-x}Al_xN$ представляют большой интерес [6 - 8] из-за высоких износостойких и антикоррозионных свойств. Включение Al в кристаллическую решётку TiN приводит к твердорастворному упрочнению покрытий [6, 9]. При среднем содержании Al ($0,33 < x < 0,67$) механизм наблюдается упрочнения границ зёрен, что также способствует повышению твёрдости, которая превышает 30 ГПа [5] и может достигать 40 ГПа [6]. Покрытия $Ti_{1-x}Al_xN$ также характеризуются высокой термостойкостью до 850 °С – 950 °С, при которой спинодальный распад метастабильного твёрдого раствора $Ti_{1-x}Al_xN$ приводит к появлению областей, с повышенным содержанием соединений TiN и AlN, с последующим образованием гексагональной фазы вюрцита [10, 11]. Кроме того, введение Al в TiN значительно увеличивает стойкость к окислению, что объясняется тем, что аморфный оксидный слой, богатый Al, препятствует внутренней диффузии кислорода при температурах ниже 750 °С – 800 °С [10, 12].

Таблица 1. Технологические параметры получения покрытий AlTiN

Параметр	Покрытие							
	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7	№8
Давление азота, Па	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$2,4 \cdot 10^{-2}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$2,4 \cdot 10^{-2}$	$3,2 \cdot 10^{-2}$	$3,2 \cdot 10^{-2}$
Напряжение смещения, В	-50	-50	-50	-100	-100	-100	-50	-100

Проведенные исследования, направленные на изучение профиля формируемых покрытий, технологические параметры получения которых представлены в таблице 1, показали, что данные поверхностные слои имеют существенные дефекты (рисунки 1 – 2). Обнаружены поры в покрытиях, в которых могут находиться объекты с наноразмером. При создании покрытия на основе алтинов, в процессе его формирования происходит изменение морфологии, зависящее от режима создания антифрикционных, антиадгезионных и термостойких слоев. Поверхностные слои покрытия образуются при давлении газа в камере менее 10^{-3} Па, они эквидистантно расположены относительно подложки и имеют глобулярные фазы, отличающиеся геометрическими размерами относительно друг друга. В матрице покрытия находятся

глобулярная фаза и ее части, отличающиеся по размеру относительно друг друга (рисунки 1, 2).

Исходя из изменения значения потенциала на катоде, происходит увеличение размеров глобулярных фаз и их концентрации в покрытии. Наблюдается процесс коалесценции глобул, в результате которого образуются объекты с фрактальной структурой, которые содержат глобулярные фазы (рисунок 2). При увеличении давления в вакуумной камере, превышающего значение $1,1 \cdot 10^{-2}$ Па, происходит увеличение концентрации глобулярных включений и образование структуры покрытия, отличной от структуры подложки. На протяжении дальнейшего возрастания значений давления газа в камере (до $2,4 \cdot 10^{-2}$ Па) происходит увеличение интенсивности процесса коалесценции глобулярных включений с увеличением их концентрации.

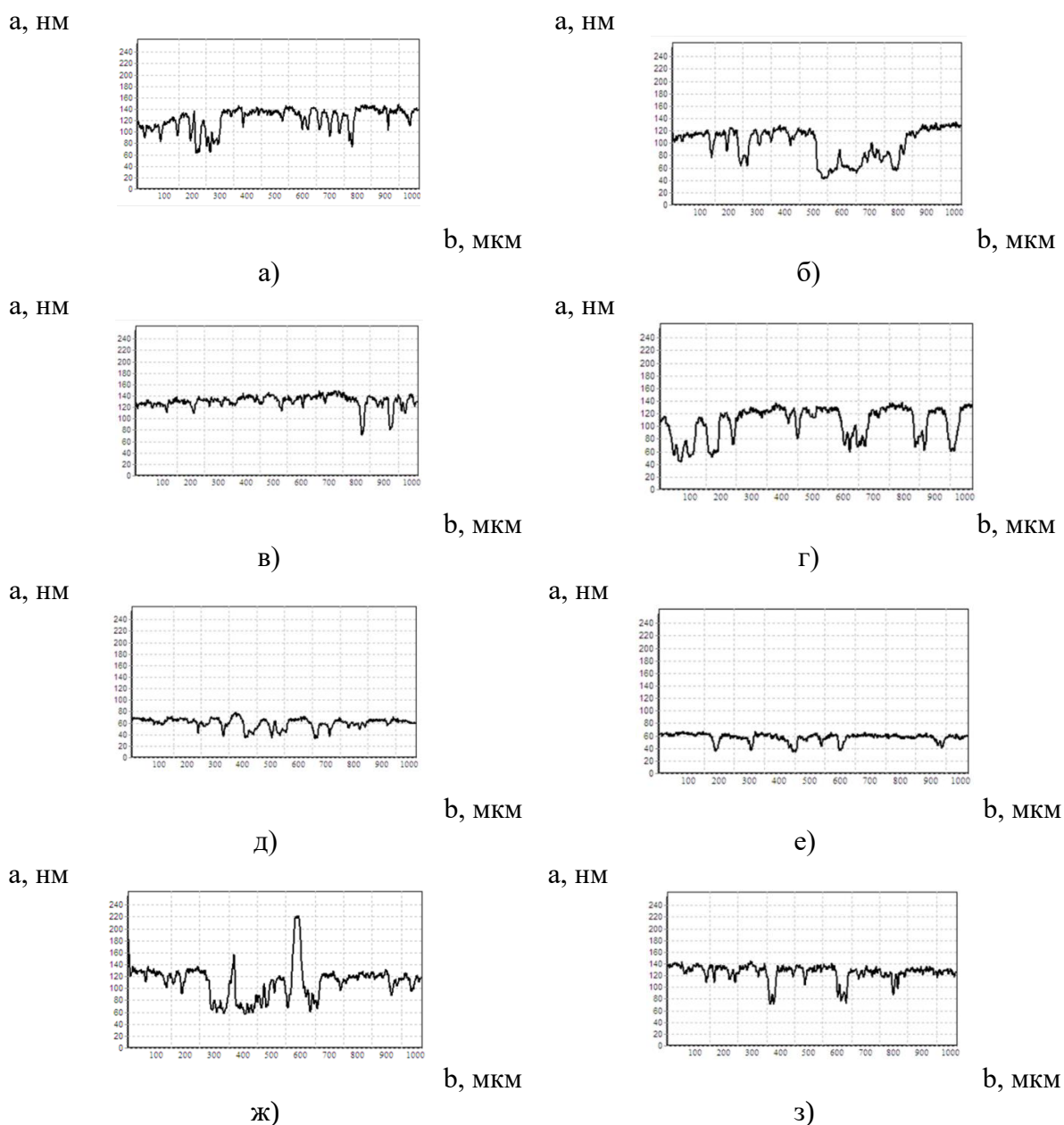


Рисунок 1. Топография поверхности покрытия AlTiN: а - № 1 (таблица 1); б - № 2 (таблица 1); в - № 3 (таблица 1); г - № 7 (таблица 1); д - № 4 (таблица 1); е - № 5 (таблица 1);

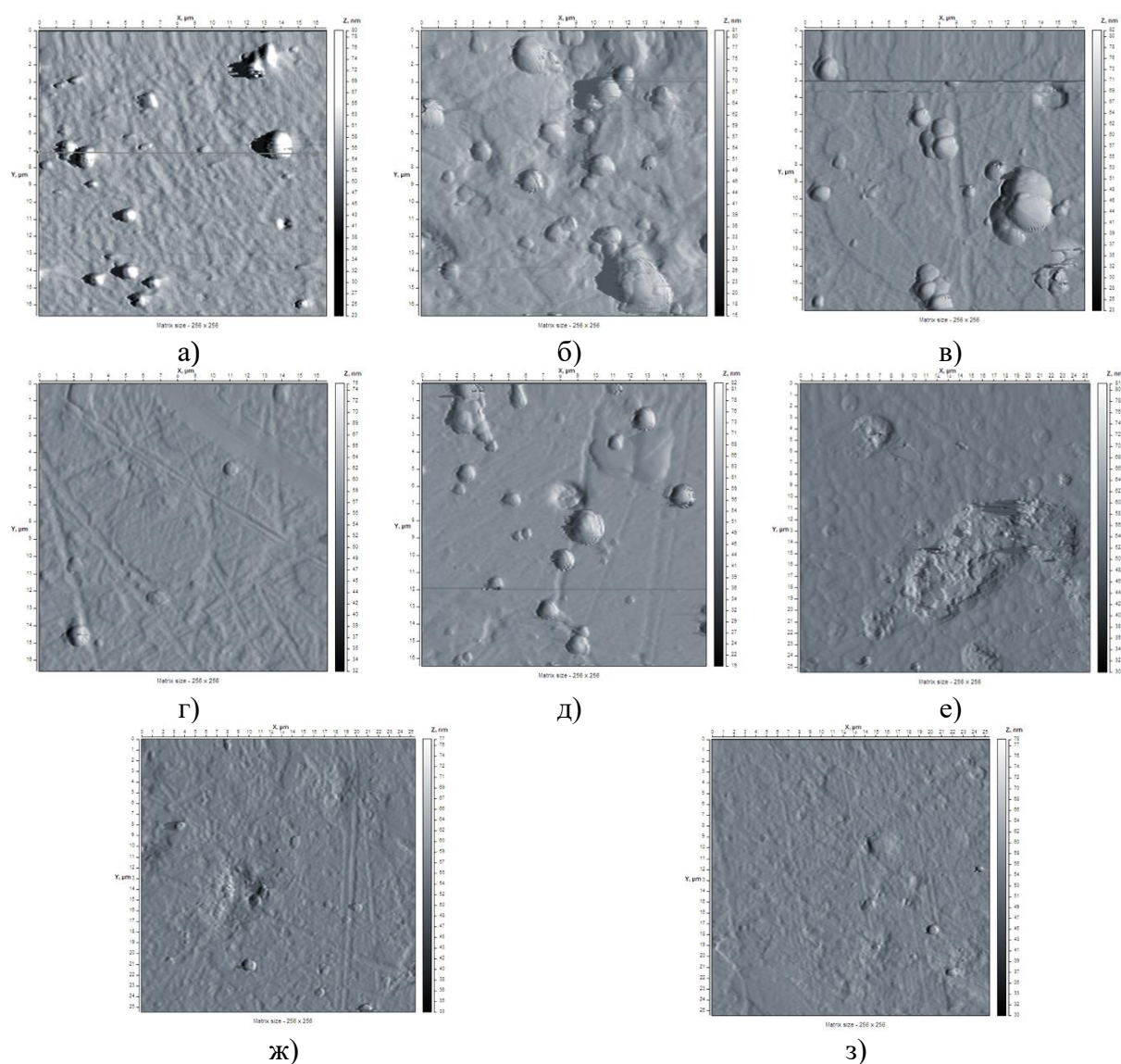


Рисунок 2. Морфология поверхностей покрытий AlTiN, сформированных при различных технологических режимах: а – покрытие №1, б – покрытие №2, в – покрытие №3, г – покрытие №7, д – покрытие №4, е – покрытие №5, ж – покрытие №6, з – покрытие №8 (таблица 1). Поле сканирования 24×24 мкм.

Покрyтия, состоящие из нитридов переходных металлов и тонкопленочных материалов широко используются в различных областях техники, особенно где необходимо применять изделия и детали с высокими показателями прочности, химической стойкости и повышенными триботехническими характеристиками. Тонкослойные системы на базе TiN были наиболее изучены среди данного класса покрытий. В основном проблемы применения соединений нитрида титана лежат в области низкой стойкости к окислению при повышенных температурах слоев, находящихся в области 450 °С – 500°С. В процессе создания слоев, в состав которых входят химические элементы, которые способствуют повышению термостойкости материалов, их концентрацию изменяют для достижения наиболее оптимальных

значений эксплуатационных характеристик. Введение в состав покрытия следующих химических элементов Al, Cr, Mo, позволяет существенно увеличить термическую стойкость многокомпонентных покрытий. Одними из первых высокотемпературных покрытий были соединения TiAlZrN, которые использовались в радиоэлектронной промышленности. Дальнейшие исследования показали, что возможно достигать высоких термических и износостойких характеристик при использовании более простых систем в частности AlTiN. Одной из основных проблем, определяющих эксплуатационные свойства покрытий, является их адгезионная прочность. Оценку данного параметра проводили путем определения адгезионного взаимодействия капли дистиллированной воды к поверхности покрытия. Предполагая, чем выше взаимодействие между жидкой средой и твердым покрытием, тем будет выше адгезионное взаимодействие между покрытием и субстратом.

Таблица 1. Значения работы силы адгезии дистиллированной воды к AlTiN в зависимости от технологических параметров формирования покрытий.

Напряжение смещения, В	Давление азота, Па			
	$7,5 \times 10^{-3}$	$1,1 \times 10^{-2}$	$2,4 \times 10^{-2}$	$3,2 \times 10^{-2}$
минус 50	92,0 мДж	74,0 мДж	84,0 мДж	87,0 мДж
минус 100	68,0 мДж	74,0 мДж	58,0 мДж	66,0 мДж

Формирование покрытий алтинов (соединений вида алюминий-титан-азот) на поверхности стали Р6М5 позволило увеличить значения микротвердости модифицируемых стальных субстратов в 1.3-3 раз в зависимости от толщины сформированного защитного слоя (рисунок 3).

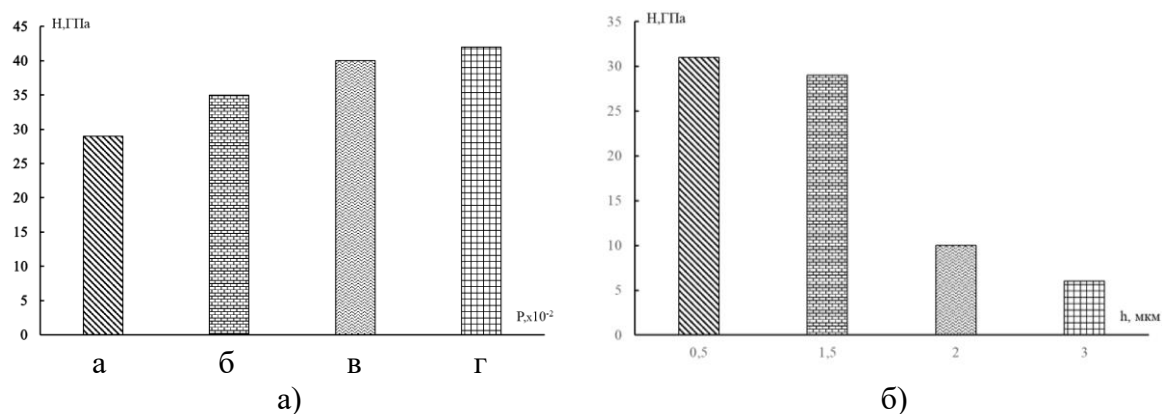


Рисунок 3. Зависимость микротвердости покрытия на основе алтинов от давления газов в вакуумной камере (а) и глубины внедрения индентора (б): а – $0,75 \times 10^{-3}$ Па; $1,1 \times 10^{-2}$ Па; $2,4 \times 10^{-2}$ Па; $3,2 \times 10^{-2}$ Па; б – давление газов в вакуумной камере – $0,75 \times 10^{-3}$ Па.

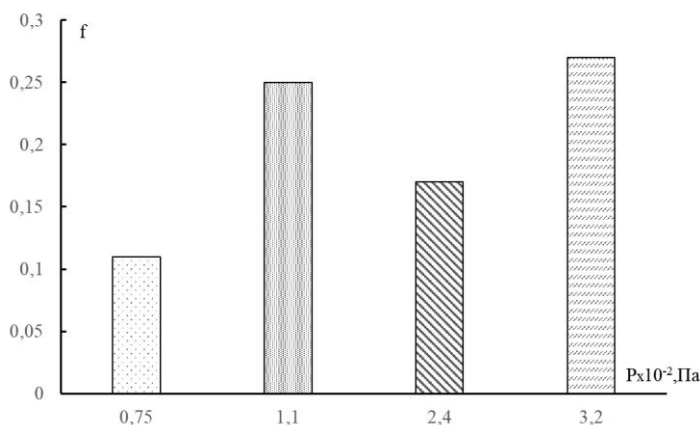


Рисунок 4. Значения коэффициента трения пары алтин-ШХ15 от значения давления газов в вакуумной камере

Согласно, данным, представленным на рисунке 3 происходит увеличение значений микротвердости покрытий с увеличением давления реакционных газов в объеме вакуумной камеры. Это может быть связано с тем, что при более глубоких значениях вакуума в камере происходит уменьшение размеров столбчатых структур, формирующих данное покрытие, т.е. происходит процесс наподобие дисперсионному упрочнению, что и сказывается на прочностных характеристиках соединений алюминий-титан-азот, формируемых при давлении в камере $3,2 \times 10^{-3}$ Па. Изменение твердости покрытий алюминий-титан-азот по толщине показывает относительную глубину модифицирования сталей Р6М5. Согласно, полученных данных, проведенных с использованием микродюрOMETрического анализа, толщина модифицированного слоя составляет около 3 мкм при давлении в вакуумной камере реакционных газов $0,75 \times 10^{-3}$ Па. Оптимальная толщина антифрикционного и защитного слоя находится в пределах 1,5 мкм. После чего наблюдается быстрое снижение значений микротвердости исследуемого покрытия. Предложенные составы покрытий использовали для создания защитных антифрикционных слоев для увеличения эксплуатационного ресурса обрабатывающего инструмента, применяемого для обработки бетонных изделий. Установлено, увеличение значений износостойкости сверл и фрез, с покрытием на основе алтинов в 1.3-2.2 раза при обработке бетонных изделий.

4. Заключение

В ходе проведенных исследований показано, что формирование термостойких покрытий на основе алюминия, титана и азота позволяет сформировать высокотвердые покрытия даже при малых значениях реакционного газа в вакуумной камере, толщина эффективного слоя, сохраняющего значения высокотвердого покрытия, составляет ~ 1.5 мкм. За тем значения микротвердости резко снижаются до значений равных значению базового материала (стали Р6М5), что соответствует толщине покрытия 3 мкм. Морфология формируемых покрытий зависит, как от потенциала подаваемого на подложку, так и от давления реакционных газов в вакуумной камере. Коэффициент трения покрытий на основе AlTiN зависит от величины вакуума, который создавался при формировании покрытий плазмохимическим методом.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Gu, J.-D. Investigation of the corrosion resistance of ZrCN hard coatings fabricated by advanced controlled arc plasma deposition / J.-D. Gu, P.-L. Chen // *Surf. Coat. Technol.* – 2006. – Vol. 200, iss. 10. – P. 3341–3346.
2. Овчинников Е. В., Чекан Н. М., Акула И. П., Эйсымонт Е. И., Лукьянчиков А. А. Триботехнические характеристики покрытий на основе карбонитрида циркония, подвергнутых криогенной обработке. Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2018. Т. 18. № 2. С. 358-362.
3. Овчинников Е. В. Ориентация фторсодержащих олигомеров типа "фолеокс" на поверхности металла и их триботехнические свойства Трение и износ. 1994. Т. 15. № 6. С. 1098-1101.
4. Овчинников Е. В., Чекан Н. М., Эйсымонт Е. И., Акула И. П., Линник Д. А., Свистун А. Ч., Овчинников А. Е. Физико-механические характеристики нанокпозиционных покрытий на основе алтинов Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Серия 6. Техника. 2025. Т. 15. № 1. С. 83-92.
5. Schalk N., Tkadletz M., Mitterer C. Hard coatings for cutting applications: physical vs. chemical vapor deposition and future challenges for the coatings community // *Surf. Coat. Technol.* – 2022. – Vol. 429. – P. 127949.
6. Ou Y. X. [et al.] Recent advances and strategies for high-performance coatings // *Prog. Mater. Sci.* – 2023. – Vol. 136 (17). – P. 101125.
7. PalDey S., Deevi S. C. Single layer and multilayer wear resistant coatings of (Ti,Al)N: a review // *Mater. Sci. Eng., A.* – 2003. – Vol. 342, Is. 1–2. – P. 58-79.
8. Liu Z.-J., Shum P. W., Shen Y. G. Hardening mechanisms of nanocrystalline Ti–Al–N solid solution films // *Thin Solid Films.* – 2004. – Vol. 468, Is. 1–2. – P. 161-166.
9. Chen L. [et al.] Thermal stability and oxidation resistance of Ti–Al–N coatings // *Surf. Coat. Technol.* – 2012. – Vol. 206, Is. 11–12. – P. 2954-2960.
10. Chen Y. H. [et al.] Enhanced thermal stability and fracture toughness of TiAlN coatings by Cr, Nb and V-alloying // *Surf. Coat. Technol.* – 2018. – Vol. 342. – P. 85-93.
11. Liew W. Y. H. [et al.] Thermal stability, mechanical properties, and tribological performance of TiAlXN coatings: understanding the effects of alloying additions // *J. Mater. Res. Technol.* – 2022. – Vol.17. – P. 961-1012.
12. Glatz S. A. [et al.] Influence of Mo on the structure and the tribomechanical properties of arc evaporated Ti–Al–N // *Surf. Coat. Technol.* – 2017. – Vol. 311. – P. 330-336.

