

Вып. 3 (90)' 2025 **ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ**



ДОНЕЦКИЙ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ

ТЕХНИЧЕСКИЙ

УНИВЕРСИТЕТ

ISSN 2073-3216
(E) ISSN 2518-7120

ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ

**Международный
сборник научных трудов**

Выпуск 3 (90)' 2025



ДОНЕЦК - 2025

ISSN 2073-3216
ISSN 2518-7120 (E)

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 3(90)' 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.

П78 **Прогрессивные технологии и системы машиностроения :**
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

Ю. С. Багайсков, д-р техн. наук, доцент, **Н. В. Некипелов**

Волжский политехнический институт (филиал) Волгоградского государственного технического университета, г. Волжский, Россия

Тел. +7 902 3130738; E-mail: bagaiskov@bk.ru

АНАЛИЗ ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ДРОБЕМЕТНОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ СТАЛЬНЫХ ТРУБ

Для защиты поверхности стальных труб при транспортировке нефтегазовых материалов в условиях агрессивных сред применяют покрытия. При этом для подготовки поверхности труб наибольшее применение имеет дробеметный метод. В качестве абразивных частиц для этой обработки используется в основном стальная колотая дробь высокой твердости. Для лучшего закрепления покрытий на стальных поверхностях необходимо иметь повышенную развитую шероховатость. Показана зависимость достигаемой шероховатости от твердости частиц дроби. Вследствие ударного действия при обработке происходит разрушение дроби, меняются их размеры и форма. Фактически в рабочей зоне обработки находится смесь частиц различных фракций. Параметры шероховатости, глубины проникновения частиц дроби в поверхность и величины остаточных напряжений зависят от размерности и формы частиц дроби, дистанции и угла атаки частиц относительно поверхности, времени обработки.

Ключевые слова: трубы, покрытия, дробь, твердость, шероховатость, напряжения.

Yu. S. Bagayskov, N. V. Nekipelov

ANALYSIS OF OPTIMAL SHOTBLASTING CONDITIONS OF STEEL PIPE SURFACES

Coatings are used to protect the surface of steel pipes during the transportation of oil and gas materials in aggressive environments. Shotblasting is the most commonly used method for preparing the pipe surface. High-hardness steel grit is primarily used as an abrasive particle for this treatment. For better adhesion of coatings to steel surfaces, a high degree of roughness is required. The dependence of the achievable roughness on the hardness of the shot particles is demonstrated. Due to the impact action during processing, the shot particles are destroyed, changing their size and shape. In fact, the processing zone contains a mixture of particles of different sizes. Roughness parameters, the depth of penetration of the shot particles into the surface, and the magnitude of residual stresses depend on the size and shape of the shot particles, the distance and angle of attack of the particles relative to the surface, and the processing time.

Keywords: pipes, coatings, shot, hardness, roughness, stress.

1. Введение

Для транспортировки нефтегазовых материалов к потребителю служат трубопроводные системы. Эксплуатация труб проходит в условиях воздействия значительных механических нагрузок, перепадов температур и агрессивных сред. Для этого поверхности труб, чаще всего стальных, должны обладать высоким уровнем характеристик по прочности, износостойкости, коррозионной стойкости [1]. Обеспечить такие требования позволяет нанесение покрытий, в основном на композиционной полимерной основе. Для закрепления таких покрытий, повышения адгезионных свойств, необходима определенная подготовка поверхностей труб. Поэтому подготовка поверхности перед нанесением антикоррозионных покрытий является необходимой стадией в технологическом цикле их нанесения.

Повышение степени адгезии покрытий к поверхностям труб может уменьшить скорость коррозии, увеличить срок службы покрытия и самих труб [2].

В процесс подготовки поверхности труб к нанесению покрытий входит очистка поверхности от адсорбированных загрязнений и оксидных пленок, обезжиривание и в

конечном итоге обеспечение микрорельефа с желательной величиной шероховатости. В заключительной стадии такой обработки поверхности труб применяют чаще всего дробеструйный или дробеметный способы. Различаются эти технологические процессы источниками энергии, сообщаемого движение рабочим телам – частицам (зернам абразива). В первом случае – за счет сжатого воздуха и прямолинейного ударного действия частиц, во втором – за счет вращения лопасти, основана на принципе центробежного ускорения частиц, которые с высокой скоростью воздействуют на поверхность трубы [3].

Дробеметная обработка достаточно производительна, позволяет достичь равномерного, заданной величины, микрорельефа поверхности, при этом создаются благоприятные остаточные напряжения сжатия, которые повышают усталостную прочность и коррозионную стойкости.

Выбор характеристик рабочих тел при дробеметной обработке очень важен. В качестве этих частиц применяют частицы (дробь) их различных материалов. Прежде всего это стальная дробь, а именно по видам: литая дробь, имеет оптимальную твердость и качество обработки, дольше сохраняет сферическую форму в рабочей смеси, колотая дробь, изготавливается из литой путем дробления, выпускаются три основных группы, отличающиеся по твердости (GP, GL и GH), дробь на основе рубленой стали, вследствие высокой прочности может использоваться несколько раз. Кроме того применяются чугунная дробь, она хорошо очищает поверхности от ржавчины или окалины, но плохо удаляет клейкие загрязнения, износостойкость в несколько раз ниже, чем у стальной дроби, керамическая дробь, применяется для обработки поверхностей, требующих высокой точности и минимального износа оборудования, алюминиевая дробь, цель - обработка мягких металлов, не повреждает структуры, убирают накипь, тонкие слои ржавчины, окалины и нагара, дробь на основе стекла, имеет вид сверхпрочных стеклянных шариков, без вредных примесей, предназначена для многократной обработки металлических изделий со средней прочностью [4].

Стальная дробь различается по химическому составу, структуре металла, форме, размерам и твердости. Примерный химический состав: углерода 0,8-1,2 %, Mn и Si по 0,5-0,7%.

Анализ и опыт показывают, что качество подготовки поверхности труб напрямую влияет на адгезию покрытия, чаще всего полимерного. В частности ключевым параметром шероховатости поверхности является величина Rz. В принципе увеличение Rz способствует улучшению адгезии. Однако, с другой стороны, чрезмерная шероховатость может привести к образованию острых пиков, как концентраторов напряжений, которые могут стать и зонами развития коррозии [5].

Важно уметь выбирать оптимальные параметры дроби и режимных факторов процесса обработки, достигать баланса между достигаемой шероховатостью, получаемой адгезией и производительностью дробеметной обработки, исходя из требований, связанных с характеристикой поверхности труб и функциональных условий их эксплуатации. Поэтому проведение исследований оптимальных условий дробеметной обработки является актуальным.

2. Основное содержание и результаты работы

Анализ исследований с применением разных видов стальной дроби показал следующее. Колотая дробь разных групп имеет твердость от 40-52HRC до примерно 60-53 HRC и обеспечивает более развитую и выраженную шероховатость поверхности.

Величина Rz на 30-40 % выше, чем достигается у литой дроби. Вследствие самой высокой твердости и повышенной склонности к раскалыванию прежде всего дробь группы GH всегда сохраняет остроугольную форму, обладая при этом максимальной производительностью и самым коротким жизненным циклом по сравнению с другими марками дроби [4]. На рисунке 1 приведена зависимость достигаемой шероховатости при дробеметной обработке от величины твердости различных видов стальной дроби. На данных из графика прослеживается четкая корреляционная зависимость шероховатости поверхности от показателей твердости дроби.

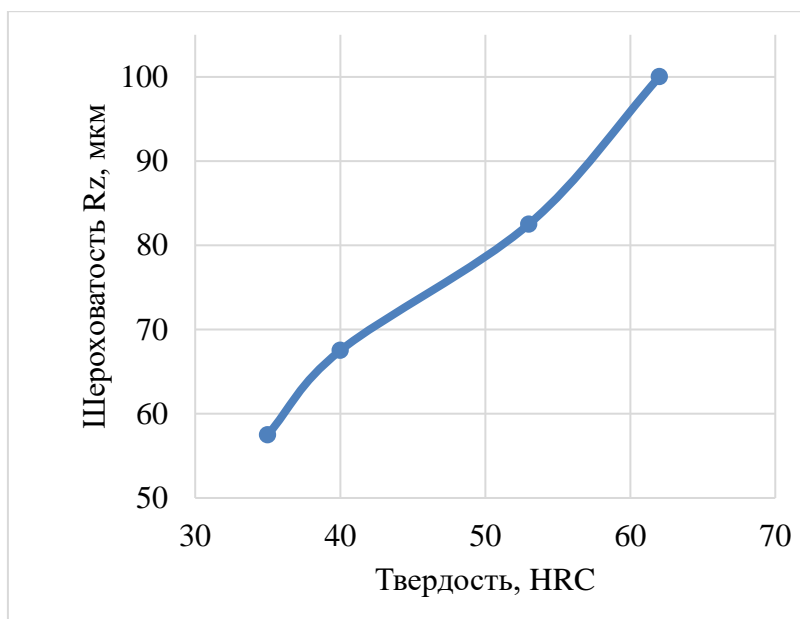


Рисунок 1. Зависимость шероховатости обработанной поверхности от твердости частиц дроби

Из-за удара частиц дроби в процессе дробеметной обработки и их раскола производится добавление и смешивание частиц в сепараторе дробеметной установки. Реальная смесь состоит из мелких и крупных фракций. При сетевом анализе по размерам частиц состав смеси должен примерно соответствовать схеме на рисунке 2. В зависимости от требований к обработке конкретной продукции рациональный состав смеси, прежде всего по среднему размеру частиц дроби, может отличаться

К технологическим параметрам дробеметной обработки относятся: скорость дроби, размер и форма частиц дроби, угол атаки частиц дроби к поверхности, дистанция и время обработки.

Оптимальная скорость частиц дроби составляет 60-80 м/с. Высокая скорость дает повышенную производительность, но может вызвать перегрев поверхности [5]. Рекомендуемая скорость дроби составляет 60-80 м/с. Существует оптимальная дистанция, как длина разгона частиц, от среза сопла до обрабатываемой поверхности, при которой их скорость достигает максимума. При малых расстояниях частицы не успевают разогнаться и сталкиваются с отражёнными от поверхности другими частицами. При увеличении такого расстояния плотность потока частиц дроби снижается, что также уменьшает скорость и энергию удара.

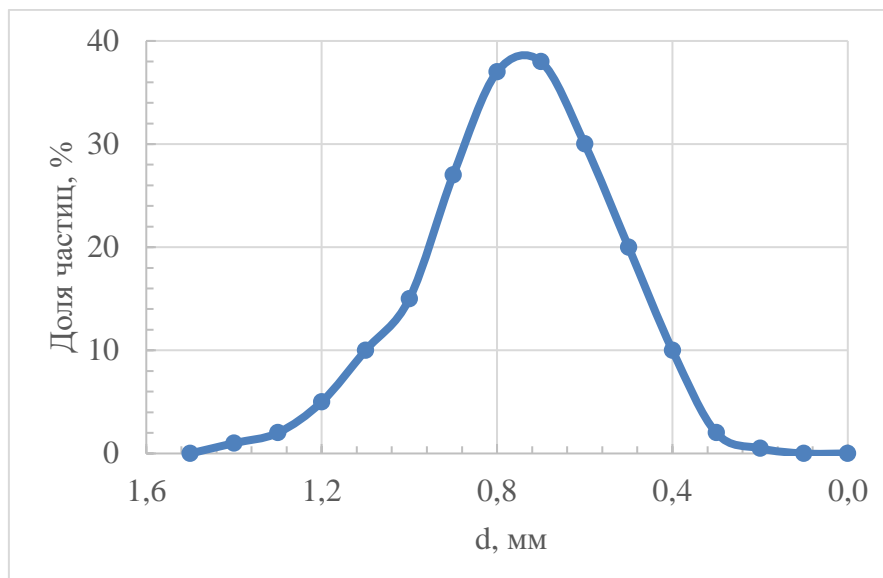


Рисунок 2. Распределение частиц дроби по размерам

Скорость очистки поверхности и производительность процесса выше, если меньше размеры дроби и больше концентрация её частиц. При увеличении размера частиц растет количество выступов и углублений на поверхности труб, несколько увеличивается шероховатость поверхности и степень адгезии покрытия, но и скорость очистки уменьшается [5]. Если частицы дроби имеют близкую к сферической форму, то на поверхности образуется больше впадин меньшей глубины.

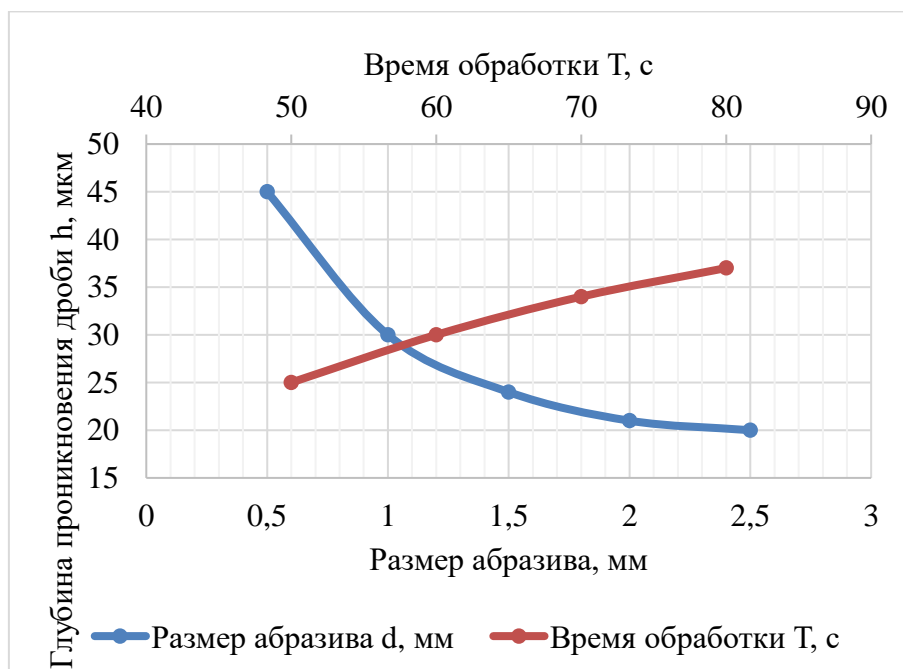


Рисунок 3. Зависимость глубины проникновения дроби (абразива) от их размера и времени обработки

При более угловатой форме частиц обработанная поверхность будет более шероховатой с глубокими впадинами, но некоторые мелкие частицы могут даже

проникать в поверхность и там оставаться. Это может снижать качество подготовки поверхности, приводит к необходимости дополнительной обработки. Так, анализ глубины проникновения частиц дроби в поверхность показал, что она возрастает прежде всего с увеличением продолжительности обработки (рисунок 3) и с уменьшением размера частиц.

Повышенная длительность процесса дробемётной обработки может привести к чрезмерному повышению температуры поверхности, снижению шероховатости и прочности адгезии покрытия.

При анализе реального процесса дробеударного упрочнения часть потока дроби, обладающая заданной скоростью, имеет нормальное направление движения к обрабатываемой поверхности, другая часть дроби попадает на поверхность под различными углами. Из-за отклонения части дроби, соударения с отскочившими дробинками, на обработанной поверхности образуются лунки с различными диаметрами и глубиной. Это может приводить к неравномерности величины упрочненного слоя и распределения остаточных напряжений, ухудшать качество обработанной поверхности [6].

Анализ результатов исследования напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя показал, что независимо от направления скорости, значений скорости и размера дроби напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя обрабатываемого материала у отпечатка дроби имеет аналогичный характер [7].

По известным данным при скорости удара дроби диаметром 1 мм свыше 15 м/с вне зависимости от направления удара с отклонением до 30 град. максимальное значение остаточных напряжений в поверхностном слое детали также меняется незначительно.

На рисунке 4 представлен график значений максимальных остаточных напряжений.

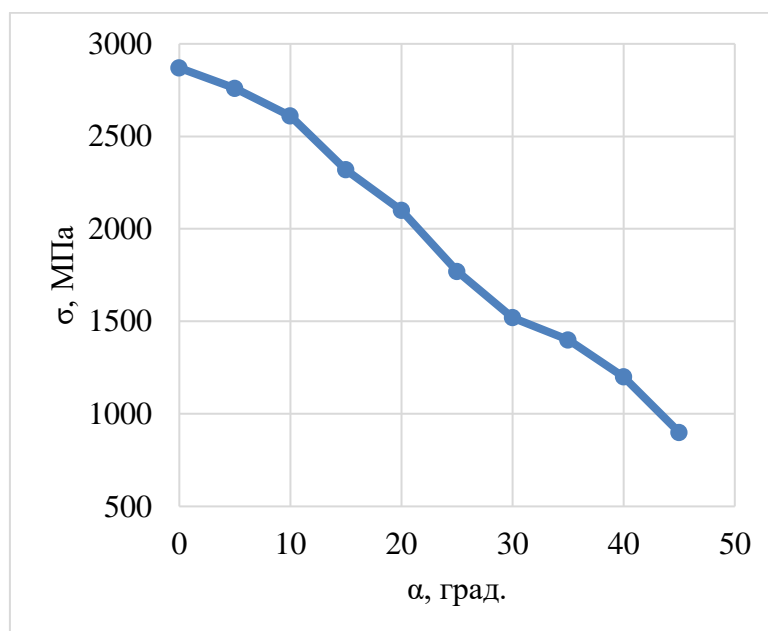


Рисунок 4. Зависимость максимальных остаточных напряжений поверхности труб от угла атаки частиц дроби при ударе дроби о поверхность со скоростью 30 м/с в зависимости от угла удара дроби

Показано, что чем больше в этом случае, т.е. при повышенной скорости частиц, угол атаки частиц дроби, тем больше величина остаточных напряжений.