Поступила в редколлегию 11.04.2025 г.

УДК 621. 922:621.21

Ю. П. Ракунов, канд. техн. наук, **В. В. Абрамов**, д-р техн. наук, **А. Ю. Ракунов**, инженер

Московский государственный строительный университет, НИУ МГСУ, Россия

Тел/Факс: +7 (499) 1834683, +7 (916) 810 71 26; E-mail: Rakunov1991@mail.ru;

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ИЗНОСА РЕЖУЩЕГО КЛИНА И КОНТАКТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ЕГО РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЯХ

В статье рассмотрены характер и распределение контактных напряжений на передней и задней поверхностях режущего клина (РК) с учетом величины радиуса округления режущей кромки (ρ) который определяет типоразмер РК совместно с передним и задним углом резца. Рассмотрена кинетика изменения радиуса ρ резцов из сверхтвердых материалов при обработке закаленных сталей. Определены парные корреляционные зависимости между действительной толщиной среза a и ρ_{pr} , обеспечивающие наибольшую прочность РК и ρ_t , соответствующие максимальной стойкости инструмента при тонкой и чистовой обработке труднообрабатываемых материалов, в том числе закаленных сталей и жаропрочных сплавов. Приведены величины нормальных сил, сил трения и удельных нагрузок при точении частично приработанным резцом из композита 01 закаленной стали ХВ1Г. Исследован характер изменения нормальных и касательных напряжений с повышением скорости резания и подачи на оборот. Даны рекомендации по оптимальному назначению сечения среза a тонкого точения при значении радиуса округления режущих кромок РЭ резцов унифицированных конструкций.

Ключевые слова: режущий клин, контактные напряжения, радиус округления, толщина среза, оптимизация параметров РК, кинетика износа, резец из сверхтвердых материалов.

Y. P. Rakunov, V. V. Abramov, A.Y. Rakunov

RESEARCH OF THE KINETICS OF WEAR OF THE CUTTING WEDGE AND CONTACT STRESSES ON ITS WORKING SURFACES

The article discusses the nature and distribution of contact pressure on the front and rear surfaces of the cutting wedge (CW) given the radius of the rounding of the cutting edge (ρ) which determines the size of CW together with the front and rear corner cutter. The kinetics of the radius ρ cutters from superhard materials in the processing of hardened steels. Determined pair correlations between actual slice thickness a and ρ_{st} and providing the greatest strength and ρ_d of CW, the corresponding maximum tool life for fine and finishing hard materials, including hardened steels and superalloys. Given the magnitude of normal forces, friction forces and specific loads at run-cutter turning part of a composite 01 hardened steel HV1G. The character of changes in the normal and shear stresses with increasing cutting speed and feed per revolution. Recommendations are given on the optimal assignment of the cut section of fine turning at the value of the rounding radius of cutting edges of cutters of unified designs.

Keywords: cutting wedge, contact stresses, rounding radius, slice thickness, optimization of the parameters of the CW, the kinetics of wear, the tool of superhard materials.

1. Введение

Исследование характера и распределения контактных напряжений на передней и задней поверхностях режущего клина не может быть достоверно проведено без учёта (рассмотрения) величины радиуса ρ округления режущей кромки. Это относится ко всем без исключения материалам РИ, т.к. определяет как статическую, так и динамическую прочность режущего клина во всём рабочем диапазоне режимов резания.

Во главе угла, т.е. режущего клина (РК) стоит радиус округления этого клина (режущей кромки) ρ , который и определяет типоразмер РК совместно с передним углом γ и задним углом α , а также параметрами шероховатости всех поверхностей РК,

как на передней (режущей), так и задней (трущейся) поверхности и линии их пересечения.

2. Постановка задачи

Резцовые цилиндрические вставки и неперетачиваемые двухсторонние пластины из композитов на инструментальных заводах не затачиваются специально (под микроскопом) с заданными радиусами ρ , то есть ρ вставки или пластины получается самопроизвольно (случайным образом) при выполнении заточки резцовой вставки или спекания круглой двухсторонней неперетачиваемой пластины в пресс-форме. Таким образом, важнейший (определяющий) параметр типоразмера режущего клина ρ в процессе изготовления не контролируется. Видимо, при спекании пластин получается такой ρ , который выполнен при изготовлении пресс-формы для формования СТМ, если он не затачивается по передней поверхности и по цилиндрической поверхности, образующей круговую режущую кромку.

Задачей исследования является изучение кинетики изменения радиуса ρ резцов из сверхтвёрдых материалов (СТМ) при обработке закаленных сталей, установление корреляционных зависимостей между действительной толщиной среза и радиусом округления, а также исследование закономерностей изменения сил и удельных нагрузок на передней и задней поверхностями РК от скорости резания и подачи на оборот при точении закаленных высокопрочных, твердых сталей и труднообрабатываемых материалов (ТОМ).

3. Решение задачи

По данным [1] оптимальные геометрические параметры РК резцов из СТМ: композитов 01, 02 и 10 характеризуются отрицательным передним углом $\gamma = -(6...12)^\circ$, задним углом $\alpha = 6...12^\circ$ при угле заострения $\beta = 90^\circ$. Радиус округления ρ резцов, заточенных алмазными кругами средней и мелкой зернистости, получается в диапазоне $\rho_0 = 10...20$ мкм. В начальный период приработки до износа по заднее грани $h_z = 0,1$ мм ρ увеличивается до $\rho_n = 25...30$ мкм и стабилизируется в нормальный период износа до $h_{zn} = 0,4...0,6$ мм, когда начинается катастрофический износ и качество обработки закалённых заготовок переходит на неприемлемый уровень (ниже допустимого). Доводка и полирование передней и задней поверхности, когда неизбежно обрабатывается свободным абразивом и радиус перехода (пересечения) этих поверхностей, позволяет уменьшить шероховатость всего режущего клина на 2...3 класса до значения $R_a < 0,04...0,08$ мкм ($R_z < 0,2...0,4$ мкм), что обеспечивает получения значения $\rho = 5...10$ мкм. Такой режущий клин (РК) имеет уже другой типоразмер и повышает эффективность тонкой обработки с сечением среза $a = 0,04...0,05$ мм (40..50 мкм) и увеличивает стойкость РК в 1,5...2,5 раза в результате снижения интенсивности адгезионных явлений в зоне контакте стружки и обрабатываемого материала (ОМ) с радиусом округления и поверхностями РК.

Таким образом, ρ РИ из СТМ изменяется в процессе резания одновременно с увеличением фаски износа по задней и передней поверхности РК и его величина зависит от первоначального ρ_0 и времени работы инструмента. При определённых условиях резания ρ увеличивается до 25...30 мкм, а затем стабилизируется на этом уровне, практически не изменяясь в течение всего периода стойкости, независимо от режимов резания (глубины t , подачи S_0 и скорости V_p). Радиус ρ всегда коррелирует с

толщиной среза a , которая зависит от подачи S_0 , глубины резания t и геометрии в плане (φ , r и φ_1) РИ. (см. рис. 1)

Рыкунов А. Н. в исследованиях процесса тонкого точения [2] установил, что средний радиус ρ для киборита (СТМ на основе ПКНБ) при сечениях среза $a = 25 \dots 30$ мкм должен составлять $\rho_{\text{ср}} = 3,0$ мкм. Автор при этом указывает, что «важнейшую роль в процессе тонкого точения имеет радиус округления режущей кромки ρ , определяемый качеством заточки, свойствами инструментального материала и износом резца. При этом речь может идти лишь о некотором усреднённом значении ρ вдоль режущей кромки, что важно учитывать при работе крупнозернистым твёрдосплавным инструментом. В этом случае, независимо от первоначальной заточки, величина ρ в конце периода приработки стабилизируется на уровне, характерном для зернистости данного сплава, а при работе инструментом из сверхтвёрдых материалов – увеличивается аналогично износу» [2].

Изготовители концевых фрез фирмы SHS (США) утверждают, что добиваются остроты режущих кромок на концевых твердосплавных фрезах, соизмеримых с радиусом округления $\rho \approx 1$ мкм при использовании приспособления с ручным приводом доводочным алмазным кругом зернистостью 14...10 мкм на бакелитовой связке. Однако, после первых проходов радиус ρ прирабатывается – уходит дефектный слой ($5 \div 7$ мкм) в зависимости от толщины среза a устанавливаются на уровне величины, определяемой зернистостью твёрдого сплава и его структурным (кристаллографическим) составом, а также динамическими (вибрационными) характеристиками процесса резания.

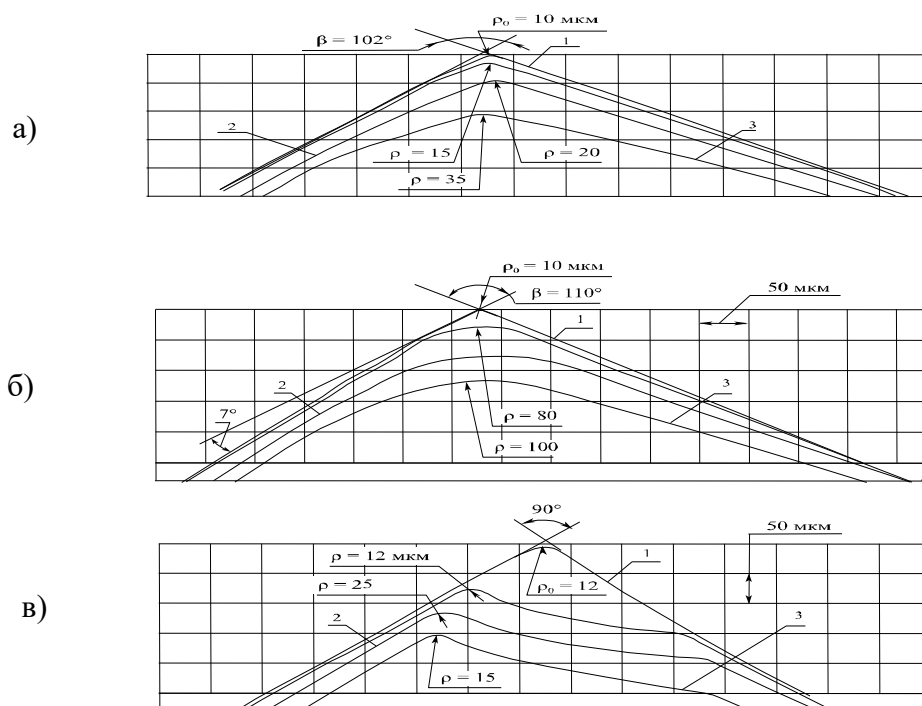


Рисунок 1. Кинетика изменения радиуса округления режущей кромки РК резца из композита 01 (Эльбора-Р) при точении закаленной стали ХВ1Г при следующих режимах: а) $t = 0,3$ мм; $S_0 = 0,15$ мм/об; б) $t = 0,7$ мм; $S_0 = 0,5$ мм/об; в) $t = 0,1$ мм; $S_0 = 0,05$ мм/об; скорость резания $V = 80 \dots 100$ м/мин.

При использовании твёрдосплавным унифицированным режущего инструментом (ТУРИ) $\rho_{\text{пр}}$ обеспечивающий наибольшую прочность РК, и радиус $\rho_{\text{т}}$, соответствующий максимальной стойкости, должны увеличиваться с ростом толщины среза a . Парные корреляционные зависимости между этими параметрами могут быть выражены эмпирическими уравнениями:

$$\rho_{\text{пр}} = 5,06 \sqrt{a};$$

$$\rho_{\text{т}} = 0,11 a,$$

где: a – действительная толщина среза, мкм.

Эти зависимости, видимо, с некоторой долей допущения могут быть применены для анализа величин $\rho_{\text{т}}$ режущей кромки РИ из СТМ при тонкой и чистовой обработке ТОМ, в том числе закалённых сталей и жаропрочных сплавов [3]. Зависимости $\rho_{\text{пр}}$ и $\rho_{\text{т}}$ от a представлены в таблице и рис. 2.

S_o , мм/об	0,01	0,02	0,04	0,05	0,06	0,08	0,1	0,1	0,3	0,6	1,0	2,0	2,5
a , мкм	7,1	14,2	28,4	35	43	57	71	107	214	428	707	1414	1767
$\rho_{\text{т}}$, мкм	0,78	1,56	3,12	3,9	4,7	6,25	7,8	11,8	23,3	46	77,8	155	194
$\rho_{\text{пр}}$, мкм	13,5	19	27	30	33	38	42	52	74	104	134	190	213
$\rho_{\text{опт}}$, мкм	1,0 – 1,4	2,0 – 2,9	4,0 – 5,7	5,0 – 7,0	6,1 – 8,6	8,1 – 11,4	10 – 14,2	15 – 21,5	30 – 40	65 – 80	90 – 100	140 – 150	165 – 175

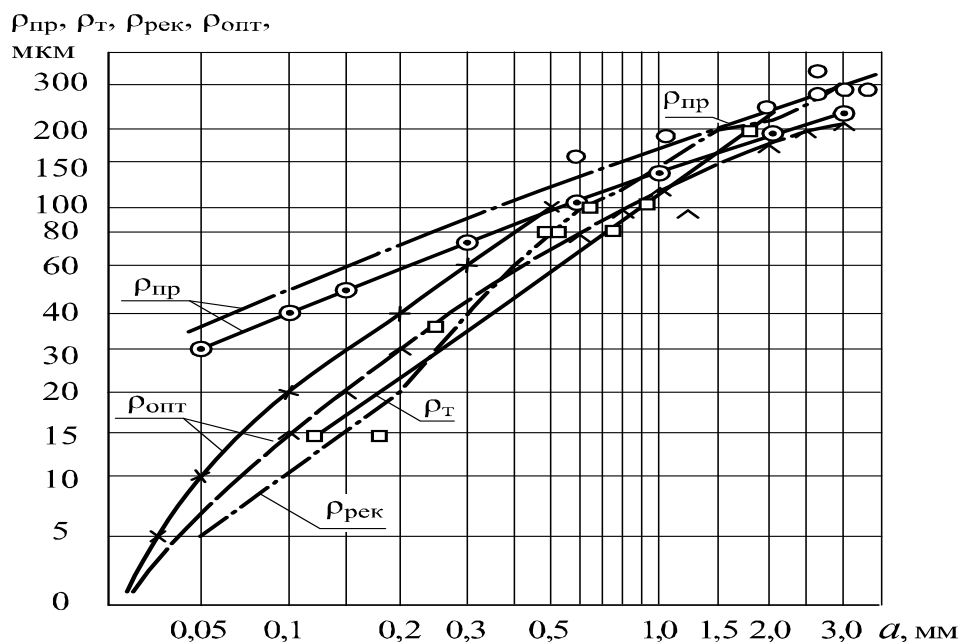


Рисунок 2 Зависимость радиусов округления режущей кромки РК от действительной толщины среза a ; $\rho_{\text{опт}}$ – оптимальный радиус округления, $\rho_{\text{рек}}$ – рекомендуемый [3].

В работе [4] утверждается, что среднее значение радиуса округления режущей кромки резца из СТМ, соответствующее наибольшей стойкости, соответствует $\rho_{\text{т}}^{\text{ср}} = 4,7 \text{ мкм} \approx 5 \text{ мкм}$. Резцовая вставка или пластина из СТМ затачивалась алмазным кругом, затем передняя и задняя поверхности доводились алмазной пастой для обеспечения $\rho = 5 \dots 6 \text{ мкм}$, так как эта величина ρ соответствует малым толщинам среза a при тонком точении резцами из СТМ. При этой величине ρ контактные напряжения распределяются в начальный период приработки (врезания) резца до $h_z = 0,01 \text{ мм}$ – не по радиусу округления режущей кромки, а отдельно по площади контакта на передней поверхности q_N , q_F и по площади фаски износа резца на задней поверхности q_{N1} , q_{F1} инструмента [5].

Силы, удельные нагрузки и средние коэффициенты трения на контактных поверхностях РИ из СТМ при тонком точении закалённых легированных сталей были исследованы в работе [6]. Здесь указывалось на влияние величины износа по задней грани h_z , которая, несомненно, связана с радиусом ρ , на силы Q и F_Q на задней поверхности РК.

На рисунке 3 приведены нормальные силы, силы трения и удельные нагрузки при точении частично приработанным ($h_z = 0,03 \text{ мм}$) резцом из композита 01 (эльбора-Р) стали ХВ1Г твёрдостью HRC_Э 59...61. Из рисунка 3 видно, что увеличение скорости резания оказывает неоднозначное влияние на силы на передней и задней поверхностях РИ: силы N и F_N (на передней поверхности) вначале убывают, а затем возрастают, а силы Q и F_Q , наоборот. С ростом подачи силы N и F_N увеличиваются, а силы Q и F_Q практически остаются постоянными, что соответствует принятой гипотезе, положенной в основу метода определения сил на режущих поверхностях инструмента [7].

Силы на задней поверхности и в особенности нормальная сила Q в условиях тонкого точения (с малой a – до $0,07 \text{ мм}$) составляют значительную величину по сравнению с N и F_N . В диапазоне скоростей резания $V = 40 \dots 70 \text{ м/мин}$ при подаче $S_0 = 0,04 \text{ мм/об}$ сила Q больше или $\approx$ равна нормальной силе N . При $S_0 = 0,08 \dots 0,16 \text{ мм/об}$ сила Q меньше силы N . Сила трения F_Q во всём исследуемом диапазоне PP меньше силы трения F_N .

Исследования и расчёты показывают, что с понижением твёрдости ОМ до HRC 45 силы N и F_N увеличиваются. Например, при точении стали X12MB твёрдостью HRC_Э45 резцом из композита 01 со скоростями $V = 70 \text{ м/мин}$ и $V = 120 \text{ м/мин}$ ($S_0 = 0,04 \text{ мм/об}$) значения сил, соответственно, составляют $N = 51 \text{ Н}$, $F_N = 41 \text{ Н}$ и $N = 82 \text{ Н}$, $F_N = 64 \text{ Н}$, в то время, как в аналогичных условиях точения той же стали с HRC_Э60 эти силы имеют меньшую величину (см. рис. 3). Такая закономерность связана, в основном, с изменением характера стружки от сливной (при HRC_Э45) к элементной (при HRC_Э60) и уменьшением в связи с этим степени пластической деформации стружки. Силы Q и F_Q на задней поверхности со снижением твёрдости стали значительно уменьшаются. Так, в процессе точения и $S_0 = 0,04 \text{ мм/об}$ силы $Q = 25 \text{ Н}$, $F_Q = 9 \text{ Н}$, а при точении этой стали твёрдостью HRC_Э60 на этих же режимах силы Q и F_Q имеют в два раза большую величину.

По мере износа резца по задней поверхности силы N и F_N при прочих равных условиях остаются почти постоянными, а силы Q и F_Q – возрастают. При точении с $V = 120 \text{ м/мин}$ стали ХВ1Г твёрдостью HRC_Э60 резцом из композита 01 ($h_z = 0,03 \text{ мм}$) $Q =$

25,5 Н и $F_Q = 6,9$ Н. Когда износ достигает величины $h_3 = 0,2$ мм, силы на задней поверхности увеличиваются до $Q = 155$ Н и $F_Q = 19,6$ Н. Аналогичная картина наблюдается и при точении стали твёрдостью HRC_э45.

Заслуживают внимания весьма высокие значения удельных нормальных и касательных напряжений на передней и задней поверхностях на начальном этапе (участке) периода стойкости (почти острым режущим клином – частично приработанным резцом).

Особенно велики эти напряжения на задней поверхности, которые в диапазоне скоростей резания $V = 40...70$ м/мин достигают величин $q_Q = 3767...4591$ МПа. Объясняется это малыми площадками действительного контакта режущего клина со стружкой и поверхностью резания в процессе тонкого точения закалённых сталей высокой твёрдости.

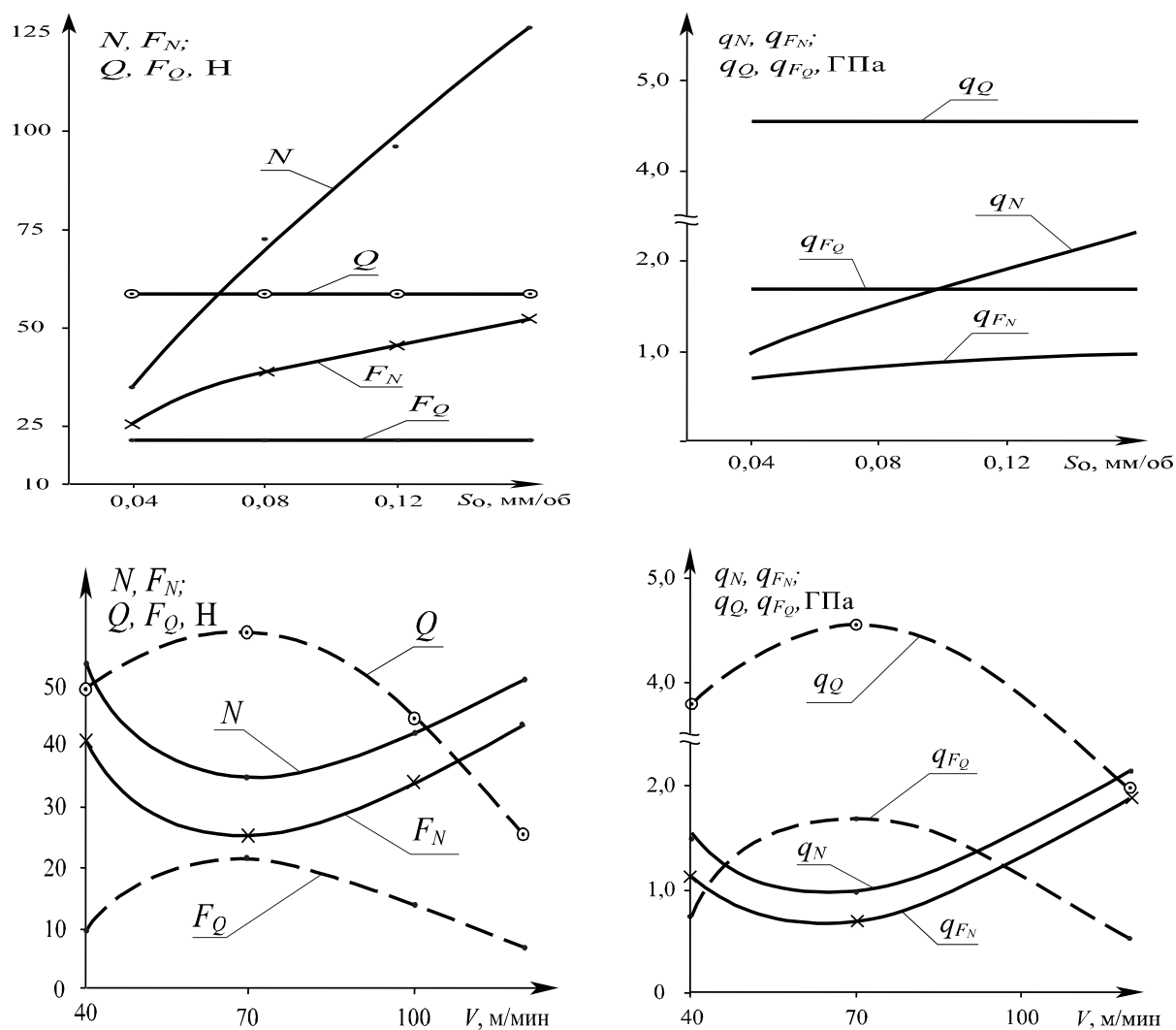


Рисунок 3. Нормальные силы, силы трения и удельные нагрузки (контактные напряжения) при точении частично приработанным ($h_3 = 0,03$ мм) резцом из композита 01 (эльбора-Р) стали ХВ1Г твёрдостью HRC_э 59...61.

Изменения нормальных и касательных напряжений с повышением скорости резания V по своему характеру аналогичны изменениям нормальных и касательных сил. Увеличение подачи S_0 способствует пропорциональному росту удельных нагрузок на передней поверхности и не изменяет их на задней поверхности [8].

Также установлено, что в зависимости от величины износа h_z напряжения q_Q и q_F могут увеличиваться или уменьшаться. При износе $h_z = 0,1$ мм они обычно возрастают по сравнению с острым резцом, а на последующих стадиях износа несколько уменьшаются.

Практика эксплуатации УРИ для наружной и внутренней обработки показала, что технология заточки и доводки РЭ не предполагает получения точно заданного радиуса округления режущих кромок, как главного параметра РК, т. к. эта технология не освоена инструментальной промышленностью во всём мире и является «ноу-хау» отдельных изготовителей прецизионного инструмента. Рекомендации по оптимальному назначению сечения среза a тонкого точения при значении ρ РЭ резцов унифицированных наружных (РУН) и расточных универсальных резцов представлены на рисунок 4. Технология заточки и доводки РЭ унифицированных резцов с использованием многоместных групповых приспособлений освоена разработчиками унифицированного инструмента и с успехом применяется на заводах прецизионного приборо- и машиностроения России [9].

при заданном сечении среза a для устойчивого резания; h_y – упругое последствие обрабатываемого материала (ОМ) после прохода РУН; ρ_T – соответствует предельно большому значению a (для чистового точения), допустимого прочностью режущего клина из твёрдого сплава; β_1 – угол условного сдвига при тонком точении различных пластичных ОМ; 1 – зона финишного тонкого точения при режимах оптимального резания (РОР); 1_m – зона финишного тонкого точения на РОР при высокой жёсткости системы ЗИПС для наружных и расточных

4. Заключение

1. Радиус округления режущей кромки ρ определяет типоразмер РК, его статическую и динамическую прочность во всем рабочем диапазоне режимов резания, особенно ρ должен четко регламентироваться для СТМ при обработке закалённых, высокопрочных и твердых сталей и сплавов.

2. По данным из различных источников для твердых сплавов и СТМ значения ρ может изменяться в широких пределах в зависимости от способа заточки и доводки РК по передней и задней поверхности, зернистости (дисперсности) структуры спеченных инструментальных материалов.

3. Резцовые вставки и неперетачиваемые пластины (СМП) из твердых сплавов и СТМ на инструментальных заводах не умеют затачивать (это «ноу-хау») специально с заданным радиусом ρ , т.е. важнейший параметр типоразмера РК в процессе изготовления не контролируется, как при первичном изготовлении РИ, так и при переточках.

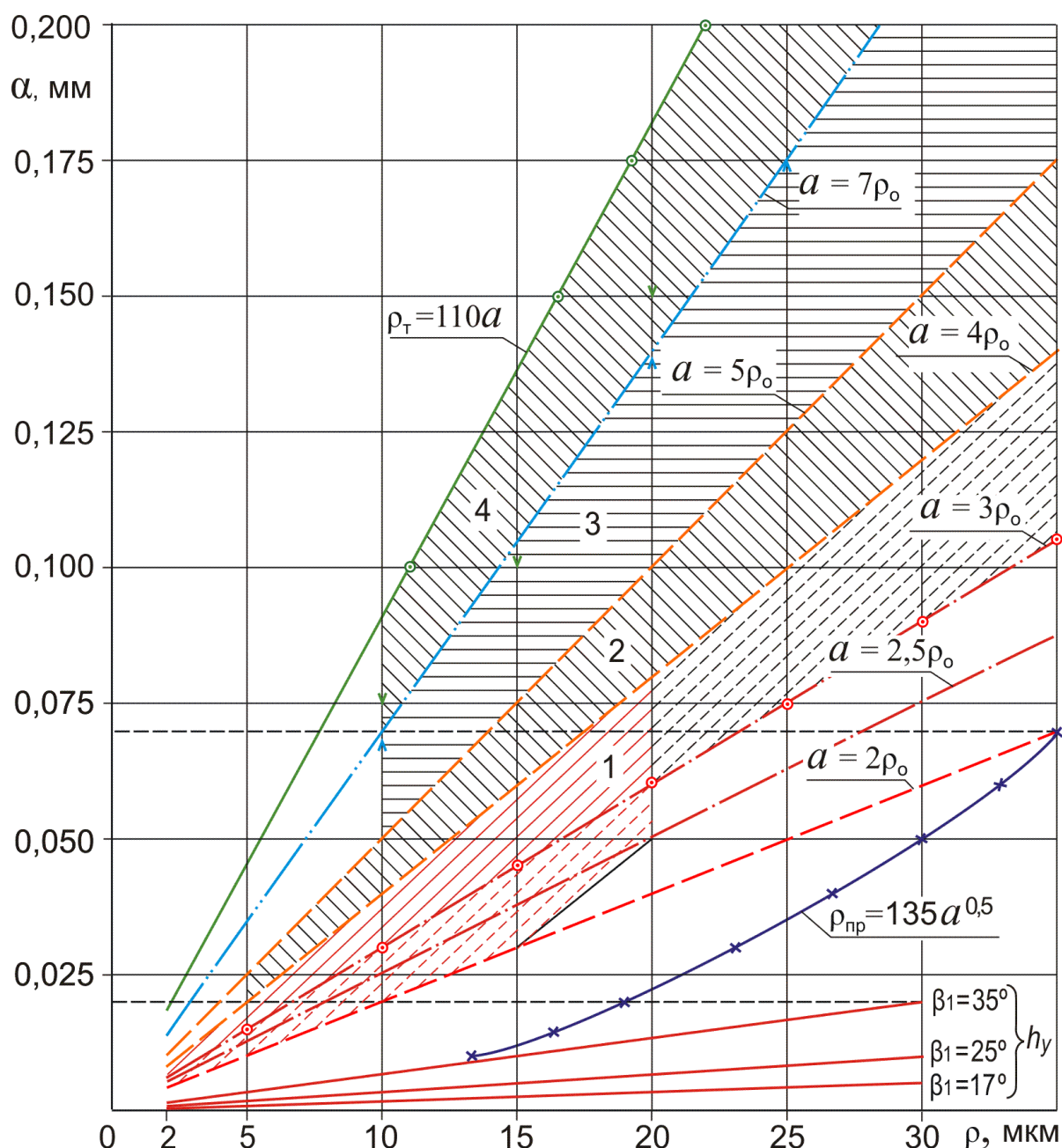


Рисунок 4. Рекомендации по оптимальному назначению сечения среза a тонкого точения при значении радиуса округления режущих кромок РЭ резцов унифицированных наружных (РУН) и расточных: $\rho_{пр}$ - предельно малое значение ρ

4. Технология заточки и доводки РЭ унифицированных резцов с использованием компетенций на уровне «ноу-хау» и многоступенчатых групповых приспособлений освоена разработчиками унифицированного инструмента и с успехом применяется на заводах прецизионного приборо- и машиностроения России.

5. При резании указанными инструментальными материалами $\rho_{пр}$, обеспечивающий наибольшую прочность РК и радиус ρ_r , соответствующий максимальной стойкости, должен увеличиваться с ростом толщины среза.

6. В работе установлены корреляционные зависимости между $\rho_{пр}$ и ρ_r , выраженные эмпирическими уравнениями, составлена таблица этого соответствия и представлен график, отражающий эти закономерности.

7. Изучены величины нормальных сил, сил трения и удельных нагрузок (контактных напряжений) при точении частично приработанным резцом в условиях тонкого точения в диапазоне скоростей резания 30..120 м/мин и подач $S_0 = 0,02...0,16$ мм/об, что дает возможность оптимизировать процесс, как тонкой (финишной), так и предварительной обработки указанных сталей, сплавов и ТОМ.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Режущие инструменты, оснащенные сверхтвёрдыми и керамическими материалами, и их применение: Справочник/ В. П. Жедь, Г. В. Боровских, Я. А. Музыкант, Г. М. Ипполитов. - М.: Машиностроение, 1987. – 320 с.

2. Рыкунов А. Н. Повышение эффективности тонкого точения исходя из достижимых показателей качества деталей и технологических возможностей процессов: Автореф. дисс. ... д.т.н. - М.: –МГТУ «СТАНКИН», 1999. – 30 с.

3. Хаёт Г.Л. Прочность режущего инструмента/ Г.Л. Хаёт. – М.: Машиностроение, 1975. – 168 с.

4. Белозеров В. А. Механика деформирования и разрушения при резании / В. А. Белозеров, М. Х. Утешев, А. Н. Калиев; под ред. М. Х. Утешева. – Том 2. Обработка инструментами из СТМ. – Тюмень : омГНТУ, 2012. – 128 с.

5. Ракунов Ю. П., Абрамов В. В. Регулирование стойкости резцов и качества токарной обработки деталей машин на основе синергетического влияния первичных технологических факторов. // Перспективные разработки науки и техники. Мат-лы междунар. конф. Изд-во: Sp. Z.o.o. “Nauka Istudia”(Przemysl, Польша) 15-19.11.2013.

6. Аранзон М. А. Силы, удельные нагрузки и средние коэффициенты трения на контактных поверхностях инструмента из сверхтвёрдых материалов при тонком точении/ М. А. Аранзон // Обработка высокопрочных сталей и сплавов инструментами из сверхтвёрдых синтетических материалов. – Куйбышев, 1978. – С. 27-37.

7. Ракунов Ю. П., Абрамов В. В. Аналитический метод определения сил резания при тонкой механической обработке. // Перспективные научные исследования. Мат-лы междунар. конф. Изд-во: Бял ГРАД-БГ (г. София, Болгария) 17-25.02.2014.

9. Ракунов Ю. П., Абрамов В. В. Зависимость работоспособности резцов из СТМ от геометрии и режимов резания при точении закаленных сталей // Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика. Мат-лы 16-й междунар. науч.-практ. конф. СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2014. В 2 ч. Ч.1. – 380 с.

10. Ракунов Ю. П., Абрамов В. В., Ракунов А. Ю. Роль скорости резания и радиуса округления режущего клина в эффективности тонкой механической обработки труднообрабатываемых материалов // Журнал «Станкоинструмент». № 1, 2 2020.– С. 66-74.

Поступила в редколлегию 14.04.2025 г.

УДК 621.048.7

Г. А. Сухочев, д-р техн. наук, проф., С. Н. Коденцев, канд. техн. наук, доцент, Е. Г. Смольяникова канд. техн. наук, доцент, В. А. Кашицин, аспирант.

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

E-mail: suhotchev@mail.ru; kodentsev.sergey@mail.ru; sm.evgeniya@gmail.com; benny-grade@yandex.ru

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ УПРОЧНЕНИЯ ВЫСОКО-РЕСУРСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В статье обоснованы возможности повышения эффективности комбинированной упрочняющей обработки поверхностей многократно нагруженных деталей. Выполнен анализ эксплуатационных особенностей физико-механического состояния поверхностей лопаток в коррозионно-активных средах. Предложены возможные комбинации эффективных технологических схем поверхностной обработки для получения эксплуатационно-ориентированных показателей качества лопаточных конструкций применительно к условиям знакопеременных нагрузок в экстремальных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: эффективность процесса, упрочнение поверхности, эксплуатационные условия, лопаточные детали, комбинированные воздействия, наклеп

G. A. Sukhochev, A. M. Kadyrmetov, E. G. Smolyannikova, V. A. Kashitsin

IMPROVING THE EFFICIENCY OF HIGH-RESOURCE REINFORCEMENT TECHNOLOGY

The article substantiates the possibilities of increasing the efficiency of combined hardening surface treatment of reusable loaded parts. The analysis of the operational features of the physico-mechanical condition of the blade surfaces in corrosive environments has been performed. Possible combinations of effective technological schemes of surface treatment are proposed to obtain operationally oriented quality indicators of blade structures in relation to alternating loads under extreme operating conditions.

Keywords: process efficiency, surface hardening, operating conditions, blade parts, combined effects, slanting.

1. Введение

Для технологического обеспечения эксплуатационных показателей агрегатов двигательных установок многоназначного назначения необходимо особое внимание обратить на наиболее проблемные агрегаты и их базовые детали с точки зрения эксплуатации в экстремальных условиях. Таким актуальным примером является турбонасосный агрегат, высокооборотный ротор которого насыщен лопаточными конструктивными элементами. Возможности технологического обеспечения ресурса с учетом сложной конструкции лопаточных деталей на высокооборотных режимах, технологически наследованные дефекты от предыдущих операций обработки значительно снижаются негативным влиянием жестких условий работы турбоагрегата при нестационарных нагрузках в работе жидкостно-реактивной двигательной установки [1]. По этой причине создание многоназначных агрегатов для перспективных ракетных двигателей является сложной конструкторско-технологической задачей. Нетехнологичность конструкции в значительной мере проявляется в ограничении допуска в зону обработки труднодоступных элементов инструментария для промышленной реализации механизированных отделочно-зачистных или упрочняющих технологических операций. Так типовое рабочее колесо турбины высоконапорного турбонасосного агрегата имеет сложную пространственную конфигурацию, эксплуатируется при нестационарных динамических условиях в криогенной среде жидкого водорода. Заготовку конструктивно сложного рабочего колеса турбины получают высокотемпературным синтезом из мелкофракционных порошков сложнолегированного жаропрочного никельсодержащего сплава как монолитный по-

луфабрикат. В процессе формирования проточной части межлопаточных каналов критически важно поддерживать зазор между соседними лопатками на уровне не менее 2 мм. Образование усталостных трещин в конструкции лопаток напрямую связано с воздействием малоцикловых деформаций, возникающих вследствие частотного влияния переменных нагрузок знакопеременного характера. Эти нагрузки дополнительно осложняются периодическими колебаниями рабочего давления в системе.