3. Заключение

Проведенный анализ показывает, что дробеметный метод имеет эффективное применение при подготовке поверхностей стальных труб перед нанесением покрытий, позволяет достичь развитой поверхности, заданной величины шероховатости, создаются благоприятные напряжения сжатия, которые повышают усталостную прочность и коррозионную стойкости. В качестве абразивных частиц используется в основном стальная колотая дробь высокой твердости (выше 60 HRC). Показана зависимость величины достигаемой шероховатости от увеличения твердости дроби. Установлено, что при дробеметной обработке в результате ударного действия происходит разрушение дроби и реально в рабочей зоне находится смесь их различных фракций. На глубину проникновения частиц дроби в поверхность, соответственно на размер шероховатости и величину остаточных напряжений влияют режимные факторы: увеличение размерности частиц дроби, степени остроугольности их форм, дистанция и угол атаки частиц относительно поверхности, время обработки.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Колтаков, Д. А. Анализ основных методов повышения коррозионной стойкости и износостойкости рабочих поверхностей / Д. А. Колтаков, Е. А. Шаповалова // Вестник науки. – 2024. – Т. 1, № 1(70). – С. 267-272. – EDN EHVZOE.
2. Карпиков А. В., Буглов Н. А., Захаров В. А., Москвитин В. Н. Повышение коррозионной стойкости бурильных труб дробеударной обработкой // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН. - 2011. - №39. - С. 228-230.
3. Горанский Г. Г., Толстяк Э. Н., Саранцев В. В. Разработка технологий и оборудования для подготовки поверхности в УП «Технопарк БНТУ «Метолит» // Литье и металлургия. - 2006. - №37. - С. 165-169.
4. Габбасов А. Ф., Мутигуллин А. Р., Кузнецова О. А. Выбор абразивного материала для механической очистки металлических поверхностей // Инновационные подходы в решении проблем современного общества. - 2018. - С. 228-230.
5. S. Khorasanizadeh The Effects of Shot and Grit Blasting Process Parameters on Steel Pipes Coating Adhesion // World Academy of Science, Engineering and Technology. - 2010. - №44. - С. 1493-1501.
6. Теплухин В. Г., Карандашев А. Н., Михайлов С. Н., Ермаков С. Б. Повышение надежности и долговечности труб буровых установок, эксплуатируемых в условиях холодного климата // Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке. - 2021. - С. 228-230.
7. Моделирование формирования основных показателей качества поверхностного слоя деталей при дробеударном упрочнении / В. П. Кольцов, Ч. В. Ле, Д. А. Стародубцева, М. Х. Нгуен // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 3(75). – С. 50-58. – DOI 10.26731/1813-9108.2022.3(75).50-58. – EDN IEPFRN.

Поступила в редколлегию 13.05.2025 г.

УДК 669.18

С. П. Еронько, д-р техн. наук, проф., **Е. В. Ошовская**, канд. техн. наук, доц.,
М. И. Прилуцкий
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк
П. А. Петров канд. техн. наук, доц., **М. П. Петров**
ФГБОУ ВО «Донбасский государственный технический университет», г. Алчевск
Тел.: +7 949 4055287; E-mail: ersp52@mail.ru

СИСТЕМА КОМПЛЕКСНОЙ ПОДАЧИ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ И ШЛАКООБРАЗУЮЩЕЙ СМЕСИ В КРИСТАЛЛИЗАТОР МНЛЗ

В статье приведены описание конструкций и результаты лабораторных испытаний системы одновременной комплексной подачи порошкообразных материалов в кристаллизатор машины непрерывного литья заготовок.

Ключевые слова: порошковая проволока, шлакообразующая смесь, кристаллизатор, трайб-аппарат, шнековый дозатор.

S. P. Eronko, E. V. Oshovskaya, M. I. Prilutskiy, P. A. Petrov, M. P. Petrov

SYSTEM FOR COMPLEX FEEDING OF FLUX-CORED WIRE AND SLAG-FORMING MIXTURE INTO THE MOLD CASTER

The article describes the designs and results of laboratory tests of a system for simultaneous complex feeding of powdered materials into the mold of a continuous casting machine.

Keywords: flux-cored wire, slag-forming mixture, crystallizer, wire machine, screw doser.

1. Введение

В настоящее время в сталеплавильном производстве получили широкое распространение два способа ввода в жидкий металл специальных добавок в порошкообразном состоянии, вдуваемых в струе инертного газа или подаваемых в металлической оболочке в виде начиненной ими проволоки. При этом, как показал опыт внедрения внепечной обработки стали на ряде отечественных металлургических предприятий, легкоокисляющиеся модифицирующие добавки целесообразно подавать в жидкий металл непосредственно перед началом его затвердевания, т.е. в промежуточный ковш [1–7] или кристаллизатор [8] машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Присадка порошкообразных материалов непосредственно в кристаллизатор, в сравнении с другими способами подачи реагентов, обеспечивает повышение в 2 – 2,5 раза их усвоения расплавом, что позволяет сократить во столько же раз потери модификаторов и снизить в 3 – 4 раза расход порошковой проволоки. Вместе с тем, реализация способов микролегирования и модифицирования стали на заключительном этапе ее производства требует учитывать то, что современная практика эксплуатации машин непрерывного литья заготовок в обязательном порядке предполагает также непрерывную подачу на зеркало металла в кристаллизаторе шлакообразующих смесей (ШОС) в порошкообразном или гранулированном виде, высокая эффективность использования которых может быть обеспечена только при их механизированном вводе с помощью специальных устройств [9, 10]. В таком случае требуется разрешение противоречия, обусловленного дефицитом свободного места на рабочей площадке возле промежуточного ковша и сложностью размещения дополнительных устройств для выполнения операций, связанных с транспортированием к кристаллизатору необходимых мелкодисперсных добавок.

Данное обстоятельство является мотивацией начала работ по созданию универсального оборудования, позволяющего уменьшить площадь для своего размещения за счет обеспечения реализации одновременной подачи в кристаллизатор порошковой проволоки и шлакообразующей смеси, что является важной научно-практической задачей.

2. Содержание и результаты выполненной работы

Сотрудниками кафедр «Механическое оборудование заводов черной металлургии им. В.Я. Седуша» ДонНТУ и «Машины металлургического комплекса» ДонГТУ на основании предшествующего опыта [11, 12] разработана система комплексной механизированной подачи порошковой проволоки и шлакообразующей смеси в кристаллизатор машины непрерывного литья сортовых заготовок, позволяющая минимизировать площадь, требуемой для размещения двух ее структурных механизмов в непосредственной близости к промежуточному ковшу [13]. Конструктивная схема предложенной системы показана на рисунке 1. Она включает:

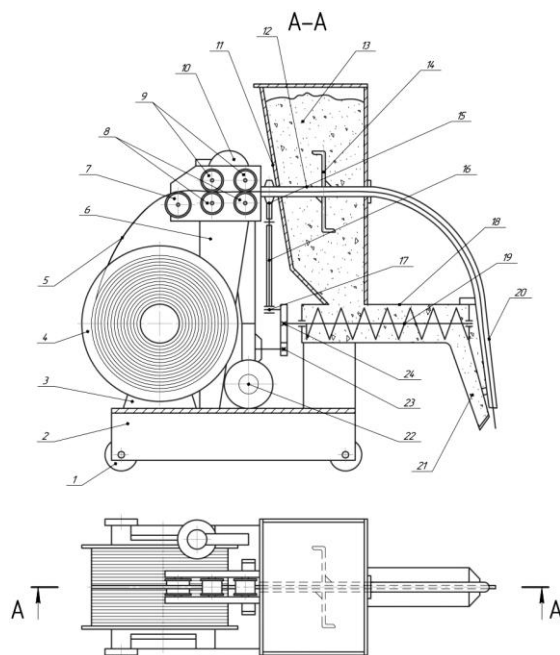


Рисунок 1. Конструктивная схема разработанной системы комплексной механизированной подачи сыпучих материалов в кристаллизатор МНЛЗ

установленную на колесах 1 передвижную платформу 2, несущую питающий бункер 11, к нижней части которого примыкает горизонтально расположенный шнековый дозатор 19, приводимый в действие через зубчатую передачу 23, 24 червячным мотором-редуктором 22 с регулируемой частотой вращения выходного вала. Внутри бункера 11 в подшипниковых опорах размещен пустотелый вал 12 ворошителя 14, поворачиваемого на угол 90° кривошипно-рычажным механизмом 15–17 и устраняющего зависание мелкодисперсной шлакообразующей смеси 13, поступающей к подающему носку 21 шнекового дозатора 19. За бункером на опоре 3 с возможностью вращения установлена катушка 4 с порошковой проволокой 5, подаваемой с помощью трайб-аппарата через полость вала 12 и изогнутую направляющую 20, жестко

связанную с корпусом 18 и подающим носком 21 шнекового дозатора. Трайб-аппарат, корпус которого закреплен на стойке 6, содержит пару ведущих роликов 9, синхронно вращаемых с регулируемой скоростью червячным мотор-редуктором 10. Порошковая проволока 5, сматываемая с катушки 4, направляющим роликом 7 задается в зазор между парой ведущих 9 и парой прижимных роликов 8. Такое конструктивное исполнение предлагаемой системы позволяет осуществлять одновременную регулируемую подачу в кристаллизатор машины непрерывного литья заготовок двух видов дисперсных материалов, выполняющих разные технологические функции. Порошок, которым начинена проволока, после расплавления вступает в реакцию с разливаемой сталью в верхнем ее слое, равномерно покрытом шлакообразующей смесью, устраняющей его прямой контакт с воздушной атмосферой, благодаря чему предотвращается угар легкоокисляющихся реагентов, вводимых в жидкий металл для улучшения его служебных свойств.

Рабочие параметры структурных механизмов предложенной системы комплексной механизированной подачи мелкодисперсных материалов в кристаллизаторы машин непрерывного литья сортовых заготовок определили по ранее разработанной методике, подробно изложенной в работе [14]. В соответствии с нею, исходными данными при расчете рабочих характеристик шнекового питателя являются удельный расход шлакообразующей смеси q и производительность P ручья МНЛЗ, определяемая по формуле:

$$P = Sv_3\rho_c, \quad (1)$$

где S – площадь поперечного сечения отливаемой сортовой заготовки, м^2 ;

v_3 – скорость вытягивания заготовки из кристаллизатора, м/мин ;

ρ_c – плотность жидкой стали, кг/м^3 .

Тогда массовый расход ШОС, подаваемой в кристаллизатор, составляет:

$$Q = Pq = Sv_3\rho_cq. \quad (2)$$

Для сортовых квадратных заготовок сечением 100×100 мм и 180×180 мм, имеющим $S = 0,01\text{м}^2$ и $S = 0,033 \text{ м}^2$, в соответствии с требованиями действующих технологических инструкций, можно принять: $v_3 = 8 \text{ м/мин}$ и $v_3 = 6 \text{ м/мин}$; $q = 0,4 - 0,5 \text{ кг/т}$.

С учетом указанных значений используемых величин, массовый расход шлакообразующей смеси, которые должны обеспечивать шнековые питатели, составляют соответственно $0,22 \text{ кг/мин}$ и $0,68 \text{ кг/мин}$.

Требуемая максимальная частота вращения горизонтального шнека определяется по формуле:

$$n_{\text{вш}} = Q / [0,785(D_{\text{ш}}^2 - d_{\text{в}}^2)l_{\text{в}}\gamma_c\varphi], \quad (3)$$

где $D_{\text{ш}}$ – наружный диаметр витков шнека;

$d_{\text{в}}$ – диаметре вала шнека;

$l_{\text{в}}$ – шаг витков шнека;

γ_c – насыпная плотность шлакообразующей смеси;

φ – коэффициент заполнения смесью межвиткового пространства шнека.

При определении частоты вращения шнека конструктивно задаются его размерами, а также значениями $\gamma_c = 900 \text{ кг/м}^3$ и $\varphi = 0,5$. Результаты расчетов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Расчетные значения рабочих параметров механизма подачи шлакообразующей смеси

Сечение отливаемой заготовки, мм	Скорость вытягивания заготовки, м/мин	Расход стали, т/мин	Расход шлакообразующей смеси, кг/мин	Размеры шнека, мм			Частота вращения шнека, об/мин
				Наружный диаметр витка	Диаметр вала	Шаг витков	
100 x 100	8	0,56	0,22	40	10	30	15
180 x 180	6	1,36	0,68	50	15	40	20

Рабочие параметры механизма подачи порошковой проволоки назначали в соответствии с рекомендациями, приведенными в работах [7, 8]. В соответствии с ними, для сортовых МНЛЗ удельный расход порошковой проволоки при микролегировании или модифицировании должен составлять 0,3 – 0,4 кг на тонну разливаемой стали, а скорость ее подачи в пределах 0,05 – 0,15 м/с, что отражают данные таблице 2.

Таблица 2. Расчетные значения рабочих параметров механизма подачи порошковой проволоки

Сечение отливаемой заготовки, мм	Скорость вытягивания заготовки, м/мин	Расход стали, т/мин	Расход порошковой проволоки, кг/мин	Скорость подачи проволоки, м/с	Угловая скорость вращения подающего ролика, с^{-1}	Частота вращения подающего ролика, об/мин
100 x 100	8	0,56	0,18	0,05	1	10
180 x 180	6	1,36	0,55	0,15	3	30

С целью проверки правильности принятых технических решений и оценки корректности полученных расчетных зависимостей для обоснования конструктивных и энергосиловых параметров предложенной системы комплексной механизированной подачи сыпучих материалов в кристаллизатор МНЛЗ, перед началом проектирования ее промышленного образца, изготовили его лабораторный вариант (фото на рисунке 2), который по масштабу соответствовал условиям отливки сортовой заготовки с поперечным сечением 100 x 100 мм. Экспериментальные исследования проводились с учетом рекомендаций работы [15] по выбору измерительной аппаратуры, позволяющей в режиме реального времени контролировать основные параметры работы изучаемой механической системы, к которым прежде всего относятся технологические нагрузки, преодолеваемые приводами ее структурных механизмов.

В соответствии с планом эксперимента, прежде всего, предполагалось получить информацию о технологических нагрузках, действующих на приводы структурных механизмов разработанной системы комплексной подачи порошкообразных материалов в кристаллизатор МНЛЗ.

Для контроля моментов сопротивления, преодолеваемых приводами механизмов подачи шлакообразующей смеси и порошковой проволоки использовали

тензорезисторный преобразователь, работающий в комплексе с усилителем и 12-разрядным многоканальным аналого-цифровым преобразователем (АЦП) L-CARD, плата которого установлена на шине ISA IBM-совместимой ПЭВМ.

Структурная схема измерительного комплекса приведена на рисунке 3.

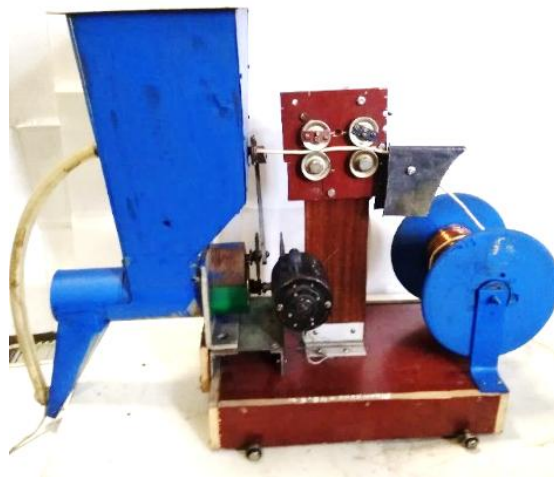


Рисунок 2. Лабораторный образец предложенной системы комплексной механизированной подачи сыпучих материалов в кристаллизатор МНЛЗ

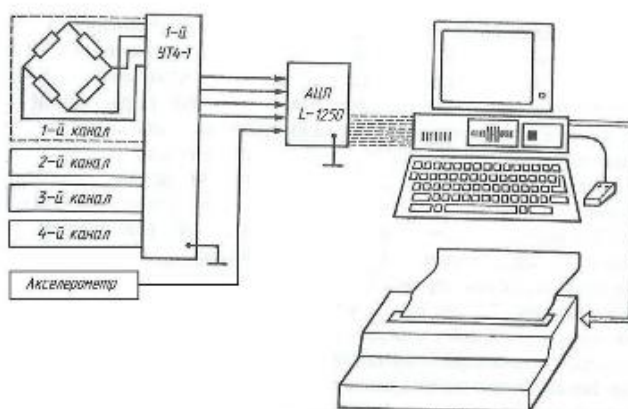
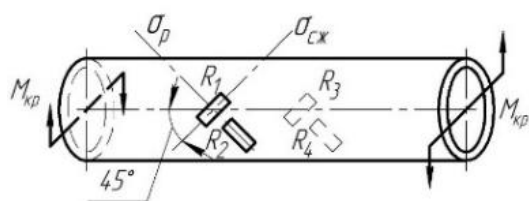


Рисунок 3. Структурная схема применявшегося контрольно-измерительного комплекса

Тензорезисторный преобразователь для контроля крутящего момента выполнен в виде металлической гильзы (рисунок 4 а), на поверхность которой под углом 45° к ее продольной оси наклеены фольговые тензодатчики сопротивлением 200 Ом, включенные в мостовую схему. При этом соблюдалось условие:

$$R_1 \cdot R_2 = R_3 \cdot R_4. \quad (4)$$

Сама гильза установлена в подшипниках скольжения и помещена в металлическую коробку с прозрачной передней стенкой (фото на рисунке 4 б). Для съема электрического сигнала с измерительной диагонали моста сопротивлений и подключения к нему источника питания на гильзе установлены изолированные от ее корпуса медные кольца, контактирующие своей наружной поверхностью с токопроводящими шинами, концы которых соединены с разъемом, вмонтированным в стенку коробки.

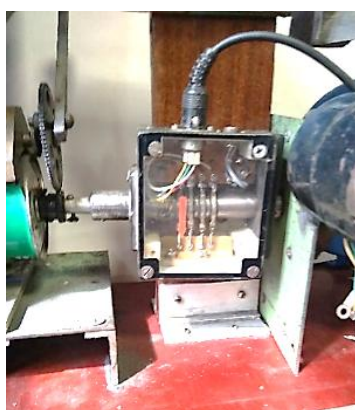


а

б

Рисунок 4. Схема размещения тензодатчиков на поверхности гильзы преобразователя (а) и его конструктивное исполнение (б)

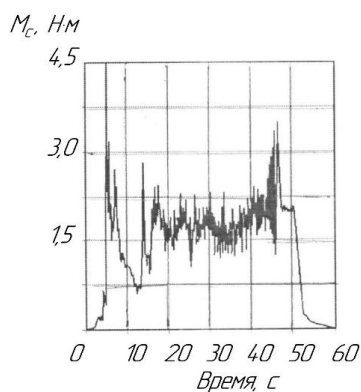
С помощью указанного измерительного комплекса, последовательно используя преобразователь в качестве муфты, передающей крутящий момент от выходного вала мотор-редуктора к рабочему органу (фото на рисунке 5), получили данные о значениях нагрузки, действующей на приводы обоих механизмов. На рисунке 6 показаны виды регистрировавшихся сигналов.



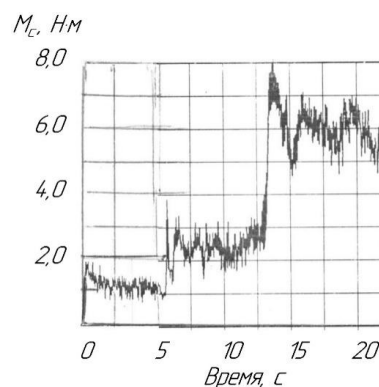
а

б

Рисунок 5. Место установки тензорезисторного преобразователя при контроле крутящих моментов, развиваемых приводами шнекового дозатора (а) и трайб-аппарата (б)



а



б

Рисунок 6. Сигналы, зарегистрированные при контроле крутящих моментов, требуемых для работы шнекового дозатора (а) и трайб-аппарата (б)

Результаты выполненных измерений свидетельствуют о том, что момент сопротивления, действующий на привод механизма подачи проволоки в кристаллизатор МНЛЗ, включает три составляющие, которые вызваны:

- сопротивлением вращению катушки с проволокой (15 %);
- сопротивлением в трайб-аппарате (20 %);
- сопротивлением движению проволоки в направляющей изогнутой трубе (65 %).