Особую опасность представляет проникновение водорода в микротрещины, расположенные на поверхности лопатки. Данное явление провоцирует значительное усиление расклинивающего эффекта и ускоряет процессы разрушения материала. В результате в местах концентрации напряжений водородное воздействие приводит к существенному снижению предела прочности конструкции, что критически влияет на её эксплуатационные характеристики. [1].

2. Основное содержание и результаты работы

Анализ характера повреждений, явившихся причиной выхода рабочих колес турбин из строя, выявляет основные виды отказов, к которым относятся: усталостный излом, растрескивание и разрушение кромок лопаток, а также и других конструктивных элементов (рис. 1, 2). При обработке лопатки различными методами в ее поверхностном слое образуется множество разветвленных мелких трещин с выходом на поверхность (рис. 3), содержащих по глубине два участка: верхний h_1 , на котором поля свободной поверхностной энергии одной стороны трещины и другой не перекрываются, а силы молекулярного притяжения между ними не проявляются; нижний h_2 , на котором молекулярные поля одной и другой сторон перекрываются.

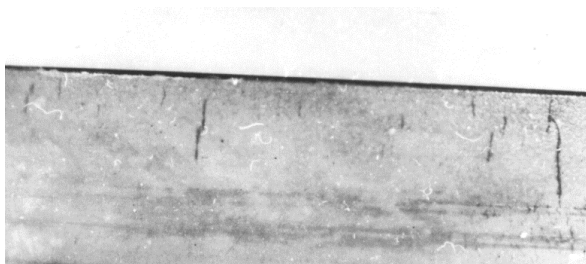


Рисунок 1. Трещиноватый слой на поверхности/под поверхностью детали после ресурсных испытаний

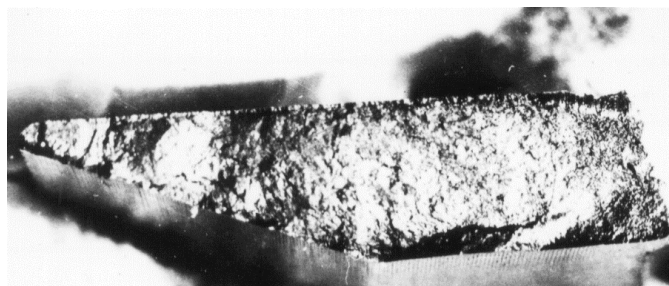


Рисунок 2. Излом усталостного характера

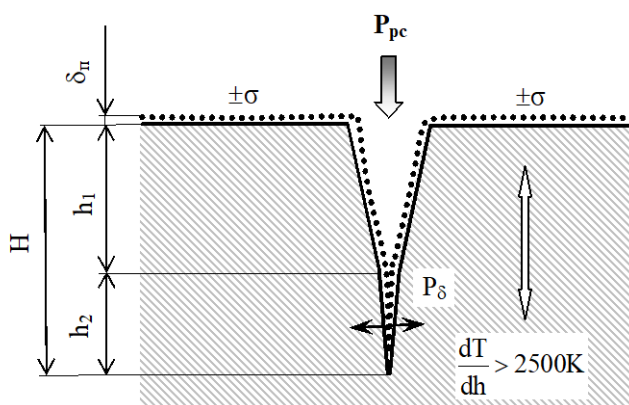


Рисунок 3. Схема участка поверхности с микротрещиной в водородосодержащей среде

В процессе развития дефекта между противоположными стенками трещины возникают специфические явления. Силы молекулярного притяжения проявляются на различных участках трещины, причем их интенсивность возрастает по мере приближения к устью концентратора формирующегося поверхностного или подповерхностного дефекта. При проникновении рабочей среды в полость трещины молекулы оседают на поверхности трещины и эффективно нейтрализуют некомпенсированные электрические поля материала, что приводит к существенному снижению сжимающих напряжений. Эксплуатационные нагрузки создают дополнительное напряжение в устье трещины. Это может привести к разрушению связей между элементами кристаллической решетки, что вызывает дальнейшее распространение трещины внутри лопатки. Процесс усугубляется расклинивающим эффектом от адсорбционных слоев среды, который усиливает нарушение поверхностного слоя материала. Избыточная свободная энергия тонких устойчивых пленок ($E\delta$) демонстрирует резкое увеличение при уменьшении толщины пленки (δn). Это явление обусловлено расклинивающим давлением ($P\delta = -dE\delta/d\delta n$), которое всегда противодействует уменьшению толщины пленки и уравнивается внешними силами.

Особого внимания заслуживает влияние расклинивающего давления со стороны сольватных пленок жидкости и адсорбционных слоев. Эти факторы значительно замедляют процесс смыкания микрощелей, особенно в местах с тупиковыми участками. В некоторых случаях они могут полностью предотвратить смыкание, когда молекулярные силы сцепления в наиболее узких частях микрощелей оказываются недостаточными для вытеснения предельно тонких мономолекулярных и адсорбционных слоев.

При высоком давлении внешней рабочей среды (P_{pc}) расклинивающее давление играет ключевую роль в формировании защитного барьера, препятствующего дальнейшему развитию трещины.

$$P\delta' = -(dE\delta/d\delta n + P_{pc}). \quad (1)$$

Расклинивающее давление в среде водорода:

$$P_{\delta'}/P_{pKH} = P\delta' = d\{A[(\ln BP_0)^2 - (\ln BRTC_H)^2]/d\delta n\} + P_{pc}, \quad (2)$$

где A и B – безразмерные константы;

P_H – давление адсорбированного водорода;

P_0 – давление водорода при степени покрытия поверхности $Q=0$.

Так как $P_0 < P_H$, при $\ln B = k_{H2}$,

$$P_{pKH} = k_{H2} d(RTC_H)^2 / d\delta_n + P_{pc}. \quad (3)$$

Условие достаточности для уравнивания напряженности поверхностного слоя лопаточной детали в экстремальных условиях:

$$\sigma_{сж} > (\sigma_{\varepsilon \max} + P_{pKH}) - \sigma_T, \quad (4)$$

где $\sigma_{\varepsilon \max}$ – максимальное растягивающее напряжение, возникающее под действием на деталь эксплуатационных нагрузок и градиента температур.

Выражения (1)–(4) показывают степень взаимного влияния состояния обрабатываемых материалов, газовой и жидкой фаз криогенных сред, градиентов температур, а также зависимость эксплуатационных показателей от основных факторов: механических свойств поверхностного слоя материала лопаточной детали и характеристик микроуглублений в зоне концентратора напряжений. В этом случае повышение долговечности и безотказности нагруженных лопаточных деталей и транспортных машин в целом решается технологическими методами. Анализ технологических возможностей различных методов и средств технологического оснащения, а также учет явлений технологической наследственности от предшествующих этапов обработки позволяют установить критерии выбора наиболее эффективного комбинированного метода или комбинации последовательно применяемых способов поверхностной обработки применительно к конструктивным особенностям каналов и условиям работы (таблица 1).

Выбор оптимальных режимов упрочняющей обработки, обеспечивающих стабильность эксплуатационных показателей поверхностного слоя канала малого сечения, проводится с учетом условия достаточности для уравнивания напряженного состояния поверхностного слоя лопаточной детали в критичных условиях эксплуатации [1]:

$$\sigma_{сж} > (\sigma_{\varepsilon \max} + \sigma_{раск}) - \sigma_T, \text{ МПа}, \quad (5)$$

где $\sigma_{\varepsilon \max}^+$ – максимальное растягивающее напряжение на поверхности, возникающее под действием на деталь эксплуатационных нагрузок и градиента температур; $\sigma_{раск}$ – напряжение от действия расклинивающего эффекта в микротрещинах поверхности от адсорбционных слоев среды; σ_T – предел текучести материала.

Количество циклов до начала образования трещин зависит от величины растягивающего напряжения и упругопластической деформации в зоне концентратора напряжений, которые в свою очередь напрямую зависят от пластичности материала и величины дефекта на поверхности лопатки. Таким образом, задача повышения ресурса работы лопаточной детали сводится к получению равномерного наклепа и остаточных напряжений сжатия по всему профилю межлопаточного канала при условии отсутствия дефектов поверхностного слоя лопаток. Повышение эффективности работы насосного оборудования в определяющей степени зависит от стабильности микрогеометрии и величины шероховатости проточной части, то есть межлопаточных каналов. Правильный выбор способов технологического обеспечения эксплуатационных характеристик в соответствии с разработанными рекомендациями (таблица 1) необходим для исключения возможности перенаклепа поверхности детали, который осуществляется при следующем условии, аналогично приведенному в [1]:

$$\sigma_{сж\max} + \sigma_{\varepsilon\max} + \sigma_{раск} \geq \sigma_t, \text{ МПа}, \quad (6)$$

где $\sigma_{\varepsilon\max}$ – максимальное напряжение сжатия, возникающее под действием на деталь эксплуатационных нагрузок.

С учетом требований (2) условие, исключаяющее этот перенаклеп:

$$\delta_{об} < \delta_{обкр}, \text{ мм},$$

где $\delta_{обкр}$ – критическая величина прогиба контрольного образца, соответствующая началу формирования технологического или эксплуатационного перенаклепа поверхности:

$$\delta_{обкр} = 0,008(\sigma_T - \sigma_{\varepsilon\max} - \sigma_{раск}) \left(1 - 0,555 a_{дет}\right) \frac{a_{дет}}{k_E k_\delta}, \text{ мм}; \quad (7)$$

где $k_E = E_{дет}/E_{об}$ – коэффициент, учитывающий соотношение модулей упругости материалов детали и образца; $k_\delta = \delta_{об\det}/\delta_{обк}$ – коэффициент, численно равный отношению прогибов обработанных в одинаковых условиях образцов из материалов детали и контрольного материала; $a_{дет}$ – глубина наклепа материала детали.

При использовании классических методик дробеструйной обработки в условиях значительных нагрузок возникали нежелательные эффекты, связанные с формированием поверхностных сдвиговых деформаций [2]. В качестве альтернативы для комплексной обработки криволинейных проточных каналов лопаточных элементов с наружным бандажом разработана инновационная технология импульсно-ударного упрочнения.

Принцип данной методики заключается в прерывистом импульсном перемещении гранулированного обрабатывающего материала через межлопаточные каналы при воздействии низкочастотных вибраций [3]. Такой подход позволил эффективно управлять процессом обработки каналов, обеспечивая равномерное упрочнение и высокое качество поверхностного слоя. Были созданы специализированное оборудование и оснастка для реализации данной технологии.

Однако практический опыт применения показал, что метод не всегда гарантирует равномерное распределение наклепа и требуемую шероховатость поверхности в сужающихся криволинейных межлопаточных пространствах с углом раскрытия менее 45° [1].

Для расширения технологических возможностей процесса была создана комбинированная методика, объединяющая механическое импульсно-ударное воздействие металлических гранул с процессом локального анодного растворения вершин микронеровностей. Это существенно увеличило интенсивность обработки [4]. Такой подход обеспечивает равномерное уменьшение высотных параметров шероховатости по всей глубине криволинейного сужающегося межлопаточного канала.

Ключевые показатели качества, влияющие на эксплуатационные характеристики лопаточных элементов при упрочнении непрофилированным инструментом (гранулами), включают:

- снижение среднего отклонения профиля Ra;
- степень наклепа UN;
- глубину наклепа поверхностного слоя an;

- толщину трещиноватого слоя h_t ;
- величину и характер распределения остаточных напряжений $\sigma_{ост}$;
- равномерность изменений по поверхности лопатки.

При этом простая инструментальная фиксация отдельных показателей качества не даёт полного представления о комплексном механизме технологического обеспечения эксплуатационных характеристик лопаточных деталей и агрегатов на их основе.

Комплексное влияние достигнутых показателей качества на наиболее важные эксплуатационные показатели, такие, как КПД, определяется гидравлическими расходными испытаниями, а ресурс работы поверхности лопатки выявляется при разгонных испытаниях турбин в технологических имитаторах ротора.

Обеспечение необходимых показателей качества открытых поверхностей деталей технических трудностей на представляет. В нашем случае под качеством отделочно-упрочняющей обработки лопаточных деталей подразумевается качество обработки закрытых поверхностей – межлопаточных каналов, определяющее эксплуатационные характеристики таких деталей. Основные факторы, существенно влияющие на качество обработки поверхностей межлопаточных каналов, исходя из возможности практического воздействия условий обработки на вышеуказанные показатели качества, подразделяем на группы неуправляемых и управляемых/управляющих факторов (рисунок 4).



Рисунок 4. Основные факторы, влияющие на качество обработки поверхностей лопаток

Факторы, влияющие на качество обработки, структурированы в виде групп, каждая из которых включает подгруппы с однородными элементами по характеру их воздействия на конечный результат. Управляемые факторы представляют собой ключевые параметры, позволяющие целенаправленно корректировать условия обработки для достижения требуемого качества. Их особое значение заключается в том, что они не просто поддаются регулированию, но и выступают в роли управляющих элементов при выполнении операций по упрочнению поверхностей межлопаточных каналов.

Для достижения максимальной эффективности процесса упрочнения критически важно провести комплексную оптимизацию всех взаимосвязанных управляемых и управляющих факторов. При этом необходимо учитывать конструктивные и технологические особенности конкретных деталей, а также энергетический баланс всех компонентов комбинированного процесса. Реализация оптимальной настройки каждой подгруппы управляемых факторов требует разработки специального оборудования и технологической оснастки, обладающей необходимыми характеристиками для успешного проведения комбинированных операций. Важнейшие параметры такого оборудования отражены в таблице 1.

Ключевые подгруппы управляемых факторов:

- характеристики рабочей среды;
- параметры режима обработки;
- продолжительность технологического процесса.

Для эффективной настройки этих параметров требуется проведение как теоретических исследований, так и практических экспериментов, направленных на изучение закономерностей комбинированного процесса обработки в специфической зоне межлопаточного пространства детали.

Таблица 1. Способы обработки поверхностей межлопаточных каналов

Типовая лопаточная деталь	Минимальное межлопаточное расстояние, $b_{k \min}$, мм	Угол видимости труднодоступных поверхностей, $\varphi_{\max}$, град.	Способ получения лопаток	Наследованная шероховатость, R_a , мкм	Основной эксплуатационный показатель	Определяющий показатель качества поверхности	Наиболее эффективный метод поверхностной обработки межлопаточных каналов
1	2	3	4	5	6	7	8
Турбина компрессора	20–60	≥ 45	Литье	15–20	КПД	R_a	Струйно-абразивный
Крыльчатка насоса с открытыми каналами			Литье	20–40			Виброабразивный

Продолжение таблицы 1

			Фрезе- рование	10–15			Виброабразивный + струйнодинамический
Колесо тур- бины ком- прессора	10– 30	<45	Литье	15–20	Ресурс КПД	$\sigma_{ост},$ $U_H,$ R_a	Виброабразивный + виброударный
Крыльчатка с закрытыми каналами		<30	Литье	10–30	КПД Ресурс	$R_a,$ $\sigma_{ост},$ U_H	Виброударный + струйно-динамический
			ГИП	20–40			Импульсно-ударный
Колесо турбины с закрытыми каналами	5–10	<30	Литье	20–50	Ресурс КПД	$\sigma_{ост},$ U_H R_a	Комбинированное им- пульсно-ударное экс- трудирование
			Литье	10–30			Комбинированный ударно-импульсный
	2–5	<45	ЭФО	5–10			

3. Заключение

Сравнение результатов комбинированной обработки с возможностями других, ранее освоенных технологических методов по обеспечению параметров качества поверхностного слоя лопаток на типовых образцах натуральных деталей приведено в таблице 2.

Таблица 2. Результаты отделочно-упрочняющей обработки каналов турбины по различным технологическим схемам

Показатель качества обработки	Способ обработки (комбинация способов)			
	Вибро- шлифо- вание	Виброшлифова- ние + струйно- динамическая об- работка	Виброудар- ное экстру- дирование	Магнитоимпульсная обработка + анодное растворение
Микротвердость, МПа	3200	3500	3500	4100
Изменение микро- твердости, МПа	200	400	400	990
Степень наклепа, %	8	17	18	25
Глубина наклепа, мм	0,025	0,045	0,05	0,06
Параметр шероховато- сти R_a , мкм	2,7	2,1	1,7	1,1
Глубина микротре- щин, мкм	5,5	3,5	2,2	1,0

После завершения опытно-технологических работ намеченный комплекс мероприятий позволит достигнуть:

- стабилизации показателей качества лопаточных деталей, что позволит поднять наработку на отказ более чем в 2 раза, снизить потери от переборок турбонасосных агрегатов до 300% в процессе контрольно-технологических испытаний;

- повышения качества, надежности и безотказности изделий в целом до 20–с учетом условий эксплуатации, позволяя снизить материальные затраты на устранение

нештатных ситуаций и отказов раз, повысить производительность при изготовлении и технологических испытаниях.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Сухочев Г. А. Технологические методы повышения эксплуатационных показателей транспортных машин в экстремальных условиях / Г. А. Сухочев // Техника машиностроения. 2005. № 3. С. 52–54.

2. Небольсин Д. М. Технологические параметры комбинированной струйно-динамической обработки внутренних поверхностей / Д. М. Небольсин, Г. А. Сухочев, С. Н. Коденцев, Е. Г., Смольяникова // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2012. – № 5. – С. 41–46.

3. Патент №2788444 Российская Федерация, В23Н 5/06, В23В 09/00. Способ упрочнения внутренних поверхностей каналов деталей / Г. А. Сухочев, А. М. Некрылов, А. Ю. Грымзин, С. Н. Подгорнов, Д. В. Силаев; заявитель и патентообладатель Воронежский государственный технический университет. № 2022100797, заявл. 25.05.20219; опубл. 19.01.2023, Бюл. №2. 8с.

4. Грымзин А. Ю. Технологическое обеспечение показателей качества поверхностей проточных каналов / А. Ю. Грымзин, Г. А. Сухочев // Насосы. Турбины. Системы. 2022. № 1 (42). С. 31-37.

6. Янюшкин А. С., Архипов П. В., Торопов В. А. Механизм процесса засаливания шлифовальных кругов// Вестник машиностроения. 2009. №3. С.62-69.

Поступила в редколлегию 09.04.2025 г.

УДК 621.838.21.059.14

Е. С. Чавров, аспирант, **Е. А. Ефременков**, канд. техн. наук, доц.
Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия
Тел./Факс: +7 (923) 4453696; E-mail: esc12@tpu.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАТЕРИАЛОВ КОНТАКТИРУЮЩИХ ЗВЕНЬЕВ НА КОНТАКТНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ЗАЦЕПЛЕНИИ ПЕРЕДАЧИ С ПРОМЕЖУТОЧНЫМИ ТЕЛАМИ КАЧЕНИЯ

В статье рассматриваются передачи с промежуточными телами качения и свободной обоймой (ПТКСО). Представлена схема передачи с ПТКСО. Рассмотрены формы тел качения и материалы из которых могут быть изготовлены тела качения, исследуемой передачи. Изучены материалы, используемые для изготовления деталей, имеющих циклоидальный профиль. Исследовано влияние материалов тел качения, кулачка и венца передачи с ПТКСО на контактные напряжения в ее зацеплении.

Ключевые слова: контактное напряжение, зацепление, промежуточное тело качения, циклоидальный профиль, пятно контакта, прочность.

E. S. Chavrov, E. A. Efremenkov

THE EFFECT OF CHANGES IN THE MATERIAL OF CONTACTING PARTS ON CONTACT STRESSES IN MESHING OF TRANSMISSIONS WITH INTERMEDIATE ROLLING BODIES AND FREE CAGE

This article discusses transmissions with intermediate rolling bodies and free cage (IRBFC). A diagram of a transmission with IRBFC is presented. The shapes of the rolling elements and the materials from which they can be made are considered. Materials used for the manufacture of parts with a cycloidal profile are studied. The influence of the materials of the rolling elements, cam, and ring gear of a transmission with IRBFC on the contact stresses in its meshing is investigated.

Keywords: contact stress, meshing, intermediate rolling body, cycloidal profile, contact spot, strength.

1. Введение

Передача с промежуточными телами качения (ПТК) находит широкое применение в различных областях машиностроения. Передачи с ПТК и им подобные активно используют в отраслях: нефтегазовой; сельскохозяйственной; подъемно-транспортной [1]. Широкое применение этих передач и возрастающий к ним интерес объясняется компактностью, большим диапазоном передаточных чисел в одной ступени и высоким коэффициентом полезного действия (КПД) (теоретически от 0,8 до 0,94) [2]. Но такая передача имеет существенный недостаток, во время работы механизма между стенками пазов сепаратора и телами качения возникает трение скольжения, в результате чего сепаратор получает износ, что является критическим для механизма, так как сепаратор является тонкостенной деталью, передающей крутящий момент [3].

Проектирование любой передачи в стандартном виде включает в себя проектировочный и проверочный расчеты. При выполнении проектировочного расчета, из условия прочности рассчитываются геометрические характеристики передачи. Найденные значения этих характеристик подставляются в проверочный расчет для проверки выполнения условия прочности. Для проверки выполнения условия прочности в передаче с ПТК и ей подобным, необходимо произвести сравнение максимального контактного напряжения в зацеплении с допускаемым контактным напряжением. Допускаемое контактное напряжение есть отношение допускаемого напряжения на растяжение к корректирующему коэффициенту. Максимальное

контактное напряжение в зацеплении определяется путем перебора усилий, действующих в зацеплении, и радиусов кривизны контактирующих звеньев. Кроме того, контактное напряжение в зацеплении зависит от материалов, которые используются для изготовления контактирующих деталей передачи. При правильном подборе материалов можно добиться снижения контактных напряжений в зацеплении и, как следствие, повышения КПД и долговечности передачи.

Передача с промежуточными телами качения и свободной обоймой (ПТКСО) является доработанным вариантом передачи с ПТК. Передача с ПТКСО периодически упоминается как передача с разгруженным сепаратором, поскольку сепаратор не участвует в передаче крутящего момента и является разгруженным. Поэтому передача с ПТКСО имеет преимущество перед передачей с ПТК и является более технологичной. А для того, чтобы производить высокотехнологичные редукторы на основе передач с ПТКСО, необходимо очень деликатно подходить к вопросам проектирования передачи и оценки контактных напряжений в зацеплении.

Таким образом, исследование влияния материалов контактирующих звеньев на контактные напряжения в зацеплении передачи с промежуточными телами качения и свободной обоймой является актуальным.

2. Основное содержание и результаты работы

Как упоминалось ранее, передача с ПТКСО является наиболее перспективной для применения в современных механизмах. Поэтому оценку контактных напряжений при использовании различных материалов звеньев передачи будем проводить на примере передачи с ПТКСО.

Передача с промежуточными телами качения и свободной обоймой (рис. 1) включает в себя: 1 – входной вал с эксцентриком; 2 – подшипник; 3 – кулачок; 4 – тело качения; 5 – сепаратор; 6 – венец. У передачи три центра и два эксцентриситета: O_1 – ось кулачка; O_2 – ось центров тел качения; O_3 – ось передачи (венца); e – полный эксцентриситет; e_1 – межосевое расстояние (эксцентриситет) [2].

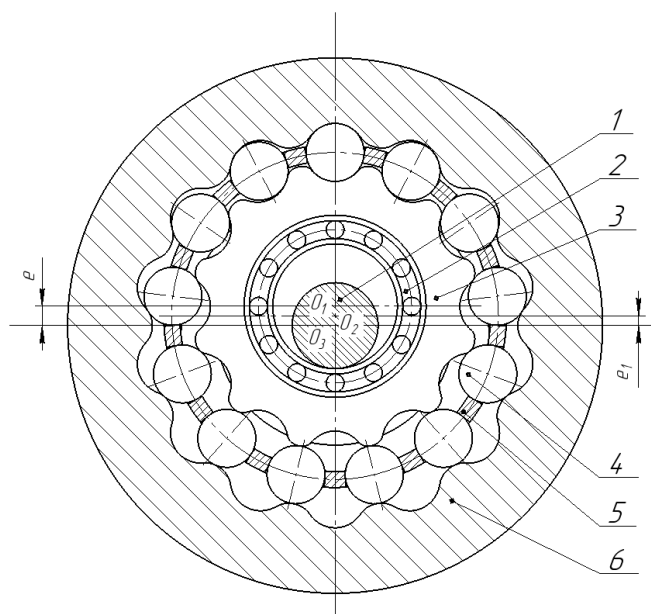


Рисунок 1. Схема передачи с ПТКСО

В зацеплении передачи возникают контактные напряжения в точках контакта: кулачка и тела качения; венца и тела качения. Наиболее нагруженным является контакт тела качения с профилем кулачка, т.к. кулачек имеет меньшие размеры, чем венец, и усилия на него действуют больше. Кроме того, найденные результирующие усилия на кулачке далее используются для определения грузоподъемности опоры под кулачком и подбора подшипника качения.

В качестве тел качения в передачах с ПТКСО применяют ролики и шарики. При использовании в конструкции цилиндрического ролика, пятно контакта имеет эллиптическую форму, вытянутую вдоль оси ролика, соответственно усилие f распределено на длину ролика l_p (рис. 2).

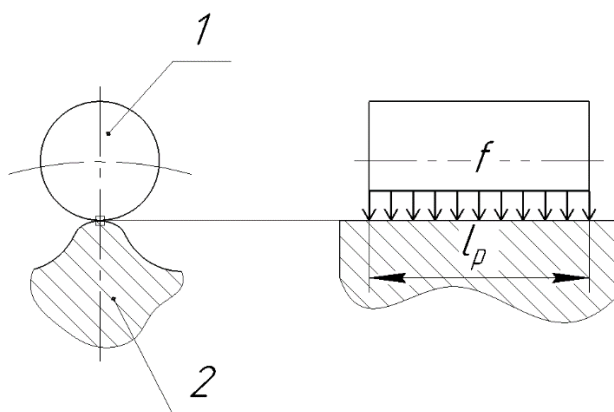


Рисунок 2. Контакт ролика с циклоидой: 1 – цилиндрический ролик; 2 – циклоидальный профиль кулачка

При использовании шарика в качестве тела качения, теоретически (при абсолютно твердых контактирующих звеньях) касание происходит в точке. Тогда, усилие F в зацеплении передачи с ПТКСО концентрируется непосредственно в точке контакта (рис. 3).

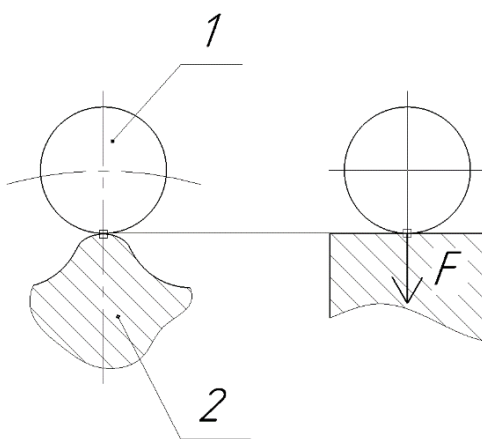


Рисунок 3. Контакт шарика с циклоидой: 1 – шарик; 2 – циклоидальный профиль кулачка

В данной работе исследуются материалы для передачи с ПТКСО с телами качения, выполненными в форме шара. Использование шариков в конструкции

передачи, способствует уменьшению трения скольжения за счет уменьшения пятна контакта.

Согласно литературному источнику [4] выбраны два подходящих типа контакта: для случая, когда тело качения находится во впадине циклоидального профиля – сферическое тело и цилиндрический желоб (выпукло-вогнутый контакт) (рис. 4а); для случая, когда тело качения находится на вершине циклоидального профиля – сферическое тело и цилиндр (выпукло-выпуклый контакт) (рис. 4б).

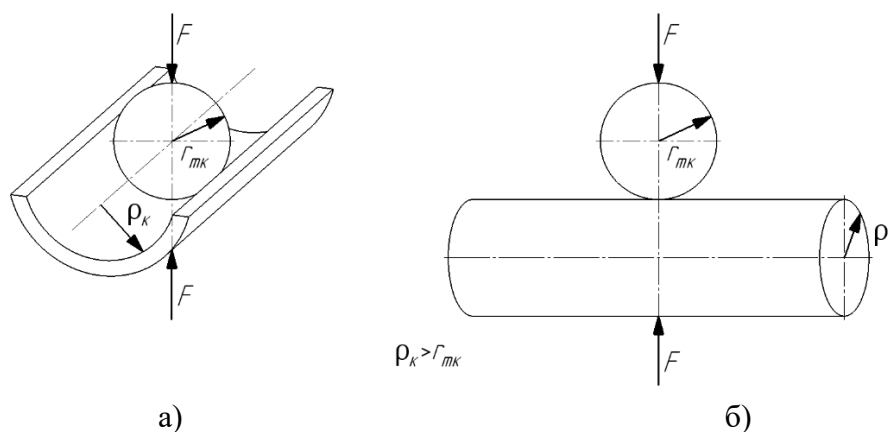


Рисунок 4. Схема касания: а – сферическое тело и цилиндрический желоб; б – сферическое тело и цилиндр

То есть согласно рисунку 4а цилиндрический желоб является впадиной циклоидального профиля кулачка, а исходя из рисунка 4б цилиндр является вершиной циклоидального профиля кулачка. В качестве материалов для кулачка может быть использован АМг6 или полипропилен PP-1200. Оба материала имеют низкий коэффициент удельной массы и представлены на рынке в качестве порошка, поэтому детали из этих материалов могут быть изготовлены при помощи 3D-печати технологией SLS. Шарики, которые могут быть использованы как тела качения в передаче, в основном изготавливаются из материалов: Q235 (аналог Ст3пс); керамика Si_3N_4 ; керамика ZrO_2 ; AISI 304 (аналог 08X18H10), широко представлены на рынке и доступны для покупки. При проведении исследования необходимо установить механические характеристики материалов: коэффициент Пуассона и модуль Юнга. Проведя анализ источников [4-9], сформирована таблица 1 с необходимыми характеристиками для определенных материалов.

Таблица 1. Характеристики материалов для кулачка и тел качения

Параметр, ед. изм.	Материалы кулачка		Материалы тел качения			
	АМг6	Полипропилен PP-1200	Q235 (аналог Ст3пс)	Керамика Si_3N_4	Керамика ZrO_2	AISI 304 (аналог 08X18H 10)
Модуль Юнга E , Па	$70 \cdot 10^9$	$1,25 \cdot 10^9$	$201 \cdot 10^9$	$315 \cdot 10^9$	$225 \cdot 10^9$	$211 \cdot 10^9$
Коэффициент Пуассона μ	0,3	0,41	0,26	0,225	0,225	0,275

Рассмотрим формулу для определения контактных напряжений в зацеплении для ранее рассмотренных (рис.4) схем контакта [4]. Наибольшее контактное напряжение, возникающее на площадке при давлении сферического тела на цилиндрический желоб со знаком “-” и при давлении сферического тела на цилиндр со знаком “+”, определяется по формуле:

$$\sigma_{max} = 0,365n_p \sqrt[3]{F \frac{\left(\frac{2\rho_k \pm r_{TK}}{r_{TK}\rho_k}\right)^2}{\left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2}\right)^2}}, \quad (1)$$

где n_p - коррекционный коэффициент; F – взаимное усилие в контакте тела качения с профилем кулачка; ρ_k – радиус кривизны кулачка; r_{TK} – радиус тел качения; μ_1 и μ_2 – коэффициенты Пуассона материалов тел качения и кулачка; E_1 и E_2 – модули упругости материалов тел качения и кулачка.

После определения наибольшего контактного напряжения в зацеплении, необходимо провести проверку прочности согласно следующему условию [4]:

$$\sigma_{max} \leq \frac{[\sigma]_p}{m} = [\sigma]_{\text{конт}},$$

где $[\sigma]_p$ – допускаемое напряжение на растяжение; $[\sigma]_{\text{конт}}$ – допускаемое контактное напряжение; m – коррекционный коэффициент.

В настоящей работе приняты к исследованию 2 материала для кулачка и 4 материала для тел качения. Рассмотрев данные литературных источников [4-5, 10-11] сведем необходимый нам параметр для различных материалов в таблицу 2.

Таблица 2. Допускаемое напряжения на растяжение

Материал кулачка/тела качения	$[\sigma]_p$, МПа
АМг6	53
Полипропилен PP-1200	22
Q235 (аналог Ст3пс)	152
Керамика Si ₃ N ₄	292
Керамика ZrO ₂	413
AISI 304 (аналог 08X18H10)	245

Согласно принятым ранее к исследованию материалам будем рассматривать 8 вариантов сочетаний материалов: 4 из которых для кулачка из материала АМг6 ($[\sigma]_p=53$ МПа) и другие 4 для кулачка из материала PP-1200 ($[\sigma]_p=22$ МПа).

Для расчета контактных напряжений в зацеплении потребуются входные параметры передачи с ПТКСО [2], примем следующие: $r_2=5,5$ мм (радиус производящей окружности); $\chi=1,45$ (коэффициент смещения); $r_{TK}=1$ мм (радиус тел качения); $Z_2=22$ (число тел качения) и $T_k=7,5$ Нм (крутящий момент на кулачке).

Используя формулу (1) при помощи программного обеспечения Microsoft Excel произведены расчеты контактных напряжений и построены необходимые для оценки графики. Нулевое и одиннадцатое тела качения расположены на одной вертикали с полюсом зацепления P и осью кулачка O_1 , соответственно из-за отсутствия плеча, усилия и контактные напряжения в зацеплении с этими телами стремятся к 0. В

зацеплении постоянно участвуют до 50% тел качения [2]. Так под нагрузкой могут находиться максимально 11 из 22 тел качения, исследуемой передачи. Поэтому контактные напряжения рассматриваем на телах качения с 1 по 10.

На рисунке 5 изображен график, на горизонтальной оси которого указан номер тела качения, а на вертикальной оси – контактные напряжения в зацеплении с этими телами качения. Материал тел качения для обоих вариантов выбран Q235.

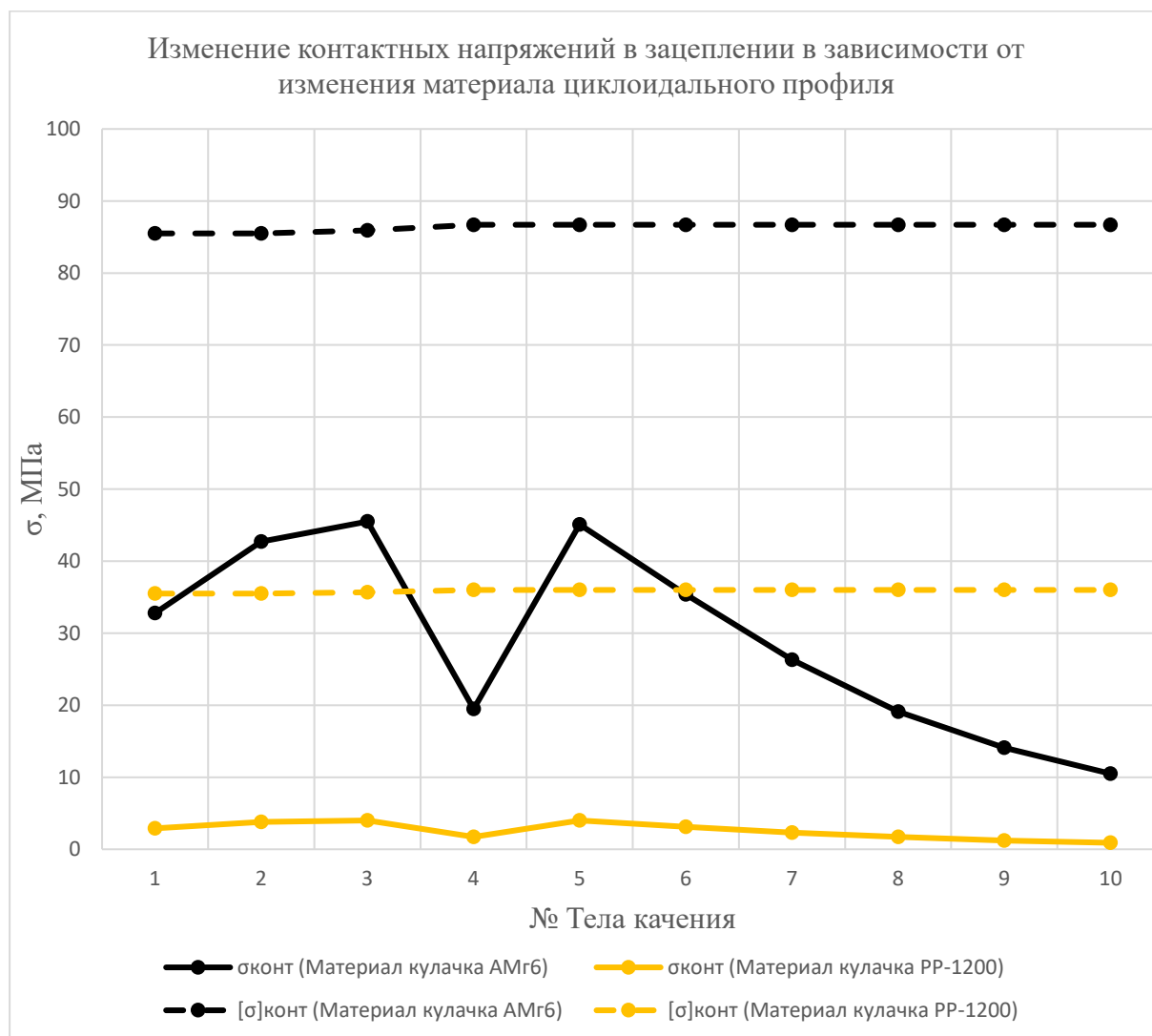


Рисунок 5. График зависимости контактных напряжений в зацеплении от тела качения, участвующего в зацеплении при изменении материала циклоидального профиля кулачка

Из графика видно, что для контакта стального тела качения с кулачком из АМг6 и РР-1200 напряжения в зацеплении ниже допускаемых, для выбранных параметров передачи с ПТКСО. Так для обоих вариантов условие прочности на контакт удовлетворяется:

$$\sigma_{\text{конт3 АМг6}} \leq [\sigma]_{\text{конт3 АМг6}}; 45,5 \text{ МПа} \leq 85,9 \text{ МПа},$$

$$\sigma_{\text{конт3 РР-1200}} \leq [\sigma]_{\text{конт3 РР-1200}}; 4 \text{ МПа} \leq 35,7 \text{ МПа}.$$

С материалом АМг6 допускаемое напряжение превышает расчетное в 2 раза, а с материалом РР-1200 в 9 раз. Отсюда следует, что при выборе РР-1200 в качестве материала для кулачка, запас прочности значительно больше. Тогда дальнейшие исследования будут проводиться на материале РР-1200.

На рисунках 6 и 7 изображены графики контактных напряжений в зацеплении кулачка с третьим телом качения, изготовленного из различных материалов.