В ходе лабораторного эксперимента была подтверждена правильность технических решений, заложенных в конструкцию разработанной системы механизированной подачи порошкообразных материалов. Ее структурные механизмы функционировали в устойчивом режиме обеспечивая регулируемый ввод порошковой проволоки и мелкодисперсной шлакообразующей смеси. Благодаря исключению подвисания сыпучего материала в полости бункера над заборным отверстием шнекового дозатора за счет наличия ворошителя, поворотные лопасти которого не допускают образования свода в слое порошкообразной смеси, ее расход в задаваемых пределах легко регулируется изменением частоты вращения шнека. Контроль массового расхода шлакообразующей смеси, выполнявшийся с использованием высокоточных электронных весов, подтвердил высокую равномерность ее подачи. В качестве примера на рисунке 7 показана зависимость изменения во времени интенсивности подачи шлакообразующей смеси, зафиксированная при частоте вращения шнека 30 об/мин с наружным диаметром 50 мм.

Размещение на одной подвижной платформе двух механизмов, обеспечивающих одновременное выполнение операций, связанных с регулируемой подачей порошкообразных материалов в жидкую сталь по ходу ее непрерывной разливки, позволяет решить поставленную технологическую задачу в условиях дефицита свободного места на рабочей площадке промежуточного ковша МНЛЗ.

Информация, полученная в ходе лабораторных экспериментов, использована при расчете и конструировании опытно-промышленного образца системы комплексной механизированной подачи в кристаллизатор МНЛЗ двух видов порошкообразных материалов, предназначенной для реализации эффективных технологий модифицирования и микролегирования стали с использованием инновационного отечественного оборудования [16]. Подготовленная техническая документация,

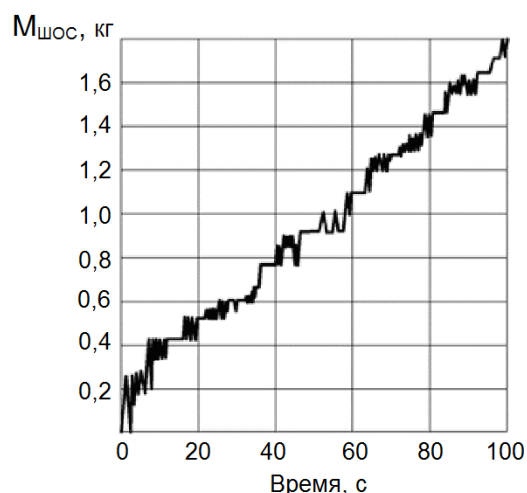


Рисунок 7. Зафиксированная расходная характеристика шнека диаметром 50 мм при частоте его вращения 30 об/мин

в соответствии с действующим соглашением о научно-техническом сотрудничестве между кафедрой МОЗЧМ ДонНТУ и ГУ ПКТИ (г. Донецк), нашла применение в качестве базовой тематики заданий при прохождении преддипломной практики в проектно-конструкторском отделе данного государственного учреждения студентами по направлению подготовки 15.04.02 «Технологические машины и оборудование» магистерской программы «Инжиниринг и технический менеджмент металлургического оборудования».

3. Заключение

Предлагаемая система механизированной подачи реагентов позволит сократить интервал времени между вводом модификатора или лигатуры в расплав и началом его затвердевания, приблизить продолжительность этого интервала к длительности образования максимального числа активных центров кристаллизации и тем самым повысить эффективность процессов модифицирования и микролегирования стали благодаря повышению усвоения расплавом вводимых реагентов, а также снижению расхода порошковой проволоки. Выполненная разработка будет способствовать решению задач, намеченных принятой в стране программой импортозамещения, поскольку дает возможность заместить в сталеплавильных цехах металлургических предприятий отечественными аналогами зарубежное технологическое оборудование, поставки которого запрещены санкциями, принятыми европейскими странами.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Обработка стали порошковой силикокальциевой лентой в промежуточном ковше МНЛЗ / О. В. Носоченко [и др.] // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической информации. – 1985. – № 8. – С. 54.
2. Бабанин, А. Я. Обработка стали порошковой проволокой с силикокальцием в промежуточном ковше / А. Я. Бабанин, Л. С. Лепихов, О. В. Носоченок // Сталь. – 1998. – № 1. – С. 21 - 22.
3. Внепечная обработка металла порошковой проволокой с различными составами наполнителей / А. Ф. Каблуковский [и др.] // Труды шестого конгресса сталеплавильщиков, г. Череповец 17 – 19 октября 2000г.- С. 364 – 369.
4. Отработка технологии доводки металла порошковой проволокой / А. Ф. Сарычев [и др.] // Труды седьмого конгресса сталеплавильщиков, г. Магнитогорск 15 – 17 октября 2002 г.- С. 411 – 412.
5. Освоение технологии внепечной обработки различных групп марок стали боросодержащей порошковой проволокой на РУП «БМЗ» / Д. А. Дюдкин [и др.] // Труды восьмого конгресса сталеплавильщиков, г. Нижний Тагил 18 – 22 октября 2004 г.- С. 354 – 356.
6. Голубцов, В. А. Сравнение способов модифицирования стали в ходе внепечной обработки / В. А. Голубцов, А. А. Воронин, В. Е. Рощин // Труды восьмого конгресса сталеплавильщиков, г. Нижний Тагил, 18 – 22 октября 2004 г.- С. 411 – 418.
7. Модифицирование металла нанопорошковыми инокуляторами на сортовой МНЛЗ для повышения качества проката // Е. В. Протопопов [и др.] // Известия вузов: Черная металлургия, 2013.- № 6.- С. 33 – 35.
8. Протасов, А. В. Технологические комплексы для обработки расплавленных металлов инъекционной проволокой / А. В. Протасов, Б. А. Сивак, В. И. Золотухин. – Старый Оскол: ТНТ, 2020.- 376 с.

9. Дидович, С. В. Эффективность использования современной системы подачи шлакообразующей смеси в кристаллизатор слябовой МНЛЗ / С. В. Дидович, А. М. Столяров, Д. В. Юрченко // Наука и производство Урала. – 2015. – № 11. – С. 61 – 65.
10. Ганин, Д. Р. Механизация подачи шлакообразующих смесей в кристаллизатор МНЛЗ-2 АО «Уральская сталь» / Д. Р. Ганин, А. В. Нефедов, М. И. Мурзин // Механическое оборудование металлургических заводов. – 2017. – № 1. – С. 34 – 41.
11. Опыт проектирования и промышленного применения систем механизированной подачи шлакообразующих смесей в кристаллизаторы слябовых МНЛЗ / С. П. Еронько [и др.] // Металлург.- 2020.- № 3.- С. 51 - 57.
12. Опыт разработки и внедрения систем механизированной подачи шлакообразующих смесей в кристаллизаторы МНЛЗ / С. П. Еронько [и др.] // Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация». - 2020.- Том 76. № 10.- С. 994 – 1003.
13. Разработка и модельные испытания системы комплексной подачи порошковой проволоки и шлакообразующей смеси в кристаллизатор МНЛЗ / С. П. Еронько [и др.] // Машиноведение: сб. материалов науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов г. Донецк 24 – 25 июня 2024 г.- Донецк: ДонНТУ, 2024.- С. 19 – 25.
14. Расчет и конструирование системы механизированной подачи шлакообразующих смесей в кристаллизатор блюмовой МНЛЗ / С. П. Еронько [и др.] // Сборник научных трудов ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ».- 2021.- № 24 (67).- С. 91 – 98.
15. Физическое моделирование технических систем сталеплавильного производства: учебное пособие / С. П. Еронько [и др.]. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021.- 324 с.
16. Инновационное металлургическое оборудование. Сталеплавильное производство: учебное пособие / С. П. Еронько [и др.]. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2023.- 276 с.

Поступила в редколлегию 14.05.2025 г.

УДК 621.793.79

С. А. Матвиенко, канд. техн. наук, доц.,

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры филиал ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Макеевка, Россия

Тел./Факс: +7 (949) 3678009; E-mail: s.a.matvienko@donnasa.ru

ИННОВАЦИОННЫЙ ПОДХОД СИНТЕЗА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ КРИТИЧЕСКИХ ПО НАДЕЖНОСТИ ДЕТАЛЕЙ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

В статье рассматривается инновационный подход к синтезу технологических процессов формирования поверхностного слоя критических по надежности деталей автотранспортных средств. Предложена радиальная модель, интегрирующая мультифизические модели (Фурье, Авраמי/ЖМАК, Гука-Максвелл) с алгоритмами обучения с подкреплением (Q-learning) и ϵ -greedy для адаптивного синтеза. Включены биотехнологии (биоразлагаемые покрытия, ферментативные процессы) и анализ жизненного цикла (LCA по ISO 14040) для обеспечения экологической устойчивости. Результаты симуляций показывают улучшение свойств деталей на 20–40% по сравнению с традиционными методами.

Ключевые слова: поверхностное упрочнение, мультифизическое моделирование, обучение с подкреплением, биотехнологии, LCA, автотранспорт.

S. A. Matvienko

INNOVATIVE APPROACH TO SYNTHESIS OF TECHNOLOGICAL PROCESSES FOR FORMING THE SURFACE LAYER OF CRITICAL PARTS OF MOTOR VEHICLES

The article discusses an innovative approach to the synthesis of technological processes for forming the surface layer of critical vehicle parts. A radial model is proposed that integrates multiphysics models (Fourier, Avrami/JMAK, and Hooke-Maxwell) with reinforcement learning algorithms (Q-learning) and ϵ -greedy for adaptive synthesis. Biotechnology (biodegradable coatings, enzymatic processes) and life cycle analysis (LCA according to ISO 14040) are included to ensure environmental sustainability. Simulation results show a 20-40% improvement in part properties compared to traditional methods.

Keywords: surface hardening, multiphysical modeling, reinforcement learning, biotechnology, LCA, motor transport.

1. Введение

В условиях растущего спроса на устойчивые транспортные системы обеспечение качества критических по надежности деталей автотранспортных средств (АТС), таких как поршни, клапаны и валы дизельных двигателей, становится ключевым для снижения экологического ущерба и оптимизации ресурсов. Эти детали подвержены деградации поверхностных слоев (ПС) из-за механических нагрузок, термических циклов и коррозии. Традиционные методы формирования ПС (механическая обработка или простая термическая закалка) не адаптируются к динамическим условиям эксплуатации, приводя к преждевременному износу, снижению ресурса на 20–40% и росту отказов (>10% в транспортных системах) [1, 2]. Это усугубляет экологический ущерб и делает традиционные стратегии неэффективными для устойчивого автотранспорта.

Мультифизические процессы (теплопроводность, фазовые превращения, упругие деформации) усложняют синтез технологий, требуя интеграции данных IoT-мониторинга. Актуальность темы определяется глобальными требованиями к

повышению надежности и экологичности АТС в рамках Европейского зеленого курса (2020) и стратегий устойчивого развития [3].

Деградация ПС – это ухудшение свойств поверхности под внешними факторами (вибрации, температура), приводящее к изменению геометрии, формы или контактирующего слоя, вплоть до разрушения. Это снижает работоспособность, безопасность, эффективность и логистику АТС, вызывая ежегодные потери в миллиарды евро и экологический ущерб [1].

Литературный обзор показывает, что существующие методы оптимизации фокусируются на отдельных аспектах [4]. Метод обучения с подкреплением (RL) оптимизирует параметры производства через функцию ценности $Q(s, a)$, интегрируясь с марковскими процессами принятия решений (MDP) для баланса деградации и ресурсов [5, 6]. Для АТС MDP моделируют надежность под внешними факторами, сочетаясь с оценкой жизненного цикла (LCA по ISO 14040) для CO_2 и энергии, но фокусируются на симуляциях, а не на реальном времени (пробел: недостаток RL – моделей для *in situ* мониторинга) [7, 8]. LCA интегрирует Monte Carlo для рисков деградации (отказы под нагрузками) с мультифизикой, но редко балансирует с реальным временем (пробел: дефицит работ по деградации и LCA) [9]. IoT – системы (датчики температуры, вибраций) обеспечивают адаптивный мониторинг с ИИ для прогнозов, балансируя климат и эксплуатацию, однако не полностью интегрируют биотехнологии и LCA (пробел: отсутствие комплексных радиальных моделей) [10]. Интеграция RL с MDP, ϵ – greedy и Q – learning редко сочетается с LCA и Monte Carlo.

Цель статьи – разработка инновационного подхода синтеза технологических процессов формирования ПС критических деталей АТС, интегрирующего MDP, RL (Q – learning, ϵ – greedy), мультифизику, биотехнологии, LCA и Monte Carlo. Актуальность обусловлена ростом экологических требований (Европейский зеленый курс), необходимостью продления ресурса транспортных систем и интеграцией ИИ для предиктивного обслуживания.

2. Радиальная структурная модель синтеза техпроцесса упрочнения ПС деталей АТС

Предлагаемая модель представляет собой радиальный подход к синтезу технологических процессов формирования и упрочнения ПС критических по надежности деталей АТС. Синтез заключается в проектировании оптимального техпроцесса на основе входных параметров (материал, нагрузки, среда), целей (максимизация ресурса, минимизация экологического ущерба) и ограничений (экономика, регуляции). Модель интегрирует мультифизические аспекты (уравнение Фурье для тепловых полей, модель Avrami для фазовых превращений), методы искусственного интеллекта (MDP, RL, Q – learning), биотехнологии и LCA с учетом рисков (метод Monte Carlo).

Биотехнологии интегрируются как устойчивый компонент модели для формирования ПС, фокусируясь на биоразлагаемых покрытиях и ферментативных процессах модификации. Это снижает экологический ущерб (CO_2 – выбросы на 15–30% по LCA) и деградацию материалов, балансируя с традиционными методами (лазерная закалка, напыление). Синтез техпроцесса обеспечивает баланс деградации, экологического ущерба и ресурса с использованием IoT – мониторинга и внешних факторов.



Рисунок 1. Радиальная структурная модель анализа деградации и упрочнения ПС деталей

2. Мультифизическое моделирование. Для каждого метода решается система уравнений (Фурье + Avrami + Гука + специфические дополнения). Используются численные методы, такие как конечные разности или метод конечных элементов в SciPy.

3. Оптимизация с RL. Q – learning адаптирует параметры процесса. Состояние: уровень деградации; действие: выбор метода; награда: снижение рисков и экономия.

4. Оценка и валидация. Проводится симуляция в Python с интеграцией метода Монте-Карло для рисков.

5. Симуляция. Модель автоматически синтезирует техпроцесс по входным данным, предлагая оптимальный вариант.

Основные элементы MDP и RL:

1) Состояние (s): описание текущей ситуации (параметры материала (твёрдость, уровень деградации), режимы упрочнения (температура, давление, время), экологические метрики (CO₂ накопленный)).

2) Действие (a): выбор или корректировка процесса.

4) Награда (r): оценка действия. Положительная за улучшение, отрицательная за ухудшение. Формула:

$$r = -(w_1 \text{ деградация} + w_2 \text{ LCA} + w_3 \text{ ресурс} + w_4 \text{ риски}), \quad (1)$$

где (w_1, w_2, w_3, w_4) – весовые коэффициенты (например, 0.4, 0.3, 0.2, 0.1 для баланса).

5) Риск: вероятность сбоя (по методу Monte Carlo: $P_{\text{сбой}} = \int I(T > T_{\text{lim}}) dT$, штраф если $P_{\text{сбой}} > 0.1$).

6) Обновление Q – функции: Q – Learning обновляет таблицу значений для пар (состояние, действие):

$$Q(s, a) \leftarrow Q(s, a) + \alpha [r + \gamma_{\max} Q(s', a') - Q(s, a)], \quad (2)$$

где $\alpha = 0.1-0.3$, скорость обучения; $\gamma = 0.8-0.9$, вес будущих наград; s – текущее состояние, s' – следующее состояние, a – действие.

LCA оценивает полный жизненный цикл процесса упрочнения, включая эмиссии CO₂, энергопотребление и другие воздействия. Основная формула для суммарного экологического следа (например, в кг CO₂-эквивалента на цикл):

$$LCA = \sum_{i=1}^n (E_i \cdot F_i) + \sum_{j=1}^m (P_j \cdot G_j), \quad (3)$$

где E_i — эмиссии от этапа i (например, производство энергии для лазера), F_i – фактор воздействия (г CO₂/кВт·ч), P_j – потребление ресурса j (например, материала), G_j – фактор глобального потепления для j .

Агент RL пробует действия, получает награду, обновляет Q – функцию для выбора оптимальных стратегий в будущем. Модель автоматически синтезирует техпроцесс: вводятся входные данные, и алгоритм предлагает оптимальный вариант.

3. Алгоритм оптимизации синтеза техпроцесса формирования поверхностного слоя на основе RL

Алгоритм оптимизации синтеза технологического процесса (ТП) представляет собой адаптивный метод автоматического проектирования (синтеза) оптимального ТП формирования поверхностного слоя (ПС) деталей автотранспортных средств. Он решает мультикритериальную задачу: максимизировать ресурс компонента (например, поршня двигателя), минимизировать деградацию (износ, усталость), снизить экологический ущерб (CO₂-эмиссии) и учесть экономику (затраты на обработку). В отличие от статических методов (например, простой оптимизации по градиенту), RL делает процесс адаптивным — он учится на "опыте" из симуляций или реальных данных. В транспортных системах условия меняются (нагрузки, среда), поэтому статические модели неэффективны. RL моделирует "агента" (алгоритм), который взаимодействует со "средой" (материалом и процессом), получая награды за хорошие решения. Это основано на MDP, где состояния, действия и награды определяют политику.

Цель разработки алгоритма – оптимизировать параметры упрочнения для баланса между деградацией материалов, экологическим воздействием и ресурсоэффективностью. Ключевые преимущества: адаптивность (учитывает обратную связь от IoT – сенсоров в автомобиле) и мультикритерий (балансирует твёрдость, энергию и экологию).

Алгоритм основан на MDP с RL (Q – learning) для оптимизации ТП, интегрируя мультифизику (телоперенос по уравнению Фурье, фазовые превращения по Avrami), LCA, нормализацию данных, риски и внешние факторы (IoT-мониторинг). Агент учится выбирать действия для достижения наилучшей награды (минимизация

деградации и экологического ущерба). Алгоритм работает итеративно: моделирование физики, нормализация состояний, оценка LCA и рисков, RL-оптимизация, итерация до оптимального действия.

Блок-схема алгоритма оптимизации синтеза техпроцесса формирования поверхностного слоя на основе RL представлена на рисунке 2.