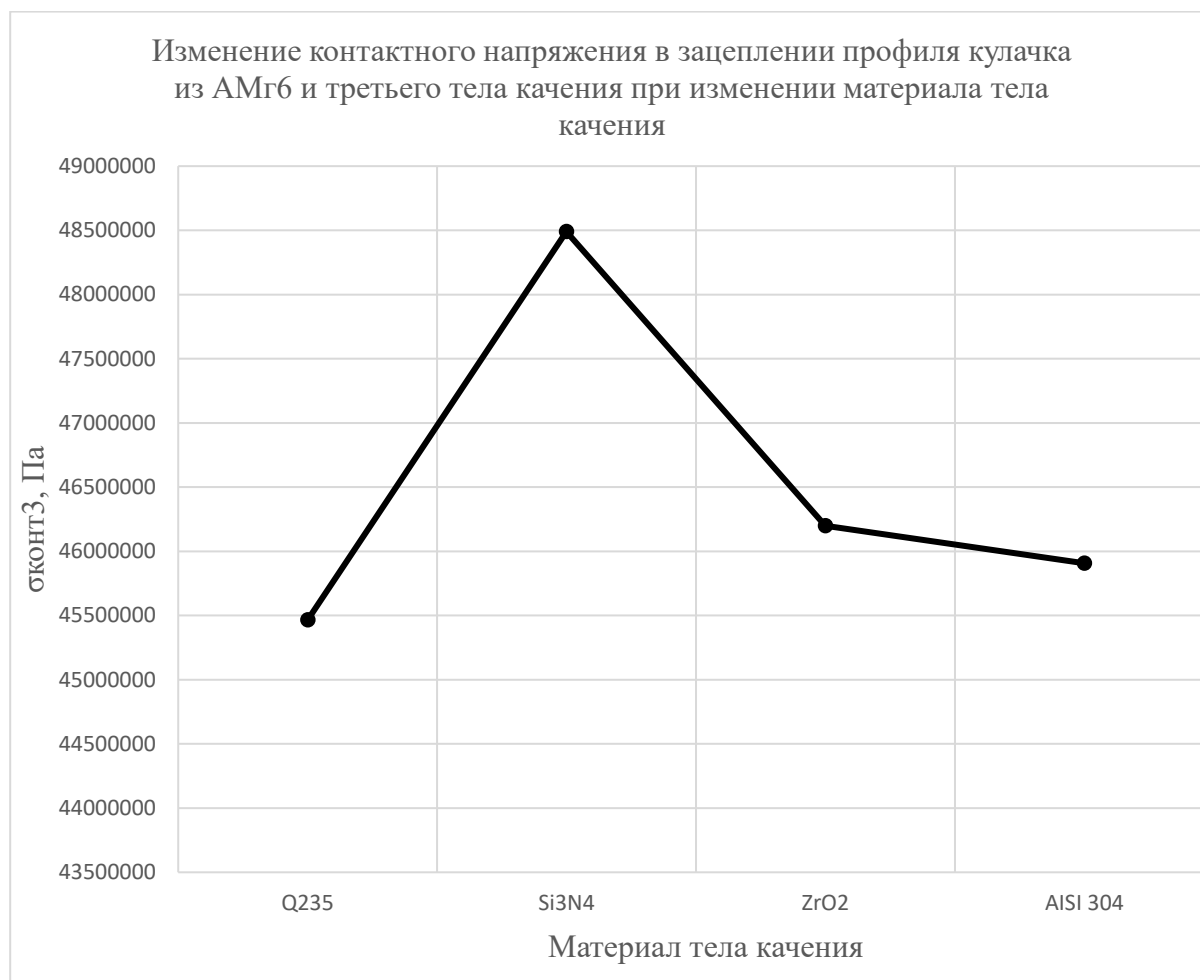


Рисунок 6. График зависимости контактных напряжений в зацеплении профиля кулачка, выполненного из АМг6 с третьим телом качения при изменении материала тела качения

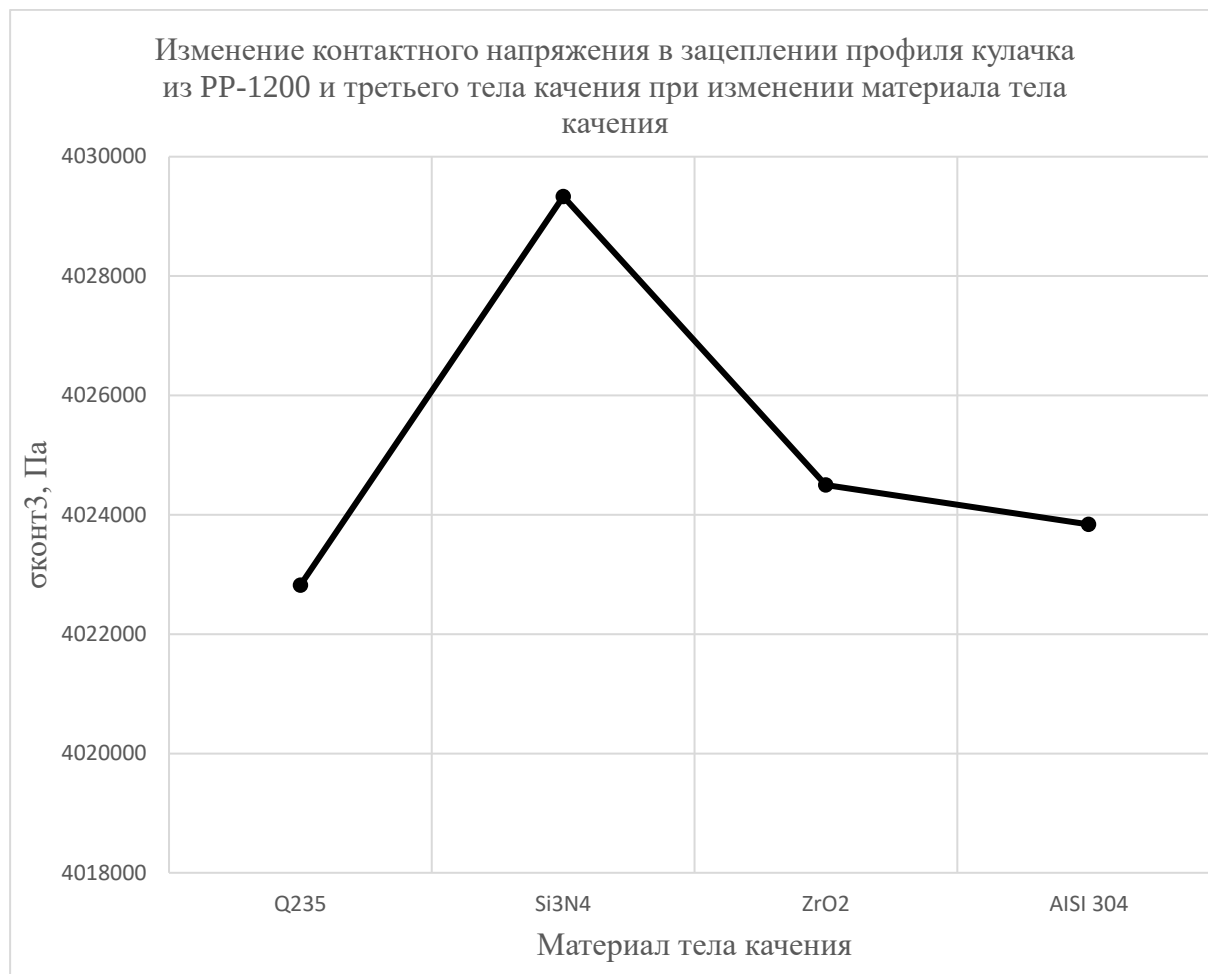


Рисунок 7. График зависимости контактных напряжений в зацеплении профиля кулачка, выполненного из PP-1200 с третьим телом качения при изменении материала тела качения

Графики 6 и 7 показывают, что при использовании, в качестве материала тел качения металлы Q235 и AISI 304, контактные напряжения в зацеплении будут снижены. Установлено, что при изменении материала тела качения, контактные напряжения в зацеплении меняются на 0,03-0,16%, в отличие от материала кулачка, где изменения более значительны. Следовательно, при проектировании передачи с ПТКСО необходимо уделять повышенное внимание материалам, используемым для изготовления кулачка.

3. Заключение

Таким образом, выполненные исследования показали, что при использовании шариковых тел качения в передаче с ПТКСО рекомендуется выбирать материал для них сталь или керамику. Но для уменьшения контактных напряжений лучше выбирать стальные тела качения. Циклоидальные профили кулачка и венца рекомендуется изготавливать из полипропилена PP-1200, при использовании полипропилена PP-1200 в конструкции механизма возможно снижение контактных напряжений в зацеплении в 11 раз в сравнении с колесами, изготовленными из АМг6.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Панкратов Э. Н. Проектирование механических систем автоматизированных комплексов для механообрабатывающего производства. Практикум лидера-проектировщика. – Томск: ТГУ, 1998. – 296 с.
2. Ефременков Е. А., Ефременкова С. К., Пашков Е. Н. Проектирование циклоидальных механических передач с промежуточными телами качения и свободной обоймой. – Томск: ТПУ, 2022. – 90 с.
3. Evaluation of techniques for determining the loading of a cycloidal satellite rolling bearing / E. A. Efremenkov, E. S. Chavrov, E. P. Khaleyeva, V. V. Tynchenko // Известия Национальной академии наук Республики Казахстан. Серия геологии и технических наук. – 2024. – Vol. 4, No. 466. – P. 72-84. – DOI 10.32014/2024.2518-170x.426. – EDN GITRPC.
4. Писаренко, Г. С. Справочник по сопротивлению материалов. Изд. 2-е., переработанное и дополненное / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев. – Киев: Наук. думка, 1988. – 736 с. ISBN 5-12-000299-4.
5. Дарков, А. В. Сопротивление материалов. Учебник для вузов. Изд. 4-е / А. В. Дарков, Г. С. Шпиро. – Москва: Издательство «Высшая школа», 1975. – 654 с.
6. Коэффициент Пуассона для керамики [Электронный ресурс] // URL: https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/36210/1/m_th_y.a.perevozchikova_2015.pdf (дата обращения 01.06.2025).
7. Модули упругости для керамики [Электронный ресурс] // URL: <https://gnaxel.ru> (дата обращения 01.06.2025).
8. Модуль упругости для полипропилена [Электронный ресурс] // URL: https://i3d.ru/catalog/poroshki_dlya_sls/poroshok-polipropilen-pp-pro/ (дата обращения 01.06.2025).
9. СН 550-82. Инструкция по проектированию технологических трубопроводов из пластмассовых труб. Государственный комитет СССР по делам строительства. - М.: Стройиздат, 1983. - 64 с.
10. Допускаемые напряжения для диоксида циркония [Электронный ресурс] // URL: <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=133> (дата обращения 02.06.2025).
11. Допускаемые напряжения для нитрида кремния [Электронный ресурс] // URL: <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=53> (дата обращения 02.06.2025).

Поступила в редколлегию 15.04.2025 г.

УДК 621.793.71

F. I. Panteleenko, a member- correspondent. NAN B, Ph. D., Professor, **V. A. Okovity**, Ph. D., **O. G. Devoino**, Ph. D., Professor, **V. V. Okovity**, **A. A. Litvinko**, **V. Yu. Sereda**
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus
Tel. / Fax +375 17 293-95-99, niil_svarka@bntu.by

V. M. Astashinsky, a member- correspondent. NAS B, D. Phys. - math. n., prof.
A. V. Lykov Institute of Heat and Mass Transfer of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus
Tel. / Fax +375 17 284-24-91, ast@hmti.ac.by

EQUIPMENT FOR APPLICATION OF PLASMA WEAR-RESISTANT COATINGS BASED ON M-CROLL

A set of equipment has been developed for the formation of plasma wear-resistant coatings based on M-rolls. The characteristics and parameters of the developed set of equipment for the formation of plasma coatings are presented, as well as the results of its testing. To implement new technological schemes for applying coatings with improved performance characteristics, a whole range of new equipment has been developed, patented and manufactured. The experiments carried out show that the PBG-1 plasma torch and the PPBG-04 powder feeder developed by the authors have at least a 2-3 times higher service life when spraying materials from M-rolls and ceramics compared to serial equipment from the Plasma-Tekhnika company, due to changes in the design of the cathode-anode unit of the plasma torch and the design of the feeding unit of the feeder, facilitating uniform supply of powder into the plasma jet and better penetration. The result is higher quality plasma coatings with improved performance characteristics: adhesion strength increases by 1.3-2 times, material utilization rate by 1.5-1.6 times, microhardness by 1.2-1.4 times, porosity decreases by 2-2.5 times.

Keywords: plasma ceramic coatings, m-croll, plasmatron, powder feeder, performance characteristics, adhesion strength, porosity.

Ф. И. Пантелеенко, В. А. Оковитый, О. Г. Девойно, А. А. Литвинко, В. Ю. Середя, В. В. Оковитый, В. М. Асташинский

ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ПЛАЗМЕННЫХ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ М-КРОЛЕЙ

Разработан комплекс оборудования для формирования плазменных износостойких покрытий на основе М-кroleй. Приведены характеристики и параметры разработанного комплекса оборудования для формирования плазменных покрытий, а также результаты его тестирования. Для реализации новых технологических схем нанесения покрытий с повышенными эксплуатационными характеристиками разработан, запатентован и изготовлен целый спектр нового оборудования. Проведенные эксперименты показывают, что разработанные авторами плазматрон ПБГ-1 и порошковый питатель ППБГ-04 имеют минимум в 2-3 раза выше ресурс работы при напылении материалов из М-кroleй и керамических по сравнению с серийным оборудованием фирмы "Плазма-Техник", за счет изменения конструкции катодно-анодного узла плазматрона и конструкции подающего узла питателя, способствующих равномерной подаче порошка в плазменную струю и лучшего его проплавления. В результате получают более качественные плазменные покрытия, с повышенными эксплуатационными характеристиками: прочность сцепления увеличивается в 1.3-2 раза, коэффициент использования материала в 1.5-1.6 раза, микротвердость в 1.2-1.4 раза, пористость уменьшается в 2-2.5 раза.

Ключевые слова: плазменные керамические покрытия, м-кrole, плазматрон, порошковый питатель, эксплуатационные характеристики, прочность сцепления, пористость.

1. Introduction

The pressing issue of wear in machine components has spurred significant advancements in techniques for restoring and reinforcing the functional surfaces of these components. Across diverse sectors within the Republic of Belarus, a substantial number of

© Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G., Okovity V. V., Litvinko A. A., Sereda V. Yu., Astashinsky V. M.; 2025

machine parts and equipment undergo restoration and strengthening processes. Notably, parts restored using contemporary technologies often match the quality of newly manufactured counterparts, while offering a cost reduction of approximately 30-40%. While the application of protective coatings offers distinct advantages, it also presents certain drawbacks, making it crucial to select the appropriate method for a given application. Recent technological progress has led to substantial improvements in coating methodologies, enabling the creation of surface coatings with tailored physical, mechanical, and chemical properties designed to shield components from environmental factors. The suitability of each method hinges on a careful evaluation of its pros and cons, alongside consideration of the specific application domain. Factors such as available equipment, spray materials, gas consumption, part complexity, and overall technical and economic efficiency play a pivotal role in determining the optimal approach for each situation.

In recent times, thermal spraying techniques have gained increasing prominence. These methods involve introducing the coating material into a high-temperature stream, melting it, and propelling it onto the target surface to create a protective layer. Among the various gas-thermal coating methods, air plasma spraying stands out. Its ability to produce rapidly solidified and metastable structures, coupled with its versatility, accessibility, and relative affordability, makes it a particularly attractive option for coating various machine parts and equipment. The main characteristic of plasma coatings in most cases is the strength of its adhesion to the base [1-3]. In general, the coating is a multilayer system, including a metal sublayer and an outer layer. The main reason for the destruction of plasma coatings is thermomechanical stresses that arise due to a mismatch in the thermal expansion of the base metal and the coating layer, as well as the uneven distribution of the temperature field in the coating. Thermomechanical stresses are aggravated by the effect of residual stresses that arise in the coating during spraying, and are weakened by the effects of plasticity and creep occurring in the metal sublayer [4, 5]. Obtaining wear-resistant structures is possible through plasma spraying of coatings with certain technological parameters that ensure ultra-fast cooling of the melt of particles of the sprayed material. It should be noted that in order to obtain such structures during plasma spraying of coatings, further improvement of equipment for applying plasma coatings is necessary.

2. Development of equipment for applying wear-resistant coatings

Plasma-Tekhnika equipment is frequently employed for plasma spraying, but its plasma torches possess notable shortcomings. A major limitation is the cathode-anode unit's short lifespan. Furthermore, the intense turbulence generated by the mixing of the plasma stream with the surrounding cold air reduces both the velocity and temperature of the sprayed material particles. This increases the likelihood of undercooled particles reaching the coating formation area and promotes undesirable chemical reactions with the atmosphere. Under demanding conditions, characterized by high currents and plasma gas flow rates, the cathode experiences rapid wear. This necessitates interrupting the spraying process, shutting down the equipment, disassembling the plasma torch, and replacing the cathode-anode unit. Such frequent interventions introduce instability into the coating process, ultimately affecting the quality and consistency of the applied coatings. Therefore, the authors developed and patented an axial collet plasmatron PBG-1 [6-9], which is devoid of these disadvantages. The general disadvantage of plasma torches is the intensive turbulent mixing of the plasma flow with the surrounding cold gas, which leads to a decrease in the speed and a decrease in the temperature of the particles of the sprayed material. As a result, the probability of underheated particles in the coating formation zone increases. As well as the occurrence of uncontrolled chemical

reactions with air. A plasma torch with a nozzle allows improving the protection of the plasma flow from the effects of the atmosphere. Heated inert gas (Ar) is supplied into the nozzle along its walls through a system of holes in the end part. The air around the plasma jet is displaced, additional compression of the plasma occurs, as a result of which the oxygen content in the coating decreases and the efficiency of material deposition increases. The listed advantages of a plasma torch with a nozzle contribute to an increase in the heating efficiency and an increase in the number of composite powder particles in the liquid phase colliding with the substrate. At the same time, the heating of the substrate is reduced, which accelerates heat removal and cooling of liquid-phase particles on it. All this refers to the positive factors of amorphization of the formed coating. At the same time, a significant disadvantage of the nozzle is the labor intensity of its manufacture. Fig. 1 shows the main type of the developed plasma torch. The plasma torch for coating contains a cathode 1 and an anode 2 units separated by an insulator 3. The cathode unit 1 consists of a cathode 4, which is attached to the body of the cathode unit 1 using a collet 5 fixed in a collet holder 6. Using the collet 5, the gap between the cathode 4 and the nozzle-anode 7 is adjusted during the operation of the plasma torch as the cathode wears out. The anode unit 2 consists of a nozzle-anode 7 and anode body 8, an insert in the form of a tungsten bushing 9, a nut 10 is attached to the anode body, a hole 11 is made in the nozzle-anode 7 and nut 10, into which powder is fed through an injector 12, and a nozzle 13 is attached to the anode body 8 through a nut 10 on a thread for feeding heated inert gas along its walls through a system of holes 14 in its end part. The plasma torch operates as follows. When voltage is applied to the electrodes, an electric arc occurs between the nozzle-anode 7 and the cathode 4. The plasma-forming gas - nitrogen, is fed through the tube 15 and the channel 16 in the body of the cathode unit 1 into the discharge chamber 17 of the plasma torch, formed by the cathode 4, the insulator 18 and the nozzle-anode 7 with the tungsten bushing 9, is ionized and exits the nozzle-anode 7 at high speed, forming a plasma jet, into which the powder material is fed through the injector 12, located in the channel of the nozzle-anode 7 and the bushing 10. Distilled water is used to cool the plasma torch, which enters the cavity of the body of the cathode unit 1 through the hole in the insulator 3 through the nozzle 19 and the tube 20, passes into the cavity 21 of the body of the anode 8 and cools the solo-anode 7. Then, the heated water is drained through the tube 22 and the nozzle 23. Inside the nozzle 13 along its walls through the system of holes 14 in the end part, heated inert gas (Ar) is supplied to the nozzle through the nozzle 24. The air around the plasma jet is displaced, additional compression of the plasma occurs, as a result of which the oxygen content in the coating decreases and the efficiency of material deposition increases. In the case of spraying powders based on oxide ceramics, they are uniformly distributed over the cross-section of the plasma jet and form a high-quality coating. As for temperature control by changing the thermal situation on the substrate, it is provided by varying the thickness of the applied composite coating and additional cooling of the substrate with a jet of compressed air. In the first case, the cooling rate of the coating particles on the substrate is regulated by the volume of the pore space of the applied composition, which hinders heat removal from the liquid-phase particles deep into the coating. In the second case, along with a jet of compressed air, additional cooling of the substrate is possible due to its contact with the metal, which is characterized by high thermal conductivity. Practical experience of such cooling is known in welding production. At the same time, its implementation both in welding-surfacing and in plasma spraying is complicated by solving problems caused by the creation of a sliding contact when applying coatings on cylindrical surfaces of a wide range of parts, usually rotating during the application process [10-13].