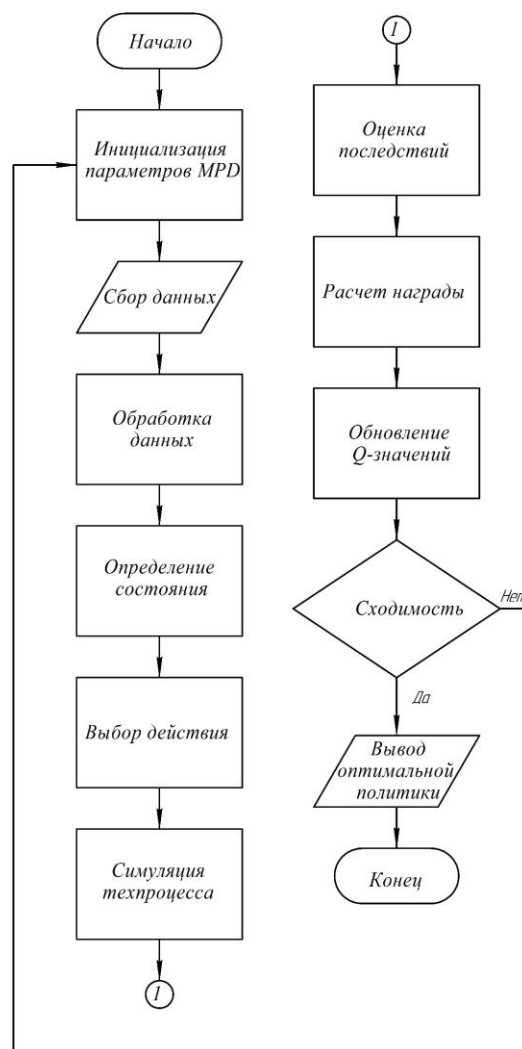


Рисунок 2. Блок-схема алгоритма оптимизации синтеза техпроцесса формирования поверхностного слоя на основе RL

Алгоритм состоит из следующих шагов:

1. Начало: инициализация.
2. Инициализация параметров MDP: настройка элементов MDP (S, A, R, Q-таблица, гиперпараметры).
3. Сбор данных: интеграция внешних данных: IoT – мониторинг (деградация, вибрации), анализ микроструктуры (фазовые превращения по Avrami), LCA (CO₂ – эмиссии, энергопотребление), ресурс (текущий износ), внешние факторы (экологические условия, нагрузки).
4. Обработка данных: нормализация для совместимости (деградация = [0,1], LCA = кг CO₂/цикл, ресурс = остаток в %); метод Monte Carlo для рисков (вероятность отказа).

5. Определение состояния: текущее состояние S (вектор: деградация, LCA, ресурс, риски).
6. Выбор действия: ϵ – greedy стратегия: с вероятностью ϵ – случайно, иначе – по максимальному Q(s,a).
7. Симуляция: моделирование применения действия.
8. Оценка последствий: расчет деградации, экологического ущерба (LCA), рисков.
9. Расчет награды: вычисление R.
10. Обновление Q-значений: применение формулы Q – learning.
11. Сходимость достигнута? Если да – выход; если нет – цикл.
12. Вывод оптимальных параметров: рекомендуемые параметры формирования ПС для каждого состояния.
13. Конец. Завершение.

4. Мультифизическое моделирование

Мультифизическое моделирование в данной работе фокусируется на лазерной закалке, популярном методе для упрочнения поверхностных слоев деталей АТС (например, валов, шестерен). Оно решает систему связанных дифференциальных уравнений, учитывая взаимодействие тепловых, фазовых и механических процессов: температура влияет на фазовые превращения, которые изменяют механические свойства (твёрдость, напряжения). Для лазерной закалки (нагрев до 800–1200°C с охлаждением $>10^3$ К/с для формирования мартенсита) это позволяет оптимизировать глубину упрочненного слоя (0.1–2 мм) и минимизировать деформации в деталях автотранспорта. Численное решение реализуется методом конечных разностей (FDM) или конечных элементов (FEM) для точного прогнозирования полей температуры, фаз и напряжений.

Математическая модель для лазерной закалки включает три связанных блока: тепловое поле, фазовые превращения и механические напряжения.

1. Тепловое поле (уравнение теплопроводности Фурье).

Основное уравнение в нестационарном режиме:

$$dT/dt = \alpha \nabla^2 T + Q / \rho c_p, \quad (4)$$

где: T – температура (°C или K), α – коэффициент температуропроводности, ∇^2 – лапласиан. Q – объёмная плотность источника тепла (Вт/м³), ρ – плотность (кг/м³), c_p – удельная теплоёмкость (Дж/(кг K)).

Коэффициент температуропроводности:

$$\alpha = k / (\rho c_p), \quad (5)$$

где k – теплопроводность (Вт/(м·K)),

В цилиндрических координатах (для осесимметричного лазерного луча, без зависимости от θ):

$$\nabla^2 = \partial^2 T / \partial r^2 + (1/r) \partial T / \partial r + \partial^2 T / \partial z^2, \quad (6)$$

Источник тепла от лазера (гауссов профиль):

$$Q(r) = (2AP / (\pi R^2 h)) \exp(-2r^2/R^2), \quad (7)$$

где A – коэффициент абсорбции (0.3–0.6), P – мощность лазера (Вт), R – радиус луча (0.1–1 мм), h – глубина проникновения.

Граничные условия:

Начальное: $T(r, z=0, t) = T_0$ (~20°C).

На краю луча: $\partial T / \partial r(R, t) = 0$ (адиабатическая граница).

Конвекция на поверхности ($z=0$):

$$-k \partial T / \partial z = h_{\text{conv}} (T - T_{\text{amb}}), \quad (8)$$

где: $h_{\text{conv}} \approx 10$ –100 Вт/(м²·К), T_{amb} – температура воздуха.

На нижней границе (z = глубина детали, >10 мм для транспортных компонентов): $\partial T / \partial z = 0$ (адиабатическая) или конвекция для моделирования теплоотвода в объём, чтобы избежать перегрева основы.

Приближённое решение для стационарного случая (плоская поверхность, точечный источник):

$$T(r) = T_0 + AP/2\pi kr, \quad (9)$$

где r – радиус от центра луча. Это позволяет оценить максимальную температуру T_{max} для избежания перегрева.

2. Фазовые превращения (модель Avrami/JMAK для аустенитизации; Koistinen – Marburger для мартенсита).

Кинетика превращения:

$$dX / dt = nk(1-X)(-\ln(1-X))^{n-1/n} \cdot f(T), \quad (10)$$

где X – доля новой фазы (X_{aus} для аустенита при нагреве >723°C; X_{mar} для мартенсита при охлаждении), $k = A \exp(-E_a/RT)$ (A – константа, E_a – активационная энергия ~200–300 кДж/моль для стали, R – газовая постоянная 8,314 Дж/(моль·К), T в К), $f(T)$ – функция температуры/охлаждения (например, для мартенсита $f(T) = 1$ при $T < M_s$ ~400–500°C), n – порядок реакции (2–4). Для лазерной закалки: аустенитизация ~0.1 с, мартенсит при скорости охлаждения.

Связь с твёрдостью:

$$H = H_0 + \Delta H \cdot X, \quad (11)$$

где H – твёрдость (HV или HRC), H_0 – исходная (~200 HV), ΔH – прирост (~400–500 HV для мартенсита). Цель для транспортных компонентов: $H=60$ –70 HRC в слое 0.5–1 мм.

3. Механические напряжения (закон Гука с учётом пластичности):

Упругий тензор:

$$\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} \epsilon_{kk} + 2\mu \epsilon_{ij}, \quad (12)$$

где σ – тензор напряжений (Па) ϵ – тензор деформаций, λ , μ – модули Ламе. Деформации от фазового перехода и термического расширения:

$$\epsilon = \beta \Delta T + \Delta V \cdot X, \quad (13)$$

где β – коэффициент линейного расширения ($\sim 10^{-5} \text{ K}^{-1}$), $\Delta V/V$ – относительный объёмный прирост при мартенсите.

Критерий разрушения: $\sigma_{\max} < \sigma_y$ (предел текучести $\sim 300\text{--}600 \text{ МПа}$).

Остаточные напряжения (приближённо, интегрируя с тепловой моделью):

$$\sigma_{\text{res}} = E\beta\Delta T(1-\nu)/(1+\nu), \quad (14)$$

где E – модуль Юнга (ГПа), ν – коэффициент Пуассона (~ 0.3).

Интеграция мультифизики: температура T влияет на параметры в JMAK, доля фазы X корректирует свойства (k , E от фазы), а ϵ и σ обновляются итеративно. В алгоритме оптимизации (RL или градиентный спуск) параметры (P , ν) минимизирует σ_{\max} при максимизации N . Численное решение: на каждом шаге t обновляем $T \rightarrow X \rightarrow \epsilon \rightarrow \sigma$.

5. Адаптация формул для газодинамического напыления и магнитной обработки

Базовые модели (Фурье для теплопереноса, Avrami/JMAK для фазовых превращений, Гука для механики) применимы ко всем методам упрочнения, но адаптируются под специфику: газодинамическое напыление (HVOF или аналог) повышает коррозионную стойкость (для шестерен АТС), магнитная обработка (импульсное намагничивание или магнитно-абразивная) снижает трение (для валов). Адаптация учитывает локальные эффекты: удары частиц в напылении, электромагнитные поля в магнитной обработке. Риски оцениваются методом Monte Carlo (варьируя параметры на $\pm 10\%$, вероятность дефектов $< 5\%$).

При адаптации для газодинамического напыления модели дополняются кинетикой осаждения и локальным нагревом от ударов частиц. Базовые уравнения: Фурье для тепла, Avrami/JMAK для фаз покрытия, Гука для напряжений в интерфейсе.

Кинетика осаждения (уравнение Бернулли для скорости частиц):

$$v \approx \sqrt{(2\Delta P/\rho)}, \quad (15)$$

где ΔP – перепад давления газа (Па), ρ – плотность частиц (кг/м^3);

Теплоперенос:

$$\partial T/\partial t = \alpha \nabla^2 T + Q, \quad (16)$$

где Q – тепловыделение от ударов (Вт/м^3).

Энергия удара на единицу времени:

$$Q(r,t) = (mv^2/2)/(V\Delta t), \quad (17)$$

где: m – масса частицы (кг), V – объём зоны удара (м^3), Δt – время контакта ($\sim 10^{-6} \text{ с}$); коэффициент преобразования энергии в тепло $\sim 0.8\text{--}0.9$).

Возможные риски: неравномерность покрытия (метод Monte Carlo: варьировать v на $\pm 10\%$, риски $< 5\%$). Энергия удара на единицу времени:

При адаптации для магнитной обработки фокус на электромагнитных эффектах: формулы Гука для механики, Avrami/JMAK для фаз в ферромагнетиках (с магнитной анизотропией), Фурье для индукционного нагрева. Дополняется уравнениями Максвелла.

Электромагнитное поле (уравнение Максвелла–Фарадея):

$$\nabla \times E = -\partial B / \partial t, \quad (18)$$

где: E — электрическое поле (В/м), B — магнитная индукция (Тл).

Влияние на напряжения:

$$\sigma = Y \varepsilon + \sigma_{\text{mag}}, \quad (19)$$

где: Y — модуль Юнга (ГПа), ε — деформация; σ_{mag} — магнитное напряжение (Па).

Фазовые превращения определяются по Avrami/JMAK с учётом магнитной анизотропии (k зависит от H — напряжённости поля (А/м)).

Возможные риски: перегрев или демагнетизация.

Интеграция в RL — алгоритм: действия включают параметры (ΔR для напыления, H для магнитной), награда учитывает покрытие/деформации и экологию.

6. Результаты моделирования и их обсуждение

В работе выполнена численная реализация в Python. Используем конечные разности (явная схема) для 1D-модели (радиальное направление r от 0 до $R=0,01$ м). Параметры: сталь ($\alpha=1 \cdot 10^{-5}$ м²/с, $k=50$ Вт/(м·К), $\rho=7800$ кг/м³, $c_p=460$ Дж/(кг·К)), лазер ($Q=1 \cdot 10^6$ Вт/м³, объемная удельная мощность для моделирования поглощения в слое толщиной 1 мм).

Результаты симуляции:

- тепловое поле: температура растёт до 900–1000 К в центре за 5 с, затем спадает;
- фазовые превращения: X достигает 0.8–0.9 в упрочнённой зоне ($r < 0,005$ м), c к адаптированным под био-ферменты (увеличение скорости на 20%);
- напряжения: σ до 200 МПа в зоне перехода; риск трещин если >300 МПа.
- интеграция с RL: в MDP состояние включает T , X , σ ; награда корректируется:

$$r = r_{\text{base}} - 0.1 \times (\sigma_{\text{max}} - 200 \cdot 10^6)^2, \quad (20)$$

Это моделирование показывает, как лазерная закалка балансирует тепло и механику для устойчивого упрочнения, с валидацией по экспериментам (ГОСТ Р 52727 для автодеталей)

Пример моделирования лазерной закалки для поршня дизельного двигателя (материал: алюминиевый сплав):

- начальное состояние: $s = [H=180 \text{ НВ}, D=0.2, T=700^\circ\text{C}, C=5 \text{ кг}]$;
- действие: Увеличить T на 100°C ($a=1$);
- расчёт (по Фурье): $T_{\text{max}} = 800^\circ\text{C}$, энергия $E_{\text{in}} = 2 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ (для 1 см^2 поверхности);
- Avrami: $X=0.8$ (упрочнение), $\Delta H=50 \text{ НВ}$;
- LCA: $\Delta C = 0.8 \text{ кг CO}_2$ (по ISO 14040, включая производство энергии);
- риск: $P_{\text{сбой}}=0.05$ (метод Monte Carlo с 1000 итерациями);
- награда: $r = 0.4 \times 50 - 0.3 \times 2 - 0.2 \times 0.8 - 0.1 \times 0.05 = 20 - 0.6 - 0.16 - 0.005 = 19.235$ (веса для ΔH (0,4), E_{in} (0,3), ΔC (0,2), $P_{\text{сбой}}$ (0,1), нормализованные по шкале 0–50);
- после обучения: Алгоритм «учится» предпочитать это действие для низкой D с ε -greedy стратегией, сходимость за 50 эпизодов;

Сравнение с традиционным методом:

- без RL: Статический выбор $T=800^{\circ}\text{C}$, награда ~ 15 ;
- с RL: Адаптивный, награда ~ 22 .

Сравнение предложенного подхода с традиционными методами представлено в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение методов (усреднённые значения по 100 симуляциям)

Метод	Износостойкость (%)	Экологический ущерб (кг CO_2 -экв.)	Риск сбоя (%)	Награда (макс.)
Традиционный (лазерная закалка)	30 ± 5	2.5 ± 0.3	15 ± 2	10 ± 1
Предложенный (с RL и биотехнологиями)	50 ± 4	1.8 ± 0.2	8 ± 1	22 ± 2
Предложенный (без биотехнологий)	45 ± 4	2.0 ± 0.3	10 ± 1.5	18 ± 1.5

Метрики: износостойкость (по Avrami, % увеличения), экологический ущерб (по LCA, кг CO_2 -экв./деталь), риск сбоя (по Monte Carlo, %), награда (нормализованная). Предложенный метод превосходит на 20–40% по всем показателям благодаря адаптивности с экологическим преимуществом 28%

7. Перспективы дальнейших исследований

Предложенный инновационный подход синтеза технологических процессов формирования поверхностного слоя на основе радиальной структурной модели открывает широкие возможности для дальнейшего развития в области материаловедения, ИИ и устойчивого транспорта с потенциалом снижения экологического следа на 30–50%. Основные направления включают: углубление мультифизического моделирования (переход к 3D FEM с учетом анизотропии материалов, оптимизация RL и MDP (интеграция с глубоким обучением для больших состояний), расширение LCA и рисков (включение полного жизненного цикла автодеталей по ISO 14044), экспериментальная валидация с IoT-мониторингом для реального времени.

8. Заключение

В данной статье представлен инновационный подход к синтезу технологических процессов формирования поверхностного слоя критических по надежности деталей автотранспортных средств, основанный на радиальной структурной модели с оригинальностью в интеграции мультифизики и ИИ. Интеграция мультифизических аспектов (уравнения Фурье, Avrami, Hooke), методов ИИ (MDP и RL с Q-learning), LCA и Monte Carlo позволяет балансировать деградацию материалов, экологический ущерб и ресурс, оптимизируя процессы упрочнения (лазерная закалка, напыление, магнитная обработка и т.п.) с учётом IoT-мониторинга для реального времени и внешних факторов. Валидация по формулам и симуляциям в Python демонстрирует корректность подхода.

ЛИТЕРАТУРА:

1. IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
2. Index IEEE Transactions on Reliability Vol. 70. (2021). IEEE Transactions on Reliability, 70(4), 1687–1706. <https://doi.org/10.1109/tr.2021.3134026>.
3. THE 17 GOALS | Sustainable Development. <https://sdgs.un.org/goals>.
4. V. Wong, W. Bauer, R. Kamo, W. Bryzik, and M. Reid Assessment of Thing Thermal Barrier Coatings for I.C. Engines, SAE Technical Paper 950980, 1995
5. Frolova E. A., Tushavin V. A., Chabanenko A. V., News of Samara scientific center of RAS, 2023, vol. 25, no. 6(116), pp. 84-91.
6. Чуновкина, А. Г. Качество технологических процессов в аддитивном приборостроении: модели машинного обучения / А. Г. Чуновкина, А. П. Ястребов, А. В. Чабаненко, М. Д. Рассыхаева // Компетентность. – 2024. - С. 46-50. DOI: 10.24412/1993-8780-2024-6-46-50.
7. Руденко, В. С. Обзор выпуклой оптимизации марковских процессов принятия решений / В. Д. Руденко, Н. Е. Юдин, А. А. Васин // Компьютерные исследования и моделирование. – 2023. - Т. 15. - № 2. - С. 329–353. DOI: 10.20537/2076-7633-2023-15-2-329-353
8. Ротова, О. М. Обучение с подкреплением: введение. / О. М. Ротова // Теория и практика современной науки. – 2020. - №1(55). - С.477-482.
9. Finnveden G. et al. (2009). "Recent developments in life cycle assessment". Journal of Environmental Management, 91(1), 1–21. DOI: 10.1016/j.jenvman.2009.06.018.
10. Wang J. et al. (2021). "IoT-based predictive maintenance in automotive industry". IEEE Transactions on Industrial Informatics, 17(5), 3421–3430. DOI: 10.1109/TII.2020.3019205.
11. Девойно, О. Г. Инновационные технологии упрочнения внутренних поверхностей деталей подвески тяжелонагруженных машин методами лазерного и высокочастотного индукционного воздействия / О. Г. Девойно, И. И. Вегера, В. Г. Залесский, В. В. Рудый, В. В. Жарский // Известия национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. - 2023. – Т 68. - №3. – С. 208-219. DOI: 10.29235/1561-8358-2023-68-3-208-219

Поступила в редколлегию 14.05.2025 г.

УДК 621.91

Е. П. Мельникова, д-р техн. наук, проф., **В. В. Быков**, канд. техн. наук, доц.,
А. Г. Абрамов

Автомобильно-дорожный институт (филиал)

ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», г. Горловка, Россия,
ДНР

Тел./Факс: +7 (949) 40-88-909; E-mail: melnikova_adi@mail.ru

ВЛИЯНИЕ СИЛ ТРЕНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ СРАБАТЫВАНИЯ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

В статье рассмотрен характер действия сил трения в прямоугольных направляющих станках токарного станка с внутренней адаптивной системой управления и его влияние на точность взаимного расположения инструмента и обрабатываемой детали. Выявлена зависимость между коэффициентом трения в направляющих обоймах резцов и точностью работы адаптивной системы управления.

Ключевые слова: токарный станок, инструмент, деталь, трение, адаптивная система управления.

E. P. Melnikova, V. V. Bykov, A. G. Abramov

EFFECT OF FRICTION FORCES ON THE EFFECTIVENESS OF THE ADAPTIVE CONTROL SYSTEM

Character of action forces friction in rectangular directing slidings of a lathe with an internal adaptive control system and its influence on accuracy of a relative positioning of the tool and a processed detail is considered. Dependence between friction factor in directing holders of cutters and accuracy of operation of the adaptive control system is revealed.

Keywords: lathe, tool, part, friction, adaptive control system.

1. Введение

Одним из методов управления точностью процесса резания является восстановление первоначальной точности взаимного расположения инструмента и обрабатываемой детали [1, 2, 3]. Это актуально при двурезцовой токарной обработке тормозных дисков автомобилей с применением токарного станка с внутренней адаптивной системой управления (АСУ). Такой станок разработан в лаборатории диагностики кафедры «Автомобильный транспорт» АДИ ДонНТУ и позволяет вести обработку поверхностей тормозных дисков непосредственно на автомобиле (рисунок 1).

Направляющие резцедержателей станка обеспечивают необходимое взаимное расположение резцов и возможность их перемещения относительно тормозного диска. Они обеспечивают взаимные возвратно-поступательные движения резцедержателей с одной степенью свободы и имеют прямоугольную форму, а действующие силы в направляющих постоянно изменяются, и определяются как составляющая силы резания и силы трения в направляющих. Скорости скольжения в направляющих определяются кинематикой и динамикой функционирования АСУ, что определяет их систему смазки и защиту от загрязнений. Наиболее существенными требованиями к направляющим являются: надежность, долговечность, ремонтпригодность, стабильность, геометрическая точность, оптимальная жесткость, минимальные силы трения.

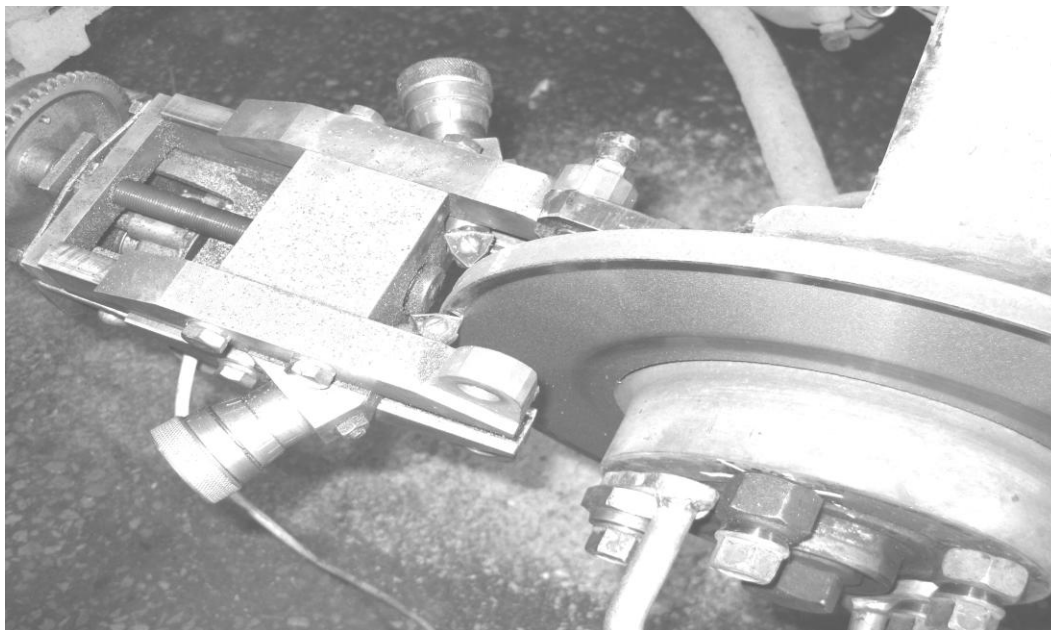


Рисунок 1. Станок для проточки тормозных дисков

В связи с этим целью исследования является изучение влияния сил трения в прямоугольных направляющих токарного станка для восстановления тормозных дисков автомобилей на точность срабатывания адаптивной системы управления.

2. Основное содержание и результаты работы

Для достижения поставленной цели рассмотрим характер действия сил трения в направляющих скольжения двурезцового токарного станка с внутренней АСУ и гидравлической системой выравнивания сил, изображенных на рисунке 2 и 3. На каждом резце, закрепленном на передних концах направляющих, действуют составляющие силы резания P_x, P_y, P_z . Полости гидроцилиндров соединены между собой. Перемещению резцедержателей препятствуют силы трения $F_{тр1}$ и $F_{тр2}$, обусловленные реакциями опор R_1 и R_2 .

Если предположить, что в начальный момент времени система находится в равновесии и силы резания, действующие на резцах одинаковы, то осевые составляющие силы резания уравниваются силами давления жидкости, действующими на поршни, силами со стороны демпфирующих пружин и силами трения. При изменении силы резания на резце нарушается равновесие, но благодаря АСУ система будет стремиться достичь нового состояния равновесия, что соответствует выравниванию осевых сил резания в результате перераспределения мгновенных подач между резцами. Однако этому препятствуют силы трения, вызывающие нарушение равновесия сил резания между собой. Таким образом, существует определенное соотношение сил резания на резце, при котором система не обеспечивает полного выравнивания сил резания. Это соотношение определяет точность срабатывания ($\gamma_{ср}$) АСУ с учетом сил трения [4].

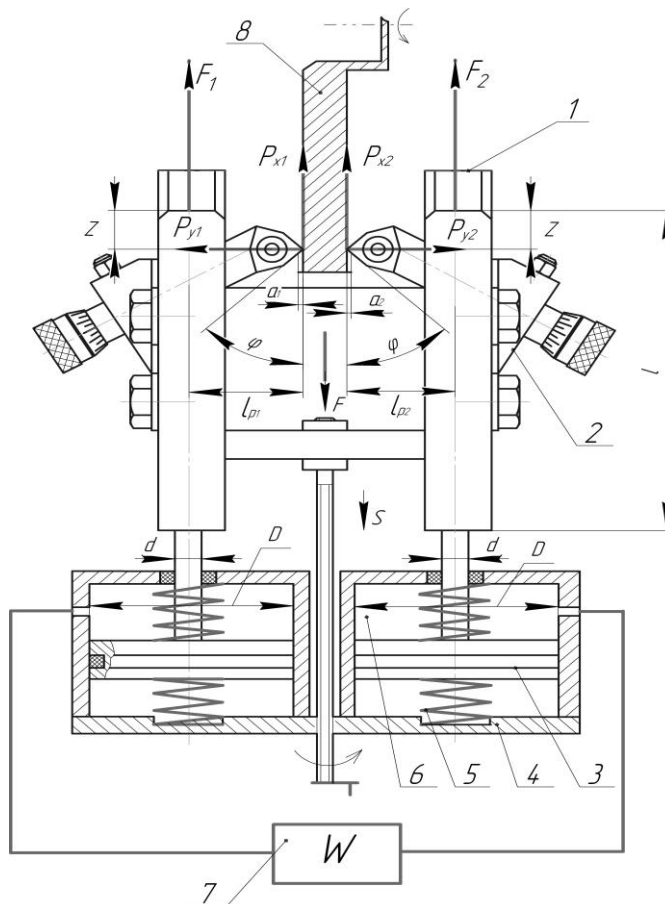


Рисунок 2. Схема действующих сил в направляющих резцедержателей:
 1 – направляющая резцедержателя; 2 – резцедержатель; 3 – поршень;
 4 – корпус; 5 – пружина; 6 – полость; 7 – функция; 8 – тормозной диск

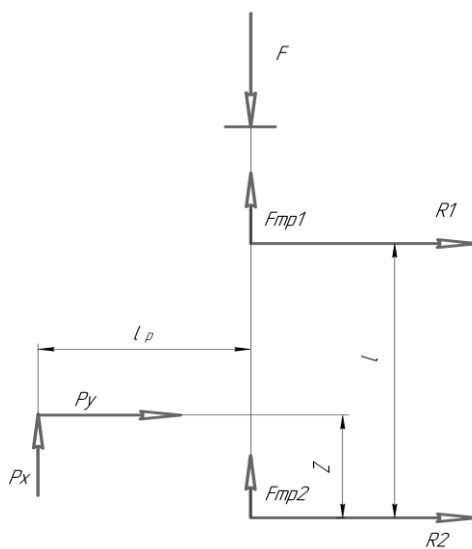


Рисунок 3. Схема действия сил

Тангенциальная составляющая силы резания в статике:

$$P_z = k_p \cdot a_c \tag{1}$$

где a_c – статическая толщина среза, k_p – коэффициент резания.

Радиальная составляющая:

$$P_y = \mu_{\text{тр}} \cdot k_p \cdot \cos \varphi \cdot a_c \quad (2)$$

Осевая составляющая:

$$P_x = \mu_{\text{тр}} \cdot k_p \cdot \sin \varphi \cdot a_c \quad (3)$$

где $\mu_{\text{тр}}$ – коэффициент трения стружки о переднюю поверхность резца,

φ – главный угол в плане.

В состоянии покоя $P_{x1} > P_{x2}$, соответственно получим систему уравнений (4):

$$\begin{aligned} P_{x1} - f_n \cdot R_{21} - f_n \cdot R_{11} - F_1 &= 0; \\ P_{x2} + f_n \cdot R_{22} + f_n \cdot R_{12} - F_2 &= 0, \end{aligned} \quad (4)$$

где f_n – максимальные значения коэффициента трения в паре резцедержатель – направляющая обоих резцов.

Отсюда получаем:

$$\begin{aligned} P_{x1} - f_n \cdot R_{21} - f_n \cdot R_{11} &= F_1; \\ P_{x2} + f_n \cdot R_{22} + f_n \cdot R_{12} &= F_2. \end{aligned} \quad (5)$$

Значения реакций опор:

$$\begin{aligned} R_{11} &= \frac{P_{x1} \cdot l_p - P_{y1} \cdot z}{l}; \\ R_{12} &= \frac{P_{x2} \cdot l_p - P_{y2} \cdot z}{l}; \\ R_{21} &= \frac{P_{y1} \cdot (l - z) - P_{x1} \cdot l_p}{l}; \\ R_{22} &= \frac{P_{y2} \cdot (l - z) - P_{x2} \cdot l_p}{l}. \end{aligned} \quad (6)$$

Силы, действующие на поршни соответственно равны:

$$F_1 = \frac{P_1 \cdot \pi \cdot (D_{1\Pi} - d_{1\text{м}})^2}{4} - c_{1n} \cdot \delta_1 + c_{11n} \cdot \delta_{11}; \quad (7)$$

$$F_2 = \frac{P_1 \cdot \pi \cdot (D_{2\Pi} - d_{2\text{м}})^2}{4} - c_{2n} \cdot \delta_2 + c_{22n} \cdot \delta_{22}, \quad (8)$$

где D_n – диаметр поршня;
 c_n – коэффициент жесткости пружин;
 d_m – диаметр штока;
 δ – начальное значение деформации пружин.

После преобразований система уравнений (5) при $k_{p1} > k_{p2}$ будет иметь вид:

$$a_c k_{p1} [\mu_{тр} \sin \varphi (1 - f_n \operatorname{ctg} \varphi - \frac{f_n l_p}{1} + \frac{f_n \operatorname{ctg} \varphi z}{1} + \frac{f_n l_p}{1} - \frac{f_n \operatorname{ctg} \varphi z}{1})] =$$

$$= \frac{P_1 \cdot \pi \cdot (D_{1п} - d_{1м})^2}{4} - c_{1n} \cdot \delta_1 + c_{11n} \delta_{11} \delta_{11} \quad (9)$$

$$a_c k_{p2} [\mu_{тр} \sin \varphi (1 + f_n \operatorname{ctg} \varphi + \frac{f_n l_p}{1} - \frac{f_n \operatorname{ctg} \varphi z}{1} - \frac{f_n l_p}{1} + \frac{f_n \operatorname{ctg} \varphi z}{1})] =$$

$$= \frac{P_1 \cdot \pi \cdot (D_{2п} - d_{2м})^2}{4} - c_{2n} \cdot \delta_2 + c_{22n} \cdot \delta_{22} \quad (10)$$

Разделив уравнение (8) на (9) находим коэффициент точности срабатывания с учетом сил трения:

$$\gamma_{ср} = \frac{P_{z1} \cdot (1 + f_n \operatorname{ctg} \varphi)}{P_{z2} \cdot (1 - f_n \operatorname{ctg} \varphi)} \quad (11)$$

Анализируя зависимость (10) приходим к выводу, что точность срабатывания внутренней АСУ зависит от коэффициентов трения f_n .

3. Заключение

В результате анализа характера действия сил трения в прямоугольных направляющих установлено, что точность срабатывания АСУ токарного станка с прямоугольными направляющими для восстановления тормозных дисков в значительной степени определяется коэффициентами трения в направляющих резцедержателях.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Патент на полезную модель №65778. Модуль для проточки тормозных дисков. № 65778. Заявлено 21.06.11; Оpubл. 12.12.2011, Бюл. №23, 2011. – 4 с.
2. Быков, В. В. Повышение долговечности тормозных дисков транспортных машин за счет совершенствования технологии механической обработки: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 «Технология машиностроения» / В.В. Быков. – Донецк, 2012. – 170 с.
3. Подураев, В. Н. Автоматически регулируемые и комбинированные процессы резания / В. Н. Подураев. – М.: Машиностроение, 1977. – 303 с.
4. Плотников А. Л. Обеспечение надежности определения режимов лезвийной обработки для автоматизированного станочного оборудования на основе оперативной информации о свойствах инструмента и детали: дис. на соискание научн. степени доктора техн. наук: спец. 05.02.07 «Технология и оборудование физико - механической обработки» / А. Л. Плотников – Саратов, 2001. – 388 с.

Поступила в редколлегию 15.05.2025 г.

УДК 621.7.01

Е. П. Мельникова¹, д-р техн. наук, проф., **Г. А. Прокопец²**, канд. техн. наук,
М. М. Чаава², канд. техн. наук.

¹Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, ДНР, Россия

²Донской государственной технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Тел./Факс: +7 (949) 40-88-909; E-mail: melnikova_adi@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ВИБРОУДАРНОЙ ОБРАБОТКИ НА КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

В статье рассматривается влияние на качество изделий одного из перспективных методов обработки поверхностным пластическим деформированием – виброударной обработки. Приводятся результаты исследования влияния амплитуды колебаний рабочей камеры и размера элементов обрабатываемой среды на изменение микротвердости среднеуглеродистых сталей после закалки, дается анализ этих результатов, приведен пример регрессионной зависимости.

Ключевые слова: качество, поверхностное пластическое деформирование, виброударная обработка, эксплуатационные свойства деталей, упрочнение, режим обработки.

E. P. Melnikova, G. A. Prokopets, M. M. Chaava

FEATURES OF THE EFFECT OF VIBRATION-PERCUSSION TREATMENT ON THE SURFACE QUALITY OF ENGINEERING PRODUCTS

The article examines the impact on the quality of products of one of the promising methods of surface plastic deformation treatment – vibration shock treatment. The results of a study of the effect of the amplitude of vibrations of the working chamber and the size of the elements of the processing medium on the change in microhardness of medium-carbon steels after quenching are presented, an analysis of these results is given, and an example of a regression relationship is given.

Keywords: quality, surface plastic deformation, vibro-impact processing, performance properties of parts, hardening, processing mode.

1. Введение

Уровень качества изделий машиностроения является самым точным и обобщающим показателем научно-технического прогресса. Целью повышения качества изделий машиностроения является как улучшение эксплуатационных свойств изделия, так и повышение его надежности, что приводит к увеличению срока его эксплуатации [1, 2].

Повышение надежности деталей машин и их узлов является одной из важнейших задач. Для ее решения имеет целый арсенал современных способов, как конструктивного, так и технологического характера. Среди перспективных технологических методов, обеспечивающих повышение надежности и долговечности изделий, особое место занимает упрочнение поверхностным пластическим деформированием (ППД). Упрочнение методами ППД успешно применяется для формирования заданных конструктором эксплуатационных свойств поверхностей в различных отраслях машиностроения, в том числе автомобилестроении, авиастроении и др.

ППД применяется для упрочнения поверхностей деталей, как с малыми габаритными размерами, так и весьма крупных размеров, изготавливаемых из различных материалов в различных структурных состояниях. Во многих случаях удается в 1,5...3 раза повысить запас прочности деталей, работающих при знакопеременных нагрузках, и соответственно в несколько раз увеличить срок их службы. Например, согласно

исследованиям Папшева Д. Д. упрочнение роликов и бандажей шаровых мельниц увеличило ресурс их работы в 2,5...8,5 раз, упрочнение дорожек качения внутренних колец увеличило долговечность роликовых и шариковых подшипников в 1,6...2,2 раза, а стойкость упрочненного режущего инструмента из вольфрамовой стали возросла в 1,7...3,5 раза [3].

При этом могут использоваться разные схемы обработки, может осуществляться как обработка всей поверхности деталей, так и адресная обработка отдельных их поверхностей и др. [4, 5, 6].

Высокая эффективность и технологичность методов ППД отводит им роль значительного резерва повышения качества изделий машиностроения [3–6]. Практика применения методов ППД подтверждает целесообразность их использования для широкой номенклатуры деталей, работающих в условиях знакопеременных нагрузок, изнашивания, действия корродирующих веществ и др. Кроме того, технологические операции, основанные на использовании ППД, характеризуются малоотходностью, а зачастую и безотходностью.

Большими достоинствами обработки ППД являются разнообразие схем обработки и, зачастую, высокая гибкость процесса. С другой стороны данные достоинства влекут за собой сложность теоретического описания протекающих процессов и необходимость значительного объема экспериментальных исследований для адаптации результатов теоретических заключений к конкретным условиям обработки. Актуальность исследований обусловлена еще и целесообразностью расширения области применения ППД в машиностроении, которая остается все еще недостаточной, а также необходимостью оптимизации процессов.

2. Основное содержание и результаты работы

Методы обработки ППД относятся к группе финишных методов. Финишные методы обработки должны окончательно сформировать требуемый уровень эксплуатационных свойств поверхностей деталей, поэтому к их результатам предъявляются повышенные требования. Исследованиям влияния ППД на эксплуатационные свойства посвящено значительное число работ. Ряд аспектов влияния ППД на эксплуатационные свойства рассмотрены в работах [1, 2, 7]. В частности, в работе [7] подробно рассмотрены вопросы оценки влияния ППД на усталостную износостойкость поверхностных слоев, а также на усталостную долговечность деталей на основе энергетического подхода, проведен глубокий анализ процесса, разработаны соответствующие модели.