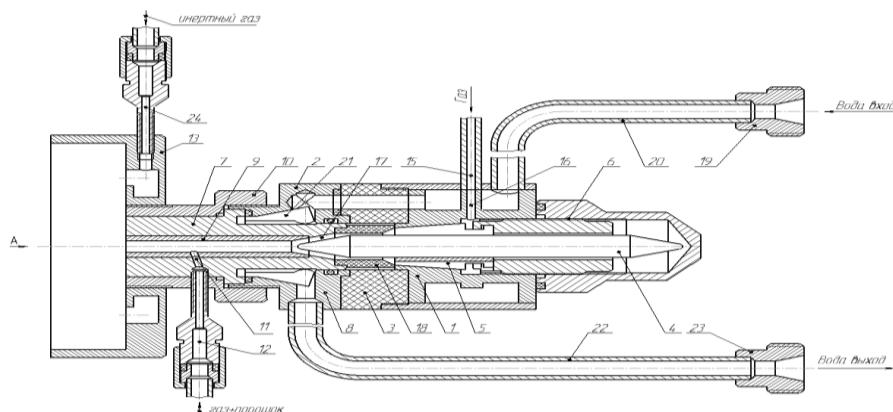
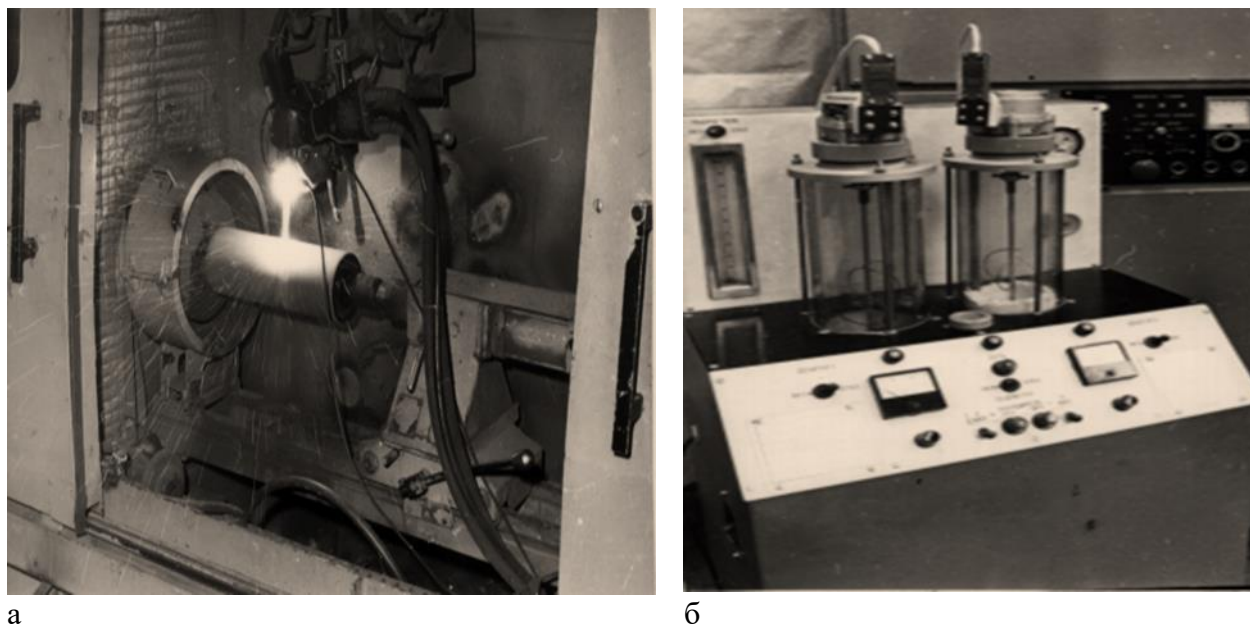


Figure 1. Plasma torch for coating application with a nozzle

When the electrode wears out and the interelectrode gap increases, the electrode can be moved in the collet, using a special device, measure the interelectrode space and continue the deposition process. The use of an attachment in the developed plasma torch makes it possible to improve the protection of the plasma flow from atmospheric influences. Inside the nozzle along its walls, heated inert gas (Ar) is supplied to the nozzle through a system of holes in the end part. The air around the plasma jet is displaced, and additional compression of the plasma occurs, as a result of which the oxygen content in the coating decreases and the efficiency of material deposition increases. The use of nozzles in the developed plasmatron contributes to an increase in heating efficiency and an increase in the number of composite powder particles in the liquid phase colliding with the substrate. At the same time, the heating of the substrate is reduced, which accelerates heat removal and cooling of liquid-phase particles on it. All this refers to the positive factors of amorphization of the formed coating. Figure 2a shows the main view of the developed plasmatron. Using a standard "Plasma-Tekhnik" installation with a TWIN-10 powder feeder, tests were carried out on a serial plasma torch and a PBG-1 plasma torch developed by the authors. Nitrogen was used as the working gas. At the first stage, the plasma torches were tested for the duration of continuous operation, at a current of 450 A, voltage of 70V, nitrogen flow rate of 35 l/min (standard mode of M-croll and oxide spraying). Both plasma torches worked continuously for 8 hours (the tests were interrupted after intense pulsations of the current and voltage parameters of a standard plasma torch from Plazma-Tekhnik). After disassembly, significant changes were revealed in the geometry of the cathode-anode assembly of the plasmatron: changes in the sharpening angle of the cathode (α_e); melting and, accordingly, changes in the diameter of the cathode blunting (d_n); melting and tears inside the anode nozzle. All this leads to a change in the depth of the electrode-cathode in the nozzle l_3 and, accordingly, the pulsation of the plasmatron parameters. No noticeable changes were detected in the geometry of the cathode-anode assembly of the developed plasmatron PBG-1. At the second stage, in the same modes, the plasmatrons operated according to the following scheme: operation for 15 minutes, switching off, switching on, etc. (15 min. technological time for spraying M-roll and oxide ceramics of the roller - lubricant). The Plasma-Tekhnik plasma torch failed after 4 hours of operation (16 technological cycles) - the electric arc did not ignite due to severe wear of the electrodes. Testing of the developed plasmatron PBG-1 was stopped after 8 hours of operation (32 technological cycles). At the third stage, M-kroll powder and zirconium oxide were sprayed on different plasma torches in the same mode: current - 450 A; voltage - 70V; nitrogen flow - 35 l/min; spraying distance - 110 mm; powder fraction - 40-63 microns; powder consumption - 3 kg/hour.



a

б

Figure 2. Equipment for applying plasma wear-resistant coatings based on M-rolls:
a – plasmatron ПБГ - 1 for applying coating with a nozzle; b – powder feeder ППБГ-04

After 30 minutes of spraying, the plasmatron from Plasma-Tekhnik had to be turned off and the nozzle cleaned; even when spraying finely dispersed ceramics, the plasmatron is unstable. The characteristics of zirconium oxide coatings deposited on a plasmatron 0890-6011 and the developed plasmatron are given in Table 1. Powder feeders are designed to supply sprayed powder into a plasma jet. The quality of the applied coating depends on the stability of the operation of this device. Powder feeder designs are as varied as plasma atomizers. The powder used for spraying is placed in a hopper (hopper capacities vary widely) of a feeder located at a short (1 m) distance from the plasmatron. The powder is supplied by a flow of transport gas to the plasma atomizer through an elastic tube and through a fitting or a special hole in the nozzle channel the gas-powder mixture is introduced into the plasma jet. The flow rate of the powder supplied to the sprayer is regulated by a dosing device, which is used as injectors (the flow rate of the powder depends on the flow rate of the transport gas), rods with holes of various sizes for the powder, rotating vertical or horizontal drums with grooves for the powder, horizontal or vertical screws, etc. To improve the flowability of the powder and prevent it from hanging in the hopper, electromagnetic, mechanical or pneumatic vibrators are used. In some cases, the powder is agitated by the transport gas. The greatest stability of powder supply is provided by feeders with mechanical dosing. The powder from the loading hopper of the powder feeder from Plasma-Tekhnik AG, the bottom of which is made in the form of an inverted cone, falls onto a flat disk rotating and vibrating along its axis, from where it is poured into the injection device of the powder feeder. The disadvantages of the Plasma-Tekhnik powder feeder include the difficulty of feeding fine powder with poor flowability. Therefore, the authors developed and patented a powder feeder PPBG-04 for coating compact materials [8, 9], which allows feeding powder with a particle size of 1-2 microns, and also has a minimum of control characteristics for use in coating (Fig. 2b). The design feature of the powder feeder being tested is the presence of two cylindrical hoppers with a capacity of 2.0 liters each and a conical mixing funnel. Each hopper is connected to a funnel by a tube with an internal diameter of 12 mm. A flexible auger passes

through the hopper and tube, connected through a gearbox to a 27-volt DC electric motor. The rotation speed of the flexible screw varies from 0 to 140 rpm.

Table 1. Characteristics of coatings when testing a plasma torch

Plasma torch	Adhesion strength, MPa	Porosity, %	Material utilization rate, %	Microhardness, MPa
plasmatron “Плазма-Техник”	22,5	14	39	6400
ПБГ-1	35,4	5	61	8700

Rotation is ensured by a transistor power supply, which regulates the voltage supplied to the electric motor from 0 to 27 volts. The mixing funnel is connected by a pipeline to each bin above the level of the powder being poured. Compressed gas is also supplied to it. The powder, poured into hoppers by flexible screws, is fed into a mixing funnel, where it is picked up by a tangentially supplied compressed gas in the form of a gas-powder mixture through a flexible pipeline and fed into the spray head. The connecting pipe between the mixing hopper and the hoppers serves to equalize the gas pressure in the mixing hopper and hoppers and prevents pulsation of the powder supply by preventing the hoppers from being vacuumed as the volume of powder in them decreases. The rotation speed of the flexible screws of each bunker is controlled independently and therefore powder is supplied from each bunker alternately or together. If different powders are poured into bunkers, then a joint supply with different flow rates into one pipeline is possible.

The powder supply capacity from each bin is adjustable in the range from 0 to 2.5 l/hour. On the “Plasma-Technik” installation, in standard configurations, tested powder feeders TWIN-10 and PPBG-04, developed by the authors. Nitrogen was used as a working gas during spraying, and air was used when supplying powder. At the first stage, feeders were tested for the duration of continuous operation, using M-crawl powder and zirconium oxide, with a fractional composition of less than 50 microns. Powder consumption - 3 kg/hour; supply gas flow rate is 3.5 l/min. On the TWIN-10 feeder, the vibrator is turned on at maximum mode - 16 units. The powder feeder failed after 40 minutes. work, after disassembling it was found that the auger and receiving cone were clogged with tightly compressed powder. Attempts to improve the operation of the feeder while decreasing or increasing the powder consumption also did not give positive results; the feeder is not suitable for feeding fine ceramics. Testing of the developed PPBG-04 feeder was stopped after 2 hours of operation. At the second stage, the feeders were tested for stable reproduction of the given flow rate when the powder feeder was turned on again. In the same modes, the feeders operated according to the following scheme: operation for 15 minutes, switching off, switching on, etc., to check the stable reproduction of the given flow rate when the powder feeder was turned on again (15 min technological time for spraying M-crawl and ceramics lubricating roller). The TWIN-10 feeder could not reach the set powder supply mode after the first shutdown; after 4 shutdowns, it was not possible to resume powder supply without disassembling the feeder. The PPBG-04 feeder withstood 10 shutdowns before the experiment was terminated. At the third stage, aluminum oxide was sprayed using different feeders, at the same operating mode of the plasma torch: current - 450 A; voltage - 70V; nitrogen consumption -35 lit/min; spraying distance - 110 mm; powder fraction -50-63 microns; powder consumption - 3 kg/hour. The characteristics of coatings made of M-crawl and zirconium oxide, sawed using TWIN-10 and PPBG-04 feeders are given in Table 2.

Table 2. Characteristics of coatings when testing a powder feeder

Feeder	Adhesion strength, MPa	Пористость, %	Coefficient use material, %	Microhardness, MPa
TWIN-10	22,5	18	34	5800
ППБГ-04	35,4	10	56	7200

3 Conclusion

1. Achieving exceptionally wear-resistant surfaces relies on carefully controlled plasma spraying parameters, facilitating ultra-rapid cooling of the molten particles as they form the coating. Optimizing this process necessitates ongoing advancements in plasma coating equipment. To realize innovative techniques for applying wear-resistant coatings with enhanced performance, a suite of novel equipment has been conceived, patented, and produced.

2. The attributes and performance metrics of our newly developed plasma coating system, coupled with rigorous testing, demonstrate that the PBG-1 plasma torch and PPBG-04 powder feeder significantly outperform existing technology. Specifically, these components exhibit a lifespan at least two to three times greater than that of "Plasma-Tekhnika" equipment when spraying ceramic materials. This improvement stems from key design modifications to the plasma torch's cathode-anode assembly, nozzle configuration, and the powder feeder's delivery mechanism. These enhancements ensure consistent powder injection into the plasma stream and improved particle penetration, ultimately leading to superior coating quality and durability.

LITERATURE:

1. Okovity, V. A. Formation and study of plasma two-layer composite coatings (viscous metal layer NiCr and solid ZrO₂) / Okovity V. A., Panteleenko F. I., Okovity V. V., Astashinsky V. M., Khramtsov P. P., Chernik M. Yu., Uglov V. V., Sobolevsky S. B. // "Science and Technology", BNTU – Minsk. - 2018. Issue 1.- P.21-28.

2. Panteleenko, F. I. Formation of multifunctional plasma coatings based on ceramic materials / F. I. Panteleenko, V. A. Okovity // BNTU-Minsk. 2019.- 251 p.

3. Okovity, V. A. Technological features of the formation of plasma powder coatings from ceramics with a nonequilibrium structure / Okovity V. A., Panteleenko F. I., Astashinsky V. M., Okovity V. V. // "Science and Technology", BNTU - Minsk. – 2018. Issue 3.- P.183-189

4. Plasmatron for coating: Pat. 14906 Rep. Belarus, IPC C23C4/04. / Okovity V. A., Shevtsov A. I. Devoino O. G., Okovity V. V.; applicant - State Scientific Institution "Institute of Powder Metallurgy - No. a 20091066; appl. 07/15/2009 publ. 10/30/10 // Afitsyiny bulletin. National center intellectual. Ulasnastsi. – 2011. - No. 4.

5. Plasmatron for coating the internal surfaces of parts: Pat. for a utility model. 8930 Rep. Belarus, IPC H 05H 1/00 /. Okovity V. V. applicant – BNTU. -No. u 20120574; appl. 05/31/2012, publ.02/28/2013 // Afitsyiny bulletin. National center intellectual. Ulasnastsi. – 2013. - No. 1.

6. Plasmatron for coating: Pat. for a utility model. 9423 Rep. Belarus, IPC H 05H 1/00 /. Okovity V. V. applicant – BNTU. -No. u 20121081; appl. 05/12/2012, published 08/30/2013 // Afitsyiny bulletin. National center intellectual. Ulasnastsi. – 2013. - No. 4.

7. Plasmatron for coating: Pat. for a utility model. 10210 Rep. Belarus, IPC H 05H 1/00 / Okovity V. V. -No. and 20131083; appl. 12/18/2013, publ. 08/30/2014 // Afitsyiny bulletin. National center intellectual. Ulasnastsi. – 2014. - No. 4.

8. Powder feeder for coating: Pat. 16809 Rep. Belarus, IPC B 22C 9/08; B 23K 5/18/. Okovity V. A., Ilyushchenko A. F., Shevtsov A. I., Astashinsky V. M., Okovity V. V. applicant – State Scientific Institution “Institute of Powder Metallurgy”. -No. a 20101357; appl. 09/21/2010, publ.02/28/2013 // Afitsyiny bulletin. National center intellectual. Ulasnastsi. – 2013. - No. 1.

9 Powder feeder for coating: Pat. for a utility model. 9665 Rep. Belarus, IPC H 05H 1/00 / Okovity V. V. -No. and 20130402; appl. 05/08/2013, publ. 10/30/2013 // Afitsyiny bulletin. National center intellectual. Ulasnastsi. – 2013. - No. 5.

10. Okovity, V. A. Formation and study of plasma two-layer composite coatings (viscous metal layer of NiCr and hard ZrO₂) / Okovity V. A., Panteleenko F. I., Okovity V. V., Astashinsky V. M., Khramtsov P. P., Chernik M. Yu., Uglov V. V., Sobolevsky S. B. // “Science and Technology”, BNTU – Minsk. - 2018. Issue 1.- P.21-28.

11. Okovity, V. A. Technological features of the formation of plasma powder coatings from ceramics with a nonequilibrium structure / Okovity V. A., Panteleenko F. I., Astashinsky V. M., Okovity V. V. // “Science and Technology”, BNTU – Minsk. – 2018. Issue 3.- P. 183-189.

12. Okovity, V. A. Formation and study of plasma powder coatings from oxide ceramics modified by high-energy impacts “Science and Technology” / Okovity V. A., Panteleenko F. I., Okovity V. V., Astashinsky V. M., Uglov V. V.// “Science and Technology”, BNTU – Minsk. - 2018. Issue 5.- P. 377-389.

13. Panteleenko, F. I. Formation of zirconium dioxide-based coatings on elements of meteor protection screens / Panteleenko F. I., Okovity V. A., Okovity V. V., Astashinsky V. M., Uglov V. V. //Bulletin of the Kuzbass Technical University.2018. №6(130).P.94-101.