Методы ППД отличаются большим разнообразием. Укрупненно их делят на статические и динамические. Вторые весьма сложны в описании и еще недостаточно изучены, в том числе с точки зрения перспектив внедрения в производство, которые представляются достаточно широкими.

Одним из перспективных динамических методов ППД, обладающих широкими технологическими возможностями и отвечающих повышенным требованиям к финишным методам обработки, является виброударная обработка (ВиУО) [8]. ВиУО в базовом варианте представляет собой стохастический динамический процесс пластического деформирования поверхностного слоя материала детали за счет нанесения по нему ударов частицами обрабатывающей среды. В качестве обрабатывающей среды обычно используются металлические тела. Наиболее распространенным видом обрабатывающей среды является совокупность несвязанных между собой стальных полированных закаленных шаров или роликов из Стали ШХ15.

При этом обработка может осуществляться с непрерывной или периодической подачей технологической жидкости (СОТС) или всухую [4]. Если обработка производится с применением СОТС, то фактически она является неотъемлемой частью обрабатывающей среды. Обрабатывающая среда вместе с обрабатываемыми деталями помещается в рабочую камеру, вибрирующую в соответствии с определенным законом.

Изучение изменения характеристик материала поверхностного слоя деталей под действием поверхностной пластической деформации в процессе ВиУО является прямым отражением процессов, протекающих в структуре материала и необходимо для выработки корректного подхода к выбору технологических параметров обработки. Например, если основной целью обработки является повышение сопротивления усталости, то это достигается в основном за счет формирования в поверхностном слое сжимающих остаточных напряжений. Хотя и формирование стохастического микрорельефа, характеризующегося отсутствием микроконцентраторов напряжений, также имеет немалое значение.

При этом на результат обработки оказывает большое влияние различных факторов, как внешних, так и внутренних, а также состояние окружающей среды. Кроме того, обрабатываемые детали изготавливаются из различных материалов, подвергаются (или не подвергаются) термической обработке, имеют различную форму и размеры и т.д. В связи с этим назначение параметров обработки только на основе данных об объекте обработки, полученном из конструкторской документации, и на обобщенных теоретических зависимостях приводит к значительным ошибкам. Что приводит к необходимости установления корректной связи между технологией обработки, структурой и свойствами материала, требуемыми параметрами качества деталей, параметрами заготовки и т.д., а это кроме подробного теоретического анализа процесса обработки требует экспериментальной проверки.

В большинстве случаев ВиУО используется для упрочняющей обработки, хоть может применяться для других целей, например формирования регулярных микрорельефов на поверхностях деталей, управления отражательной способностью поверхности и др. Под упрочнением понимают повышение свойств, характеризующих сопротивление деформации (HV , σ_B , $\sigma_{0,2}$), и снижение способности к пластической деформации в результате предварительной пластической деформации, протекающей при температурах $(0,15...0,2) \times T_{пл}$. ($T_{пл}$ – температура плавления) [9]. Таким образом, результат упрочнения может оцениваться по изменению любого из этих параметров. Однако, так как при ППД изменения в структуре происходят в тонком поверхностном слое, то в рамках поставленной задачи, целесообразно оценить результат обработки по изменению величины микротвердости поверхности и поверхностного слоя. Методики такого контроля стандартизованы.

Был проведен комплекс металлографических исследований с целью выявления влияния двух важнейших составляющих ВиУО на изменение микротвердости среднеуглеродистых сталей после закалки и низкого отпуска, а именно:

- амплитуды колебаний рабочей камеры – А;
- размера элементов обрабатывающей среды (инструмента), в данном случае – стальных закаленных полированных шаров из стали ШХ15 – D.

Такие исследования позволяют выявить связь между технологическими режимами виброударной обработки и структурными изменениями в материале детали, соответственно, качеством и эксплуатационными свойствами упрочненного слоя материала, что позволяет оценить корректность проектирования технологической операции ВиУО, а также позволяет произвести оптимизацию ее параметров (например,

амплитуды колебаний рабочей камеры) по критерию трудоемкости T , мин. Предварительный анализ литературных источников показал, что как правило, зависимость $T(A)$ носит экстремальный характер.

Экспериментальные исследования проводились на призматических образцах, закрепленных парами в струбцинах, в состоянии свободной загрузки. Микротвердость поверхности контролировалась в исходном состоянии и в процессе обработки. По результатам контроля процесса были построены графические зависимости $H_v(A)$ для трех видов обрабатываемых сред и получена регрессионная модель, описывающая изменение микротвердости от амплитуды при обработке в стальных шарах диаметром 3 мм.

При разработке методики эксперимента принимался ряд допущений, в том числе следующие:

- физико-механические свойства материала образцов по всему их объему и на поверхности одинаковые;
- шероховатость обрабатываемой поверхности носит стохастический характер и ее среднее значение одинаковое по всей плоскости обработки;
- масса загрузки однородная, скорость циркуляции массы загрузки постоянная.

Результаты некоторых исследований представлены на рисунке 1. По результатам измерений были построены графические зависимости, иллюстрирующие изменение величины микротвердости поверхности при ВиУО в зависимости от изменения амплитуды колебаний рабочей камеры. На рисунке 1 представлены три зависимости: при обработке в обрабатываемых средах стальных шаров трех размеров (шары диаметром $\varnothing 14$ мм, $\varnothing 8$ мм, $\varnothing 3$ мм).

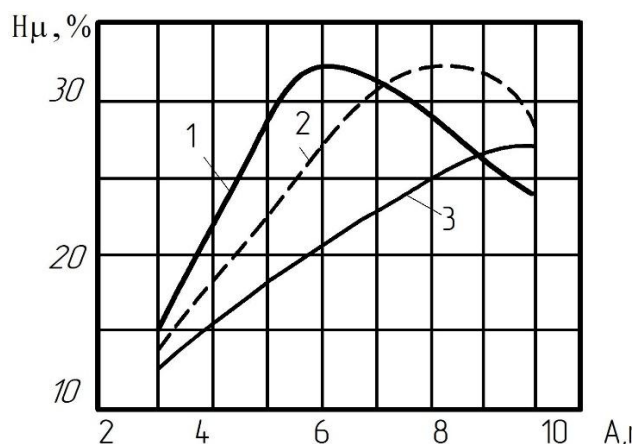


Рисунок 1. Результаты операции ВиУО: а – внешний вид обработанной поверхности; б – изменение прироста микротвердости в зависимости от амплитуды колебаний рабочей камеры при обработке в обрабатываемой среде стальных шаров диаметром: 1 – $\varnothing 14$ мм, 2 – $\varnothing 8$ мм, 3 – $\varnothing 3$ мм

Построенные графические зависимости показывают идентичность характера изменения величины микротвердости в зависимости от изменения амплитуды колебаний рабочей камеры. Форма графика подтверждает наличие глобального оптимума (максимума), расположение которого зависит от как от размера отдельной частицы обрабатываемой среды, который в значительной степени определяет ее

энергетические характеристики в момент соударения с обрабатываемой поверхностью и площадь их контакта, так и от амплитуды колебаний рабочей камеры.

Из графика можно определить величину амплитуды и размеры частиц (шаров) обрабатываемой среды, позволяющие получить максимальную величину упрочнения. Анализ зависимостей показывает, что оба параметра пригодны для использования в качестве параметра управления для формирования заданного результата обработки (требуемой степени упрочнения поверхности).

Как известно, степень упрочнения в каждый момент времени зависит от величины энергии соударения частицы рабочей среды с обрабатываемой поверхностью и кратности ее приложения. Однако, степень упрочнения зависит и от характеристик физико-механических свойств материала поверхностного слоя. Так как в исходном состоянии образцы были термообработаны (закалка + низкий отпуск), то структура материала была достаточно стабильна, но при этом материал имел достаточно высокую твердость. Именно с этим связано достаточно небольшое увеличение микротвердости: 14...21%. В результате виброударной обработки увеличивается плотность дислокаций, изменяется внутризеренная структура, возникают малоугловые границы, происходит измельчение зерен структуры материала поверхностного слоя деталей. В процессе ВиУО под действием пластической деформации увеличивается диффузионная подвижность атомов углерода, приводящая к частичному распаду мартенсита с выделением карбидной фазы. Структура становится более гомогенной, затрудняется визуализация границ между структурными составляющими. Таким образом, суммарный эффект обработки зависит от относительного вклада каждого из этих процессов и определяется следующими факторами: повышением уровня внутренней энергии материала за счет увеличения плотности дислокаций; повышением уровня поверхностной свободной энергии, связанным с появлением малоугловых границ, формированием субзеренной структуры, которые являются препятствиями для скольжения дислокаций; выделением дисперсных частиц второй фазы (карбидов), которые формируют препятствия на пути движения дислокаций. Кроме того, в результате ВиУО происходит стабилизация структуры, которая в свою очередь, обеспечивает стабильность эксплуатационных характеристик деталей в процессе их эксплуатации, что особенно важно для ответственных деталей, в том числе деталей авиастроения.

Из графика (рисунок 1б) также видно, что существует некоторая критическая величина поглощаемой материалом энергии, после которой возникает перенаклеп (разупрочнение), то есть процесс становится нецелесообразным при постановке любых задач обработки. Таким образом на основе таких исследований можно определить область определения значений режима обработки и характеристик обрабатываемой среды в условиях поставленной цели обработки.

Все экспериментальные зависимости, представленные на графике (рисунок 1б) могут быть описаны регрессионными моделями, представляющими собой полиномы третьего порядка. Например, для описания зависимости микротвердости поверхности (в единицах микротвердости $H\mu$) от амплитуды колебаний рабочей камеры A при ВиУО шарами диаметром 3 мм можно использовать регрессионную зависимость (1), дающую достоверность аппроксимации 0,997:

$$H\mu = -0.0224xA^3 + 05482xA^2 + 6.1481xA + 969.64 \quad (1)$$

По зависимости (1) можно определить необходимую амплитуду колебаний рабочей камеры для получения заданной степени упрочнения.

3. Заключение

Для дальнейшего развития и более широкого практического применения ВиУО с целью повышения качества изделий машиностроения и повышения стабильности технологической операции ВиУО требуется еще значительный объем теоретических и экспериментальных исследований. Большая сложность протекающих при ВиУО процессов и наличие комплекса взаимосвязанных механизмов формирования эксплуатационных свойств делают практически невозможным чисто теоретическое описание процесса упрочнения при ВиО. Поэтому очень большое значение имеют экспериментальные исследования. Приведенные результаты исследований показывают возможность адекватного описания процесса путем введения соответствующих коэффициентов в теоретические зависимости или разработки регрессионных моделей. Проведение экспериментальных исследований дает возможность разработки основ для решения вопросов оптимизации технологической операции упрочнения ВиАО.

Анализ возможности автоматизации процесса ВиАО показал необходимость обеспечения обратной связи для управления процессом, для поддержания стабильности режима обработки (который, как правило, определяется на основе результатов предварительно проведенных исследований) с целью обеспечения заданной степени упрочнения.

Все вышесказанное позволит обеспечить расширение области применения обработки ППД, в том числе ВиАО.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Лебедев В. А., Прокопец Г. А., Корольков Ю. В., Шишкина А. П. Технологическое обеспечение качества поверхности и эксплуатационных свойств деталей машин. Учебное пособие. Москва. Изд. Научно-издательский центр ИНФРА-М, 2024
2. Мельникова Е. П., Прокопец Г. А., Прокопец А. А. Обеспечение качества изделий на основе обоснования метода финишной обработки и ее надежности. Ж: Упрочняющие технологии и покрытия. Изд. "Инновационное Машиностроение". Т. 16, № 9. 2020 С. 427-432.
3. Папшев Д. Д. Роль ППД в научно-техническом прогрессе машиностроения. В сб. Новые технологические процессы и оборудование для поверхностной пластической обработки материалов. Всесоюзная научно-техническая конференция. Брянск, 21-23 октября 1986 г. тезисы докладов. Брянск, 1986. С.4-5.
4. Бабичев, А. П. Основы вибрационной технологии: Монография / А. П. Бабичев, И. А. Бабичев. – Ростов-на-Дону: Изд-во: ДГТУ, 2008 г.
5. Технология и инструменты отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием: [справочник]: в 2 т. – Т. 1 / общ. ред. Суслов А. Г. / Суслов А. Г., Блюменштейн В. Ю., Гуров Р. В. [и др.]. – М.: Машиностроение, 2014. – 477 с.
6. Технология и инструменты отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием: [справочник]: в 2 т. – Т.2 / общ. ред. Суслов А. Г. / Суслов А. Г., Бабичев А. П., Киричек А. В. [и др.]. – М.: Машиностроение, 2014. – 444 с.
7. Соколов В.Д., Лебедев В.В., Давыдова И.В., Ломовцев А.А. Оценка влияния

ППД на повышение эксплуатационных свойств деталей с позиций энергетического подхода. В сб. трудов по материалам международного научного симпозиума технологов-машиностроителей. (г. Ростов-на-Дону, 30 сентября – 3 октября 2015 г.). Ростов н/Д, 2015. С. 122-130.

8. Лебедев В. А., Прокопец Г. А., Мотренко П. Д., Чучукалов А. П. Виброударная отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. Глава в справочнике «Справочник по процессам поверхностного пластического деформирования» под ред. Зайдеса С. А. Изд.: Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, 2021 С. 216-234

9. Гуляев А. П. Материаловедение. М.: Металлургия, 1986.

Поступила в редколлегию 15.05.2025 г.

УДК 691.9.048.4

Н. М. Чигринова, д-р техн. наук, проф., **В. Е. Чигринов**, ст. препод.,
С. Д. Шпадарук, **П. Е. Крушная**
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь
Тел.+375-17-293-95-81, E-mail: chygrynova@ya.by

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ФОРМИРОВАНИЯ КЕРАМОПОДОБНЫХ ПОКРЫТИЙ МИКРОПЛАЗМЕННЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

В статье рассматриваются и анализируются особенности современных методов, основанных на эффекте микроплазмы, применяемых для формирования керамоподобных покрытий. Цель исследования состоит в определении преимуществ и недостатков изучаемых технологий и оптимизации выбора метода для создания функциональных и работоспособных слоев на поверхности материалов с учетом условий их эксплуатации и технологических ограничений.

Ключевые слова: активация упрочнение, электрохимическая обработка, оптимизация режимов, микродуговое окисление, противозлектрод, разнозаряженные полирадикалы, ультразвуковое поле, износостойкость, толщина покрытия, структурно-фазовый состав, анодно-катодный режим, электрохимические показатели, электролит.

N. M. Chigrinova, V. E. Chigrinov, S. Shpadaruk, P. Krushnaya

COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS FOR FORMING CERAMIC-LIKE COATINGS BY MICROPLASMA IMPACT

The article discusses and analyzes the features of modern methods based on the microplasma effect, which are used to form ceramic-like coatings. The purpose of the study is to determine the advantages and disadvantages of the technologies under study and to optimize the choice of method for creating functional and operable layers on the surface of materials, taking into account their operating conditions and technological limitations.

Keywords: activation hardening, electrochemical processing, optimization of modes, microarc oxidation, counter electrode, oppositely charged polyradicals, ultrasonic field, wear resistance, coating thickness, structural-phase composition, anodic-cathode mode, electrochemical indicators, electrolyte.

1. Введение

Как известно, покрытия на поверхности практически любых материалов могут быть получены различными методами, предпочтение среди которых ученые отдают технологиям на основе микроплазмы. Это связано с тем, что именно в процессе такой обработки обеспечивается комбинированный упрочняющий эффект, сочетающий поверхностное упрочнение материала с получением покрытий с экзотической комбинацией рабочих свойств, и надежную и глубокую проработку структуры материала под покрытием, гарантируя более длительную работоспособность изделий с такими покрытиями с минимальными технологическими и прочими ограничениями в жестких условиях эксплуатации.

Исследование проводили с учетом анализа и обобщения данных патентного поиска и работ специалистов в изучаемой области, в том числе собственных исследований по микродуговому окислению. К основным результатам относится выявление ключевых преимуществ и недостатков анализируемых методов с учетом условий эксплуатации и технологических ограничений изделий с керамоподобными покрытиями.

2. Основная часть. Микродуговое окисление (МДО)

Основным отличием одного из процессов микроплазменного воздействия на материал – процесса микродугового окисления от обычного анодирования и иных

методов обработки является использование энергии электрических разрядов, мигрирующих по обрабатываемой поверхности погруженного в электролит объекта, в результате чего формируются керамоподобные покрытия с регулируемым в широком диапазоне элементным и фазовым составом, структурой и свойствами [1, 2].

МДО близко к гальванизации, традиционно распространенной в мировом машиностроении. Гальваническое покрытие выполняется в гальванических ваннах с пропусканием электрического тока между катодом и анодом, в результате чего на обрабатываемой поверхности появляется покрытие на основе растворяемого компонента в паре металл-электрод [3]. Однако МДО и гальванический метод существенно различаются прежде всего условиями электролиза, источниками электрического тока и составами электролитов.

С точки зрения технических характеристик технологию МДО от близких по принципу реализации методов выгодно отличает:

1. Формирование покрытия с заданными свойствами, благодаря варьированию режимов обработки и состава электролита, на поверхности изделий любого профиля, включая самые сложные;
2. Нарастание покрытия происходит с высокой скоростью ориентировочно в диапазоне 1-1,5 мкм/мин;
3. Поверхность изделия не требует предварительной подготовки;
4. Экологичность процесса, поскольку в технологии не применяют опасные для производства и живой природы реагенты (серная или соляная кислоты, разнообразные щелочи в высоких концентрациях) и возможность полной автоматизации метода.

Один из существенных недостатков данной технологии – высокое энергопотребление может нивелироваться вследствие применения нового типа энергоэффективных источников питания и экономии энергии на чередования режимов обработки детали – анодного или анодно-катодного режимов). Еще одной серьезной задачей является получение равномерной по заданному участку или всей площади обработки толщины покрытия. Особенно сложно обеспечить равнотолщинность, если обрабатываемая поверхность сложно конфигурирована, но это решается через дополнительно внедренные в конструкцию установки противоэлектроды (экраны с диэлектрическими свойствами) или применения в ванне набегающего электролита на обрабатываемую деталь за счет барботажа [4].

Вообще, следует подчеркнуть, что микродуговое оксидирование (МДО) является сложным многофакторным процессом формирования керамоподобных покрытий, эффективность которого, в данном случае скорость прирастания толщины в единицу времени, и качество формируемых слоев определяется прежде всего характером и интенсивностью искрения, зависящего в свою очередь от электрических параметров оксидирования – плотности тока, соотношением катодной и анодной его составляющих, напряжением, составом и концентрацией электролита, химическим составом обрабатываемого объекта, количеством и размерами электродов.

В производственной практике МДО обычно реализуется согласно традиционной схеме (рисунок 1) с использованием специальных электролитических ванн из коррозионно-стойких сталей, в которых размещаются обрабатываемые детали и миксеры (мешалки) [5]. Гораздо реже для реализации МДО применяют ванны из неметаллических материалов, используя в качестве противоэлектродов размещенные в них пластины, решетки и спирали из коррозионностойких сталей.

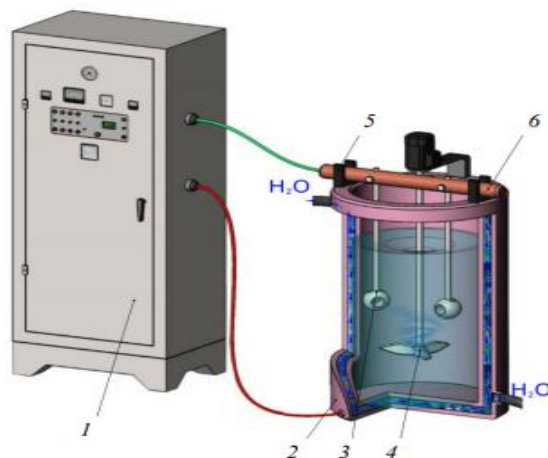


Рисунок 1. Традиционная схема реализации МДО:

1 – источник питания; 2 – электролитическая ванна; 3 – деталь; 4 – миксер; 5 – изолятор; 6 – шина

Развитие науки и техники требует разработки новых компактных и безопасных схем реализации МДО, в том числе и без традиционных электролитических ванн, обеспечивающих получение равномерных по свойствам керамикоподобных покрытий на различных поверхностях деталей, включая и труднообрабатываемые. Это возможно путем замены электролитических ванн специальными малогабаритными противоэлектродами с внутренними полостями, внутри которых может осуществляться МДО деталей в потоках растворов электролитов.

Для проверки эффективности данного подхода проведены исследования, в ходе которых детали в виде затворов шаровых кранов с диаметром сферы 30 мм и сквозным отверстием диаметром 15 мм, изготовленные из алюминиевого сплава АМг3 и титанового сплава ВТ5, были подвергнуты МДО [5, 6]. Детали такой формы были выбраны из-за компактности и наличия разных поверхностей – наружной сферической поверхности, внутренней цилиндрической поверхности и плоских поверхностей паза. МДО осуществляли с использованием комплекса технологического оборудования, включающего источник питания, резервуар для раствора электролита, расположенный вне площади производственного участка, насос и противоэлектрод, как показано на рисунке 2.

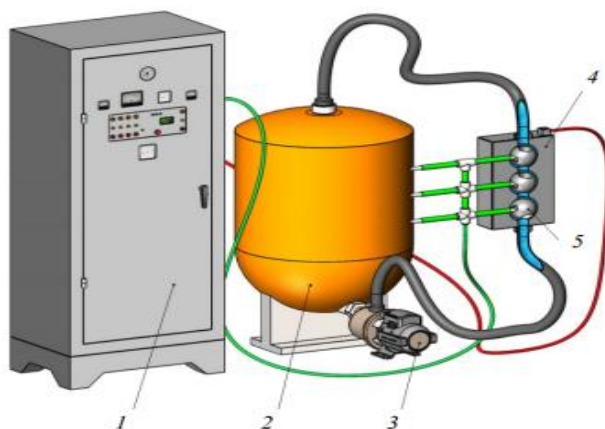


Рисунок 2. Схема реализации МДО в противоэлектродах:

1 – источник питания; 2 – резервуар; 3 – насос; 4 – противоэлектрод; 5 – деталь

В исследованиях [5, 6] было использовано несколько противэлектродов из стали 12X18Н10 с различными формами и размерами внутренних полостей. Анализ полученных данных позволил выявить, что на участках поверхностей деталей, расположенных ближе к сторонам полостей противэлектродов, от которых поступают растворы, образуются более толстые и плотные покрытия, чем на участках, которые находятся ближе к тем сторонам полостей противэлектродов, через которые удаляются растворы. Разница в толщине покрытий на одних и тех же деталях может быть очень значительной – до 13–21 %. Однако изменение направления потока растворов на противоположное спустя половину времени МДО почти полностью нивелирует эту разницу [5, 6].

На рисунке 3 показаны фотографии деталей до и после обработки МДО по традиционной и предложенной исследователями схемам.

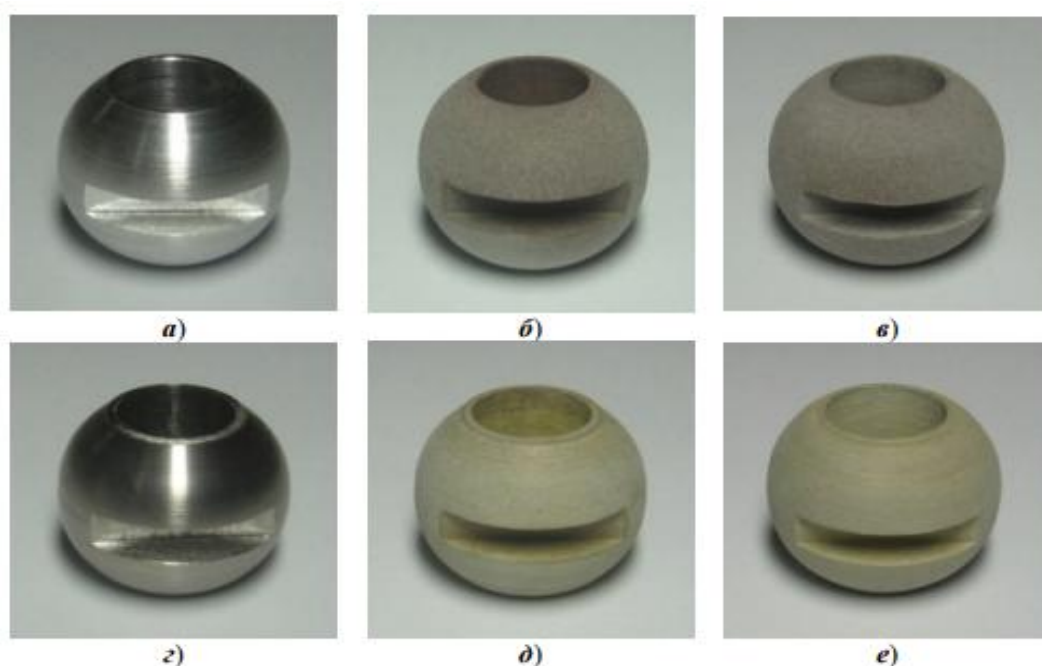


Рисунок 3. Детали из АМг3 до МДО (а), после МДО согласно традиционной схеме (б), после МДО согласно предложенной схеме (в) и детали из ВТ5 до МДО (г), после МДО согласно традиционной схеме (д), после МДО согласно предложенной в [5] схеме (е)

Результаты исследований позволяют утверждать, что МДО по схеме с противокатодами при вышеуказанных значениях параметров обработки реализуются качественные равномерные покрытия на различных поверхностях деталей из сплавов вентильных металлов.

МДО в полостях противэлектродов имеет и недостатки, к которым относятся высокая стоимость и низкая степень универсальности противэлектродов, необходимость их надежной герметизации и электроизоляции, отсутствие визуального контроля обработки. Однако предложенная разработка находит успешное применение в производственной практике в условиях серийного производства.

Следует отметить, что сегодня эксплуатация изделий с керамоподобными покрытиями, сочетающими при эксплуатации повышенные износо-, коррозионно- и теплостойкость, электроизоляционные и декоративные особенности, определяет востребованность метода МДО во всем мире в таких базовых отраслях

промышленности, как авиа-, ракето-, судо-, машино- и приборостроение, медицина, производство текстиля и металлокорда и т. п.

3. Анодное микродуговое оксидирование (АМДО).

Анодное микродуговое оксидирование (АМДО), отличается от МДО наличием только анодной составляющей тока, что обуславливает сниженную производительность процесса с получением более тонких покрытий, имеющих разветвленную поверхностную пористость. Но при этом энергопотребление ниже на 30–40 %, а наличие на поверхности МДО-покрытий до 75–80 % хрупких, не имеющих прочности и адгезии с металлом муллитных фаз практически исключается в составе АМДО-покрытий [7]. Поэтому в ряде случаев для формирования керамоподобных покрытий определенного назначения целесообразно предпочесть именно процесс АМДО, используя при этом различные варианты его модернизации.

Известно, что при проведении АМДО в силикатно-щелочном растворе плотность тока в микродуге, как правило, достигает $5000 - 6000 \text{ А/дм}^2$ [8]. Это приводит к возникновению крупных сквозных пор в виде «кратеров вулканов», создающих механические напряжения, которые вызывают появление микротрещин, соединяющих «кратеры». В дальнейшем по длине микротрещин возникают микроплазменные разряды, приводящие к появлению пор маленьких размеров. Сквозные поры и микротрещины нарушают целостность покрытия и способствуют протеканию микроплазменного процесса в течение длительного времени. При осуществлении АМДО в режиме, обеспечивающем более низкий уровень плотности тока в микродуге, удастся получить более равнотолщинные, с меньшим количеством менее крупных пор и структурных несовершенств, слои (рисунок 4) [9].

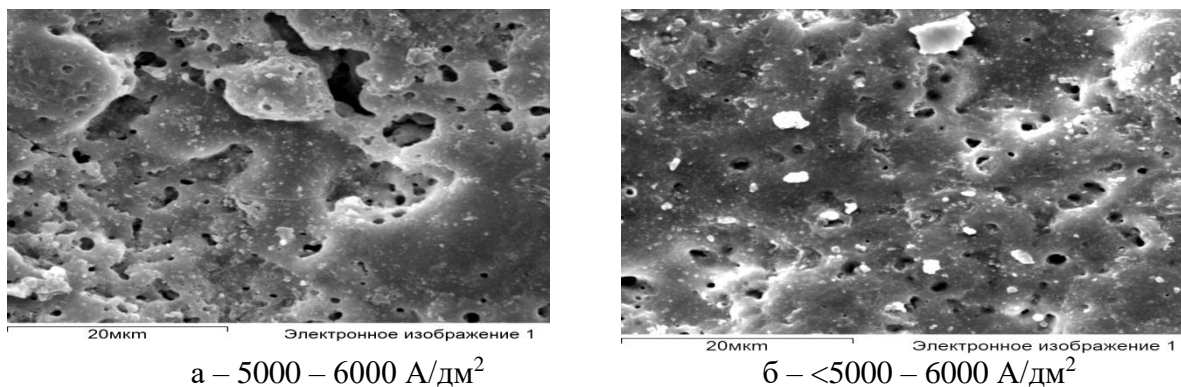


Рисунок 4. Микрорельеф и размеры пор в покрытиях, полученных методом АМДО, осуществляемом при различной плотности тока в дуге

Судя по уровню микронеровностей на поверхности созданного слоя, полученного при больших плотностях тока в микродуге, оксидирование протекает нестабильно (рисунок 5а), что не дает гарантий получения равнотолщинных с однородным рельефом поверхностей. В слоях, полученных при АМДО на более низких плотностях тока в микродуге, покрытие имеет более равномерный рельеф (рисунок 5б), но также далекий от однородности и равнотолщинности.

В [1, 10] была предложена усовершенствованная технология АМДО, позволившая минимизировать недостатки прежних вариантов процесса и получать заметно более качественные покрытия.

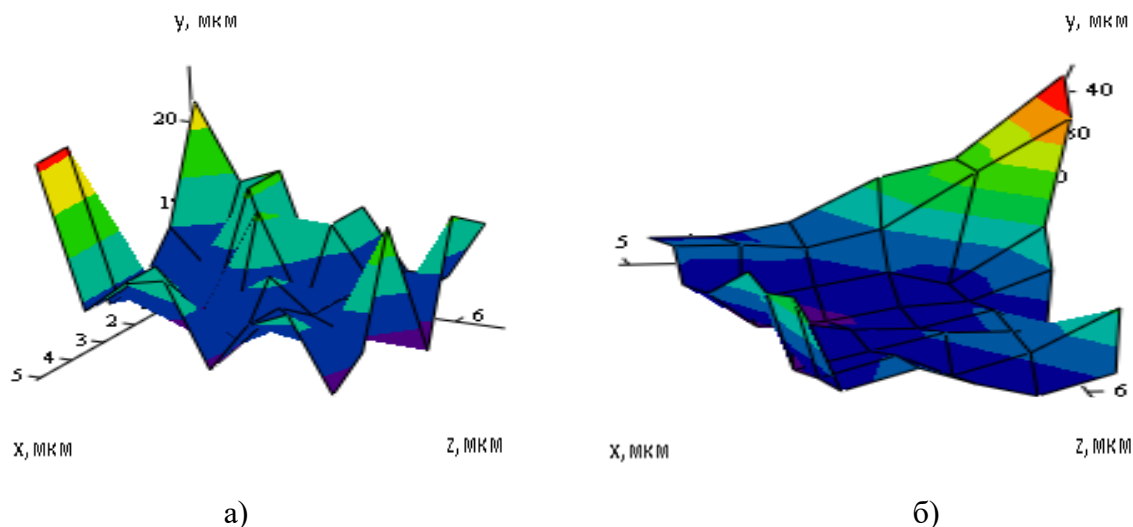


Рисунок 5. Микрогеометрия поверхности покрытия полученного методом АМДО при разных плотностях тока в микродуге

Модернизированная версия АМДО реализована за счет оптимизации рецептуры электролита посредством его насыщения дополнительными разнозаряженными ингредиентами (полирадикалами), использования дополнительного катода в электролизной ванне, пропусканием через раствор ультразвуковых колебаний [11]. Целесообразность таких видов модернизации определяется возможностью управления распределением микроразрядов по оксидируемой поверхности и, как следствие, более стабильным протеканием процесса АМДО (рисунок 6).

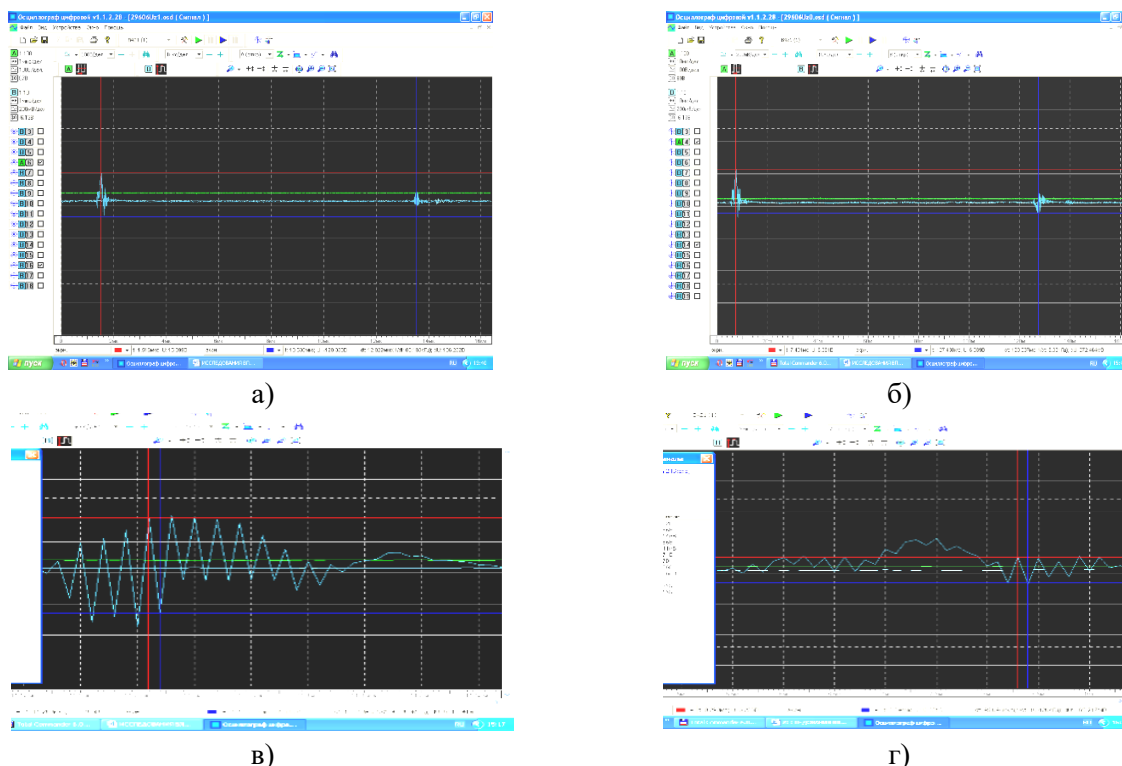


Рисунок 6. Непериодические импульсы тока (а, б) и развертка импульса (в, г) при АМДО с погруженным в электролит анодом (а, в) и без него (б, г)

Использование дополнительных катодов повышает интенсивность и плотность микроискрения на поверхности детали, приводя к получению более плотного рельефа поверхности с показателями асимметричности, не характерными для твердых и хрупких поверхностей, к которым относятся оксидные покрытия. Внесение в электролит заряженных полирадикалов увеличивает интенсивность процесса АМДО и позволяет получать более толстые покрытия [2]. Ультразвуковая интенсификация электролита [11] обеспечивает интенсификацию процесса формирования равнотолщинных покрытий повышенной плотности со сниженной шероховатостью поверхности (рисунок 7).

На рисунке 7 показана диаграмма изменения толщины керамоподобных покрытий, полученных согласно модернизированным версиям АМДО в различных электролитах: ЭШ стандартный водно-щелочной, ЭЩ 1 – с разнозаряженными полирадикалами, ЭЩ 2 – с дополнительным катодом, ЭЩ3 – с пропусканием ультразвука. В таблице приведены данные по скорости роста покрытия, энергозатратам и их соотношению.

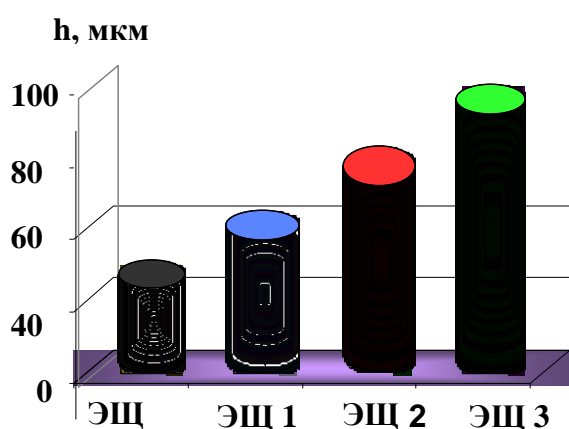


Рисунок 7. Толщина покрытий на поверхности сплава АД-0, полученных после 20 мин. АМДО в изучаемых электролитах

Таблица 1. Параметры модернизированных версий АМДО

Электролит	Скорость роста покрытия мкм/мин	Энергозатраты на образование оксида, Дж	Отношение энергозатрат ЭЩ/ЭЩ _n
ЭЩ	1,4	20299	-
ЭЩ 1	2,2	15750	1,28
ЭЩ 2	2,9	11819	1,46
ЭЩ 3	3,9	8194	2,47

4. Заключение

Анализ результатов исследований по выявлению преимуществ и недостатков микроплазмохимических технологий формирования керамоподобных покрытий с прогнозируемым набором служебных свойств посредством микродугового оксидирования и его модифицированных версий позволил заключить, что МДО и его модификации являются универсальными методами для создания таких покрытий [12]. Обоснованы предложенные критерии оптимизации выбора конкретной технологии для формирования покрытий с требуемыми функциональными характеристиками структуры и уровнем рабочих свойств. Показано, что оптимизация выбора типа процесса, основанного на эффекте микроплазмы, должна быть обусловлена систематизацией и стабилизацией условий искрения, количеством и размещением дополнительных катодов в электролизной ванне, составом электролита, схемами и режимами процесса обработки.