Поступила в редколлегию 15.04.2025 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Азарова Н. В., Поезд С. А., Рудницкий А. В., Цокур В. П. ШЛИФОВАНИЕ ТВЕРДОГО СПЛАВА ВК15 АЛМАЗНЫМИ КРУГАМИ НА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СВЯЗКЕ.....	3
Белоцерковский М. А., Комаров А. И., Сосновский И. А., Орда Д. В., Курилёнок А. А. Триботехнические свойства и структура цинк- алюминиевых покрытий, получаемых центробежной индукционной наплавкой.....	9
Брешев В. Е., Долженко Ю. С. Концепция создания бесконтактных приводов вращения и их применение в машинах различного назначения.....	19
Голубев В. С., Вегера И. И., Залесский В. Г., Соколов С. Н., Миряха А. Н. Инженерия поверхности металлических материалов с использованием мощного диодного лазера.....	27
Зайдес С. А., Ле Т. Т. Влияние ориентации упрочнённых волокон на напряжённое состояние при кручении цилиндрических образцов	36
Овчинников Е. В., Чекан Н. М., Акула И. П., Адамчик А. А., Белоусов Д. В. Износостойкие покрытия для эксплуатации обрабатываемого инструмента в тяжелоагрессивных условиях строительной индустрии.....	43
Ракунов Ю. П., Абрамов В. В., Ракунов А. Ю. Исследование кинетики износа режущего клина и контактных напряжений на его рабочих поверхностях.....	51
Сухочев Г. А., Коденцев С. Н., Смольяникова Е. Г., Кашицин В. А. Повышение эффективности технологии упрочнения высокоресурсных конструкций.....	60
Чавров Е. С., Ефременков Е. А. Исследование влияния материалов контактирующих звеньев на контактные напряжения в зацеплении передачи с промежуточными телами качения.....	69
Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G., Okovity V. V., Litvinko A. A., Sereda V. Yu., Astashinsky V. M. EQUIPMENT FOR APPLICATION OF PLASMA WEAR-RESISTANT COATINGS BASED ON M-CROLL.....	78

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

Абрамов В. В.	51
Адамчик А. А.	43
Азарова Н. В.	3
Акула И. П.	43
Белоусов Д. В.	43
Белоцерковский М. А.	9
Брешев В. Е.	19
Вегера И. И.	27
Голубев В. С.	27
Долженко Ю. С.	19
Ефременков Е. А.	69
Зайдес С.А.	36
Залесский В. Г.	27
Кашицин В. А.	60
Коденцев С. Н.	60
Комаров А. И.	9
Курилёнок А. А.	9
Ле Т.Т.	36
Миряха А. Н.	27
Овчинников Е. В.	43
Орда Д. В.	9
Поезд С. А	3
Ракунов А. Ю.	51
Ракунов Ю. П.	51
Рудницкий А. В	3
Смольяникова Е. Г.	60
Соколов С. Н.	27
Сосновский И. А.	9
Сухочев Г. А.	60
Цокур В. П.;	3
Чавров Е. С.	69
Чекан Н. М.	43
Astashinsky V. M.	78
Bendik T. I.	78
Devoino O. G.	78
Litvinko A. A.	78
Okovity V. A.	78
Okovity V. V.	78
Panteleenko F. I.	78
Sereda V. Yu.	78

ПРАВИЛА

представления материалов в международный сборник научных трудов ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет» «ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ»

Международный сборник научных трудов Донецкого национального технического университета «Прогрессивные технологии и системы машиностроения» издается с 1994 года. В этом сборнике публикуются ученые и специалисты более чем из 35 стран мира.

Сборник научных трудов является специальным изданием, научно-технические статьи которого проходят **обязательное рецензирование**. Данный сборник включен в следующие программы:

1. В сборнике могут публиковаться научно-технические статьи и результаты диссертационных работ.
2. Сборник включен в перечень ВАК.
3. Сборник имеет сайт <http://ptsm.donntu.ru> ДонНТУ, г. Донецк.
4. Сборник включен **базу данных РИНЦ (Российский индекс научного цитирования) (лицензионный договор № 177-04/2013 от 12.04. 2013 г.)** и размещен на сайте НЭБ (Научная электронная библиотека, г. Москва, Россия, <http://elibrary.ru>)
5. Данный сборник имеет **международную индексацию ISSN 2073-3216 (печатная версия) и ISSN 2518-7120 (сетевое издание)**

Статьи представляемые в данный сборник должны отвечать следующим требованиям.

Содержание статей должно отражать новые достижения науки и техники в области машиностроения, их практическое значение, соответствовать технической направленности сборника и представлять интерес для широкого круга специалистов.

В статье должно быть кратко изложено то новое и оригинальное, что разработано авторами, показано преимущество перед аналогами предлагаемых разработок, описаны их особенности и практическая значимость. Результаты работы не должны представляться в виде тезисов.

Ответственность за нарушение авторских прав, за несоблюдение действующих стандартов и за недостоверность в статье данных полностью несут авторы статьи.

Присланные в редакционную коллегию статьи подвергаются обязательному рецензированию. Редакционная коллегия оставляет за собой право вносить в текст статьи изменения редакционного характера без согласования с авторами, а также не публиковать статьи, которые не отвечают нашим требованиям.

Языки представления рукописей: **русский и английский.**

ОСНОВНАЯ ТЕМАТИКА СБОРНИКА

Тематика представляемых статей должна основываться на проблемах машиностроения (механики) и представляться в рамках следующих направлений:

1. Практика и перспективы создания и применения прогрессивных и нетрадиционных технологий машиностроения. Интегрированные технологии. Сборка в машино- и приборостроении. Абразивные и виброабразивные технологии. Гибридные и комбинированные технологии машиностроения. Наукоемкие технологии машиностроения.
2. Механизация и автоматизация производственных процессов машиностроения. Прогрессивное оборудование машиностроительных производств.
3. Комплексная автоматизация проектирования, подготовки и управления машиностроительным производством.

4. Проблемы создания и применения прогрессивных инструментов и инструментальных материалов в машиностроении.

5. Управление качеством продукции и технических систем машиностроения. Проблемы инженерии поверхностного слоя изделий.

6. Современные проблемы машиноведения и деталей машин.

7. Современные проблемы инженерии материалов. Упрочняющие технологии и покрытия изделий машиностроения. Наноматериалы и нанотехнологии в машиностроении.

8. Вопросы моделирования и расчетов сложных технологических систем машиностроения.

В рамках сборника можно представлять рекламу продукции, которая будет помещена после рукописей статей.

СОДЕРЖАНИЕ СТАТЕЙ

Научно-технические статьи, представляемые в данный сборник должны иметь следующие элементы:

- постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными и практическими заданиями;
- анализ последних достижений и публикаций, в которых начато решение данной проблемы, выделение нерешенных раньше частей общей проблемы, которым посвящается данная статья;
- формулирование цели и постановка задач работы;
- представление основного материала исследования с полным обоснованием полученных научных результатов, формулирование рекомендаций;
- выводы по данному исследованию и перспективы дальнейшего развития данного направления.

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ

Для принятия решения о включении материалов Вашей статьи в сборник необходимо выслать в адрес редакционной коллегии следующее:

- заявку и сведения об авторах статьи;
- материалы статьи;
- экспертное заключение о возможности публикации статьи в открытой печати;
- все материалы отправляются по E-mail адресу: mntk21@mail.ru

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ

1. Текст статьи выполняется объемом от 7 до 10 страниц (**обязательно полные страницы**), формат А4 (210х297 мм) с полями: верхнее и нижнее – 30 мм, а левое и правое - 25 мм. Страницы не нумеровать. Статьи оформить с применением редактора WinWord (не ниже версии 6,0) шрифтом Times New Roman, выполненным в соответствии с образцом оформления, межстрочный интервал - 1,0, шрифт – 12pt. Материалы представить в электронном виде.

2. Порядок оформления. Материалы должны отвечать следующей структурной схеме: УДК, инициалы и фамилии авторов, ученая степень и звание (сокращение по ГОСТ 7.11 и 7.12), полное название организаций и стран, тел./факс, E-mail, название статьи, аннотация на языке статьи, ключевые слова, основной текст, заключение или выводы, список литературы, дополнительная аннотация на английском языке с ключевыми словами, внизу первой страницы необходимо указать авторский знак - ©. **УДК** печатать прописными (жирными) буквами в верхнем правом углу не отступая от верх-

него поля. На следующей строке слева жирными строчными буквами – **инициалы и фамилии** авторов с учеными степенями и званиями, на следующих строках – полное название *организаций и стран* (через запятую, слева). На следующей строке курсивом слева – тел./факс и *электронный адрес* одного из авторов. Через один интервал - название статьи, печатать прописными (жирными) буквами, без переносов, центрировать по ширине, максимально три строки. Через один интервал - аннотации с ключевыми словами (слово аннотация не пишется) на двух языках шрифтом 10 pt, *курсивом*. Через один интервал – материалы статьи, шрифт 12 pt (язык изложения – по выбору авторов, межстрочный интервал 1,0). Внизу первой страницы статьи необходимо указать авторский знак - ©. Между соответствующими разделами статьи необходимо делать интервал. (См. образец оформления материалов). Абзац текста – 1,25.

3. Графический материал (рисунки, графики, схемы) следует выполнять в формате *.bmp, *.gif, *.psx, *.dwg, *.jpg - размерами не менее 60х60 мм внедренными объектами (по ходу материалов). Все позиции, обозначенные на рисунке, должны быть объяснены в тексте. Позиции на рисунке должны располагаться по часовой стрелке. Под каждым рисунком указывается его номер и название, например: Рисунок 3. Схема устройства. Текст названия рисунка группируется с рисунком. Каждый рисунок должен иметь один интервал сверху и снизу.

4. Формулы и математические знаки должны быть понятны. Показатели, степени и индексы должны быть меньше основных знаков и выполняться в соответствии с редактором формул Microsoft Equation. Формулы номеруются (справа в круглых скобках, не отступая от правого поля), только в том случае, если на них в тексте имеются ссылки. Между крайними знаками формулы и текстом должен выполняться один интервал. Формулы выполняются курсивом.

Стиль формул для Microsoft Equation: Full - 12 pt, Subscript/Superscript - 10 pt, Sub-Subscript/Superscript - 8 pt, Symbol - 12 pt, Sub-Symbol - 10 pt.

5. Все таблицы должны иметь название и порядковый номер и располагаться после упоминания по тексту, например: Таблица 2. Классификация муфт. Каждая таблица должна иметь один интервал сверху и снизу.

6. **Список литературы** должен быть приведен в конце статьи в соответствии с ГОСТ 7.1-2003 . Перечень ссылок должен быть составлен в порядке упоминания в тексте. Ссылки на литературу заключаются в квадратные скобки. Количество библиографических источников должно быть не менее 5, в том числе 3 источника должно быть представлены за последние 5 лет.

7. Файл со статьей необходимо назвать по фамилиям и инициалам авторов в соответствии с работой (например: Иванов И.И., Петренко П.П.)

8. Материалы статьи представляются в электронном виде.

9. Материалы, не отвечающие перечисленным требованиям и тематике данного сборника, а также поступившие в редакционную коллегию с опозданием, **опубликованы не будут**.

СТАТЬИ ДОЛЖНЫ ИМЕТЬ СЛЕДУЮЩУЮ СТРУКТУРУ:

1. УДК (Например, **УДК 621.01**) (располагать вверху справа, шрифт жирный, 12 pt).

2. **Инициалы и фамилии авторов** (слева, шрифт жирный, 12 pt), ученая степень и звание, затем на следующей строке - полное название *организаций и стран* (слева, 12 pt), на следующей строке – *Тел./факс и электронный адрес* (слева, *курсив*, 12 pt).

3. **Название статьи** (слева, шрифт жирный, 12 pt, максимум три строки).

4. Пустые строки, межстрочный интервал и размеры шрифта статьи. Пустые строки выполняются между названием статьи - вверху и внизу, перед соответствующими разделами работы (один пробел) и списком литературы, а также между дополнительной аннотацией вверху и внизу. Межстрочный интервал – **1,0**. Размер шрифта статьи - **12 pt**, размер шрифта аннотаций и авторского знака - **10 pt**.

5. Аннотации (Abstract) (слово аннотация не пишется), (курсив, 10 pt). Первая аннотация пишется на языке статьи, а вторая на английском, если статья на английском языке, первая аннотация пишется на английском языке, а вторая – на русском языке.

В аннотации приводятся краткие сведения о всей статье в целом на языке статьи. Объем аннотаций приблизительно до 10 строк, аннотация выполняется курсивом.

6. Ключевые слова (Keywords) (приводится 5-6 ключевых слов статьи), выполняются курсивом на следующей строке от аннотации. (курсив, 10 pt)

7. Введение (Introduction). (12 pt)

Во введении приводится аналитический (исторический) обзор современного состояния вопроса исследования, выполняется постановка проблемы исследования или показывается актуальность данного исследования (работы). Здесь нужно обязательно указать результаты последних исследований других авторов. А также сформулировать цель и задачи исследований.

8. Основное содержание и результаты работы (The main contents and outcomes of activity). (Авторы могут дополнять работу другими разделами) (12 pt).

В данном разделе излагаются и подробно разъясняются полученные авторами теоретические положения и практические результаты. Приводятся принятые гипотезы и используемые допущения, разъясняются малоизвестные термины, аббревиатуры и условные обозначения. Для теоретических положений приводятся их доказательства и необходимые математические преобразования. Для экспериментальных исследований кратко описываются методики их проведения, способы обработки данных и результаты проверок адекватности и достоверности результатов.

9. Авторский знак. Внизу первой страницы статьи необходимо указать авторский знак - ©. Например: © Иванов И.И., Петренко П.П.; 2025 (10 pt).

10. Заключение (Conclusion) (12 pt)

В заключении излагаются выводы по полученным авторами результатам, описываются примеры их практического применения, предлагаются рекомендации относительно их использования, приводятся выводы, а также указываются перспективы дальнейших исследований по данной проблематике.

11. Литература (References). (12 pt)

Список литературных источников должен быть составлен в порядке ссылок на них. Ссылки на литературу в тексте статьи заключаются в квадратные скобки. Количество библиографических источников должно быть не менее 5-6, в том числе 3 источника должно быть за последние 5 лет.

АДРЕС РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

Российская Федерация, 283001, ДНР, г. Донецк, ул. Артема, 58, ДонНТУ, кафедра «Технология машиностроения», Редакционная коллегия сборника «Прогрессивные технологии и системы машиностроения».

Тел.: +7 856 3010840, +7 856 3010805;

Тел. моб.: +7 949 306-08-79.

E-mail: mntk21@mail.ru <http://ptsm.donntu.ru>

Публикация статей в международном сборнике научных трудов «Прогрессивные технологии и системы машиностроения» - **выполняется бесплатно.**

Образец оформления материалов

УДК 621.85.05-034 (12 pt)

(пустая строка - 12 pt)

И. И. Иванов, д-р техн. наук, проф., **П. П. Петренко**, ассист. (12 pt)

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, ДНР (12 pt)

Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Россия (12 pt)

Тел./Факс: +7 856 3050104; E-mail: tm@fimm.donntu.ru (курсив, 12 pt)

(пустая строка - 12 pt)

ОСНОВЫ СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА СБОРОЧНЫХ СИСТЕМ (слева, 12 PT, ЖИРНЫМ, ЗАГЛАВИЕ МАКСИМУМ ТРИ СТРОКИ)

(пустая строка - 12 pt)

*В статье приведены данные по структурному синтезу сборочных
..... уравнений описывающих процесс сборки изделий. (курсив, 10 pt, до 10 строк).*

Ключевые слова: структура технологии, синтез, процесс, технология, сборка. (курсив, 10 pt, 5
...6 слов)

(пустая строка - 10 pt)

I. I. Ivanov, P. P. Petrenko (10 pt)

(10 pt)

BASES OF THE STRUCTURED SYNTHESSES OF THE ASSEMBLY SYSTEMS (10 pt)

*The efficient design of assembly machinery is vitally important
..... as noun description of functions of presented in the paper.*

Keywords: structured syntheses, process of the assembly, technological system. (курсив, 10 pt)

(пустая строка - 12 pt)

1. Введение (12 pt)

Сборочные системы являются сложными иерархическими системами. Одним из условий [1] повышения производительности ... сборочных технологических систем (рисунок 5). Технологические системы

(пустая строка - 12 pt)

2. Основное содержание и результаты работы (12 pt)

Для сборки изделий широко применяются технологические системы
информационные и другие потоки могут быть описаны следующим образом:

$$k_m = \sqrt{a^2 + b^2}, \quad (1)$$

где k_m - элемент множества;

© Иванов И.И., Петренко П.П.; 2022 (приводится внизу первой страницы статьи, 10 pt)

..... позволили разработать общие алгоритмы функционирования системы.

(пустая строка - 12 pt)

3. Общий алгоритм и рекомендации (12 pt)

Выполненные исследования позволили разработать общий алгоритм
..... основывается на итерационном подходе.

(пустая строка - 12 pt)

4. Цифровые модели (12 pt)

В работе разработаны цифровые структурно-логические модели структуры сборочных систем, выполненные с применением основных положений алгебры структур

(пустая строка - 12 pt)

5. Заключение (12 pt)

Таким образом, выполненные исследования позволили реализовать следующее:

1. Разработать методику синтеза структурных вариантов
..... отличительной особенностью данной методики.
2. Установить закономерности
..... позволили произвести процесс итерации.
3. Разработать рекомендации
..... внедрить на производстве.

(пустая строка - 12 pt)

ЛИТЕРАТУРА:

(центрировать, 12 pt, не менее 5 ... 6 библиографических источников)

1. Ким, И. П. Исследование эффективности роторных машин / И. П. Ким. – К: КПИ, 1985. – 123 с. ISBN 966-7907-22-8.
2. Устюгов, А. В. Надежность технологических машин / А. В. Устюгов. – Донецк: ДонНТУ, 1998. – 425 с. ISBN 966-7907-23-6.
3. Савельев, А. А. Сборка машин / А. А. Савельев – М.: Наука, 2009. - 342 с. ISBN 966-7907-26-9.
4. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий / А. Н. Михайлов – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с. ISBN 966-7907-24-4.
5. Базров, Б. М. Модульные технологии / Б. М. Базров. – М.: Машиностроение, 2000. – 368 с. ISBN 5-217-03061-5.
6. Сидоров, И. А. Учет переменности параметров процесса точения фасонных поверхностей при определении оптимальных режимов резания / И.А. Сидоров, А.Н. Алехин //Наукоемкие технологии в машиностроении: ежемесячный научно-технический и производственный журнал. – М: Машиностроение. – 2024. - № 9. – С. 11-17.
7. Любшин, А. Н. Особенности полировки лопаток с коррозионными разрушениями покрытий /А. Н. Любшин, А. Н. Шейко, Б. Л. Недашковский // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных работ. – Донецк: ДонНТУ, 2025. – Вып. 1 (25). – С. 207-212

пустая строка - 12 pt)

Поступила в редколлегию _____ (дата поступления статьи, 10 pt)

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Выпуск 2 (89)' 2025

Главный редактор
д-р техн. наук, проф. А. Н. Михайлов
E-mail: tm@fimm.donntu.ru
Технический редактор *Д. О. Киселица*

*Учредитель и издатель – ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ*

Адрес издателя: Россия, ДНР, 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, ФГБОУ ВО «ДонНТУ»,
тел. +7 (856) 337-17-33, 335-75-62

Адрес редакции: Россия, ДНР, 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, тел. + 7 (949) 306-08-79,
+7 (856) 301-08-05. E-mail: tm@fimm.donntu.ru. Сайт: <http://ptsm.donntu.ru>

Подписано к печати 02.06.2025 г.
Формат 60х84^{1/16}. Бумага Maestro.
Гарнитура «Times New Roman». Печать лазерная.
Усл. печ. л. 4,05. Уч.-изд. л. 4,13. Тираж 300 экз.

Отпечатано в рекламно-издательском отделе учредителя
РИО «Донецкая политехника»
Адрес: г. Донецк, ул. Артема, 58
Тел.: +7 (856) 301-09-67