Показана эффективность инновационных схем МДО (например, в противоэлектродах) для обработки сложнопрофильных поверхностей.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Чигринова, Н. М. Анодное микродуговое оксидирование: проблемы, решения, перспективы / Н. М. Чигринова // Монография. – Минск, «Бестпринт». – 2019. – 299 с.
2. Чигринова, Н. М., Воробьева, Е. И. Механизмы активизации и стабилизации процесса искрения при анодном микродуговом оксидировании. / Н. М. Чигринова и др. // Межрегиональный сборник научных статей «Вестник машиностроения». – Вып.32. – 2020. – С.5–12.
3. Витязь, П. А. Теория и практика нанесения защитных покрытий / П. А. Витязь, В. С. Ивашко, А. Ф. Ильющенко. – Минск: Беларуская навука, 1998. – 583 с.
4. Патент РФ RU2681028C2 — Способ получения оксидных пленок на алюминии и его сплавах, Сайфуллин В. Х. Ахмадеев М.М., 1998-05-10.
5. Патент РФ RU2389830C2 — Способ микродугового оксидирования, Никифоров А. А. 2010-05-20.
6. Patent RU2286406C1 — Device intended for anodizing and anodizing treatment, Gurt Santanach Julien, Viola Alain, 2018-12-26.
7. Чигринова, Н. М., Чигринов, В. Е., Шпадарук, С., Крушная, П. Некоторые сведения о процессах формирования керамоподобных покрытий на изделиях из сплавов алюминия / Н. М. Чигринова и др. // 20-й Международный научно-практический семинар «Мировая экономика и бизнес-администрирование». – 2-3.10.24. С. 228.
8. Богоявленский, А. Ф. Формирование оксидных покрытий методом микродугового оксидирования в силикатно-щелочных электролитах / А. Ф. Богоявленский // Анодная защита металлов. – М., 1964. – С. 22-27.
9. Hradcovsky, R. J. Method of Coating Articles of Aluminum and Electrolytic Bath Therefor: pat. 4659440 USA, C 25 D 11/08 / R.J. Hradcovsky. – № US19850790937 19851024; publ. 21.04.87. – 1987.
10. Чигринова, Н. М., Воробьева Е. И. Основные параметры процесса и характеристики покрытий как критерии оценки эффективности метода анодного микродугового оксидирования / Н. М. Чигринова и др. // Весті Нацыянальнай Акадэміі Навук Беларусі. Известия НАН Б, серия физико-технических наук. Минск. – 2019. – Т. 64, № 4, с.419–428.
11. Чигринова, Н. М., Чигринов, В. Е. Ультразвуковая интенсификация низкотемпературного плазменного синтеза керамико-подобных покрытий вентильных металлов / Н. М. Чигринова и др. // Инженерно-физический журнал. – Т.93, № 4. – 2019. – С.1016-1022.
12. Чигринова, Н. М., Шпадарук, С. Перспективы формирования керамоподобных покрытий для работы в сложно-напряженных условиях / Н. М. Чигринова // XXI Между-народный научно-практический семинар «Мировая экономика и бизнес-администрирование», 24-25 апреля 2025 г. Международная научно-практическая конференция «Инжиниринг и инновации в промышленности» 15 мая 2025 года. Сборник материалов и докладов. – Минск. – С. 255-256.

Поступила в редколлегию 16.05.2025 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., **V. V. Okovity**, **A. A. Litvinko**, Ph. D., **T. I. Bendik**, Ph. D., **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)

Ren Pencheng, Yantai Huaheng Energy Conservation, LTD (136 15 45 13 76, 2578815835@qq.com), Yantai, People's Republic of China

RESEARCH OF PLASMA COMPOSITE COATINGS FROM OXIDE AND NICKEL BASE ALLOY

The results of a study of the influence of plasma jet parameters and the fractional composition of the initial powder on the characteristics of two-layer composite coatings based on nickel-chrome and zirconium dioxide on elements of protective screens are presented. Optimization was carried out based on obtaining the maximum powder utilization rate. A comparative analysis of the dependence of the powder utilization coefficient of viscous metal layers of nickel-chromium and nickel-aluminum on the spraying distance shows that with a similar nature of the curves of the presented dependences in absolute value, the values of the powder utilization coefficient are greater under optimal conditions for nickel-chromium powder. This can be explained by the high plasticity of the latter and, accordingly, less rebound of particles colliding with the substrate. The results of studies of the microstructure of cross sections of the formed coatings, carried out using scanning electron microscopy, are presented. The microstructures of the cross sections of the ZrO₂ coating and the Ni-Cr intermediate layer are considered. From the presented data it is clear that in the initial state the coating is characterized by porosity, with the average pore size being several micrometers and in some areas reaching 20 microns. The microstructure of the Ni-Cr layer is characterized by lower porosity. The effect of compression plasma flows on the sprayed coating leads to the formation of a remelted oxide layer 12–15 μm thick, promotes smoothing of the surface topography and the formation of cracks on the surface, propagating mainly into the depth of the coating. Treatment of oxide coatings with compression plasma also leads to a decrease in their porosity.

Keywords: plasma jet, coatings, shielding elements, ratio of powder use, plasma flows, cubic modification, zirconium dioxide

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМЕННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ОКСИДА И СПЛАВА НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ

Приведены результаты исследования влияния параметров плазменной струи и фракционного состава исходного порошка на характеристики двухслойных композиционных покрытий на основе никель-хрома и диоксида циркония на элементах защитных экранов. Проведена оптимизация на основании получения максимального коэффициента использования порошка. Сравнительный анализ зависимости коэффициента использования порошка вязких металлических слоев никель-хрома и никель-алюминия от дистанции напыления показывает, что при аналогичном характере кривых представленных зависимостей по абсолютной величине значения коэффициента использования порошка больше при оптимальных режимах для порошка никель-хрома. Это можно объяснить высокой пластичностью последнего и соответственно меньшим отскоком соударяющихся с подложкой частиц. Приведены результаты исследований микроструктуры поперечных сечений сформированных покрытий, выполненных с использованием растровой электронной микроскопии. Рассмотрены микроструктуры поперечных сечений покрытия ZrO₂ и промежуточного слоя Ni-Cr. Из представленных данных видно, что в исходном состоянии покрытие характеризуется пористостью, причем средний размер пор составляет несколько микрон и в некоторых областях достигает 20 мкм. Микроструктура слоя

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

Ni–Cr характеризуется меньшей пористостью. Воздействие на напыленное покрытие компрессионных плазменных потоков приводит к формированию переплавленного слоя оксида толщиной 12–15 мкм, способствует сглаживанию рельефа поверхности и образованию на поверхности трещин, распространяющихся преимущественно в глубину покрытия. Обработка оксидных покрытий компрессионной плазмой приводит также к снижению их пористости.

Ключевые слова: плазменная струя, покрытия, элементы защитных экранов, коэффициент использования порошка, плазменные потоки, кубическая модификация, диоксид циркония.

1 Introduction

When considering the performance characteristics of screen coatings that protect objects from damage under high-energy impacts, one of the most important indicators is the level of absorption of the kinetic energy of meteoric particles by the coating material. Without touching on all the mechanisms of energy absorption, we point out that a significant part of it is spent on elastic and plastic deformation of the coating material. Significant factors influencing the increase in the durability of such coatings are high ductility and viscosity. An increase in hardness sharply reduces ductility and toughness, leading to brittle fracture. The most commonly used structural materials for anti-meteor screens are aluminum alloys, titanium, and steel. Multilayer structures with a hard ceramic front layer and a sublayer of viscous metal material exhibit higher impact resistance. To obtain the front ceramic layer of antimeteorite coatings, oxide compositions, including those based on zirconium dioxide, are most often used [1-5]. This is due to a number of its properties: a relatively high coefficient of linear thermal expansion and the ability to provide high mechanical properties of strengthened ceramics, in particular impact strength. The main requirement for ensuring the effective operation of such protective elements is that they allow a significant reduction in the kinetic energy of incoming microparticles, while maintaining the stability of their structure. Based on this, it is proposed to form composite coatings based on zirconium oxide with the preliminary deposition of a transitional viscous sublayer based on metals, firstly, which increases the adhesive strength of the formed coating to the substrate, and secondly, which has visco-plastic properties different from those of the external coating [6-11], which leads to a significant slowdown of passing microparticles. At the same time, to increase the strength of the surface layer of the coating, which primarily interacts with the incident microparticle, it is proposed to treat it with compression plasma flows with energies that ensure melting of the surface layer. In this case, due to processes associated with rapid crystallization of the melt, the formation of a fine-crystalline structure with enhanced mechanical properties is expected. The structural-phase state of the near-surface modified layer can also be controlled by the parameters of the compression-plasma effect itself, in particular the absorbed energy density, the gas pressure of the residual atmosphere, the number of successive impact pulses, etc. To identify the features of the redistribution of elements in the coating and changes in their phase composition after exposure to compression plasma flows, the methods of X-ray spectral microanalysis and X-ray structural analysis were used. To study the microstructure of coatings after exposure to compression plasma flows, the method of scanning electron microscopy was used.

2 Methodology

In order to increase the strength of the surface ceramic layer of the coating, which primarily interacts with the incident microparticle, the work proposes to treat it with compression plasma flows with energies that ensure melting of the near-surface layer. It is assumed that as a result of such modification, due to processes associated with high-speed crystallization of the melt, a fine-crystalline structure with enhanced mechanical properties will be formed. The structural-phase state of the near-surface modified layer was regulated by

the parameters of the compression-plasma effect itself, in particular, the absorbed energy density, the gas pressure of the residual atmosphere, the number of successive impact pulses, etc. Optimization of sputtering of the NiCr-based sublayer was carried out according to the method described in the sources [12]. Studies of the microstructure of the cross sections of the formed coatings were carried out using scanning electron microscopy (SEM).

3 Results and discussion

During the plasma spraying process, a large number of factors influence the properties of the resulting coatings. The most important of them, all other things being equal, are: the flow rate of the plasma-forming and transport gases, the flow rate of the sprayed powder, the electric arc current (input power), the spraying distance, and the speed of the substrate [12]. At the first stage, the process of deposition of a viscous metal layer based on nickel-chromium was optimized based on obtaining the maximum utilization rate of the material. Initially, the powder utilization factor (PUF) was determined at different current values (300 - 650 A, with an interval of 50 A) and plasma gas (nitrogen) flow rates R_{N_2} (45; 50; 55) l/min, but with a constant spraying distance $L = 110$ mm (Figure 1). At the next stage, the optimal values of the spraying distance were determined with constant current values and plasma gas flow rates ($I=550$ A; $R_{N_2}=50$ l/min) for different powder fractions (Figure 2). It is obvious that an increase in the current strength and the flow rate of the plasma-forming gas (Figure 1) to certain values leads to an increase in the instrumentation factor, because these parameters affect the degree of powder penetration [1-4]. Their further increase leads to the fact that the particles overheat and when they hit the substrate, they splash, therefore, the instrumentation factor decreases. As the N_2 flow rate increases, the current values for the maximum instrumentation decrease. A similar trend persists when changing the spraying distance (Fig. 2) when optimizing the flow rate N_2 and current (in our case, $R_{N_2} = 50$ l/min, $I = 550$ A). At short deposition distances, the particle does not have time to heat up sufficiently and reaches the substrate with a temperature $<tra$. The maximum PUF is observed at $L = 110$ mm; a further increase in the spraying distance leads to the fact that the particle, due to its long stay in the jet, melts and splashes when it hits the substrate, and accordingly the PI drops [5]. Thus, at optimal conditions for NiCr (nitrogen plasma gas flow rate - 50 l/min, current strength - 550A, spraying distance -110 mm, powder fraction 40-63 microns, powder consumption 4.5 kg/hour) coatings with maximum Instrumentation and control - 85%.

The next step was to optimize the process of applying a hard layer based on zirconium dioxide. Figures 3-4 show the dependences of the utilization factor of the sprayed powder (UCP, %) based on zirconium dioxide during plasma spraying onto a nickel-chrome sublayer from the above spraying conditions. The dependence of the instrumentation factor, % on the spraying distance is shown in Figure 3.

At short deposition distances, the particle does not have time to heat up sufficiently and reaches the substrate with a temperature $<tra$. In our case, the IPC increases to $L=100$ mm for ZrO_2 powders with a fraction <50 μm and to $L=110$ mm with a fraction of 50-63 μm ; a further increase in the spraying distance leads to the fact that the particle melts due to its long stay in the jet and when it hits the substrate, it splashes, and accordingly the instrument falls [5]. An increase in the current and flow rate of the plasma-forming gas to certain values (Figure 4) leads to an increase in the instrumentation factor, because these parameters affect the degree of powder penetration [1-4]. Their further increase leads to the fact that the particles overheat and when they hit the substrate, they splash, therefore, the instrumentation factor decreases. As the N_2 flow rate increases, the current values for the maximum instrumentation decrease.

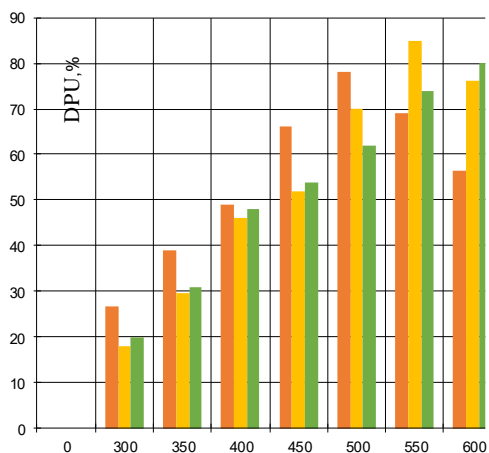


Figure 1. Dependence of the powder utilization coefficient on the electric arc current for NiCr powders with different flow rates of plasma-forming gas R_{N_2} , l/min: 1 – 55; 2 – 50; 3 – 45 ($L = 110$ mm; $R_{pore} = 4.5$ kg/h; powder fraction 40–63 μm)

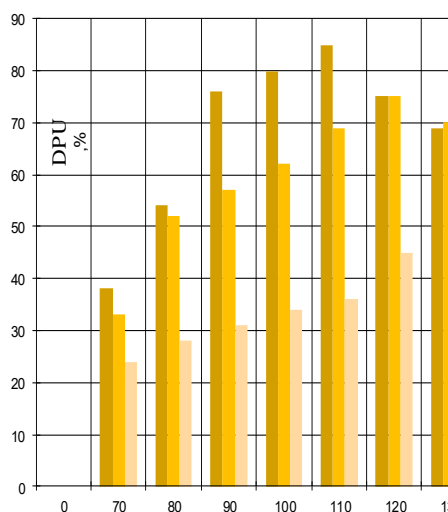


Figure 2. Dependence of the powder utilization coefficient on the spraying distance for NiCr powders with fraction: 1 – 40–63 μm ; 2 – 63–100 μm ; 3 – 100–160 μm ($I = 550$ A; $R_{N_2} = 50$ l/min; $R_{pore} = 4.5$ kg/h)

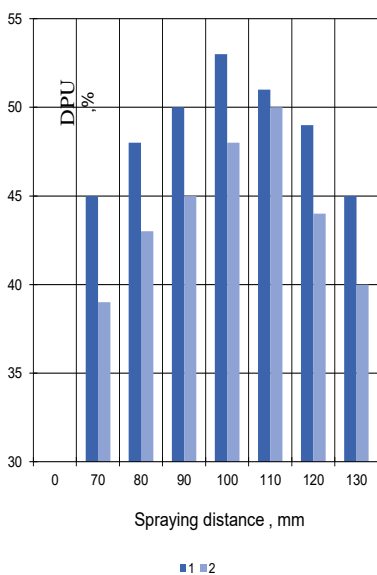


Figure 3. Dependence of the powder utilization coefficient on the spraying distance for ZrO_2 powders with fraction: 1 – less than 50 microns; 2 – 50–63 μm ($I=500$ A; $R_{N_2}=50$ l/min; $R_{pore}=4.5$ kg/h)

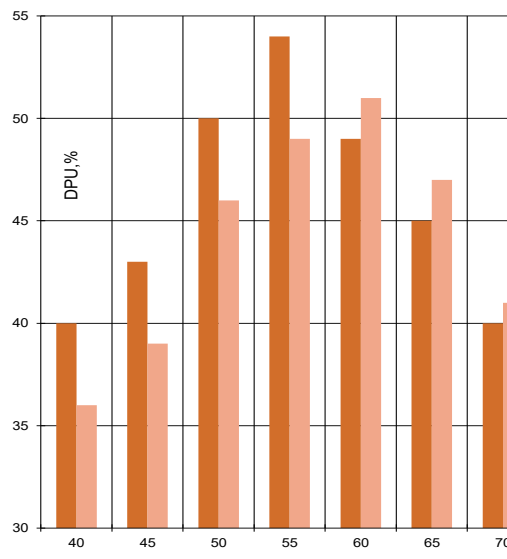


Figure 4. Dependence of the powder utilization factor on the consumption of plasma-forming gas N_2 for ZrO_2 powders with a fraction: 1 – less than 50 microns; 2 – 50–63 μm ($L=100$ mm; $I=500$ A; $R_{pore}=4.5$ kg/h)

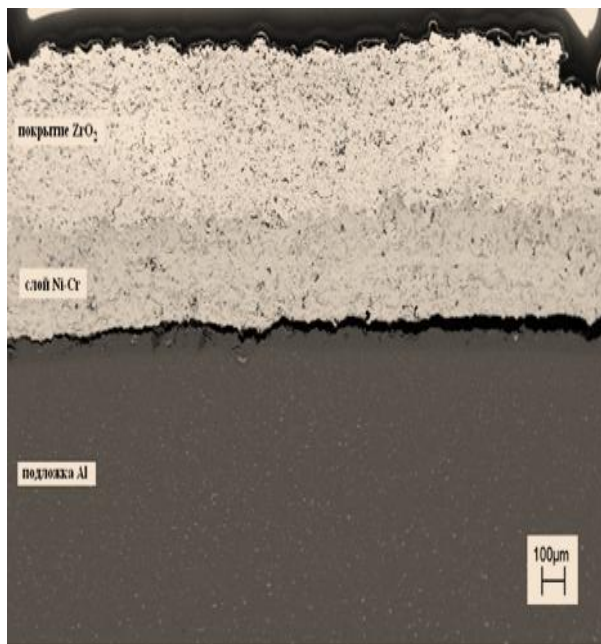


Figure 5. Scanning electron microscopy (SEM) image of a cross-section of the coating before exposure to compression plasma flows

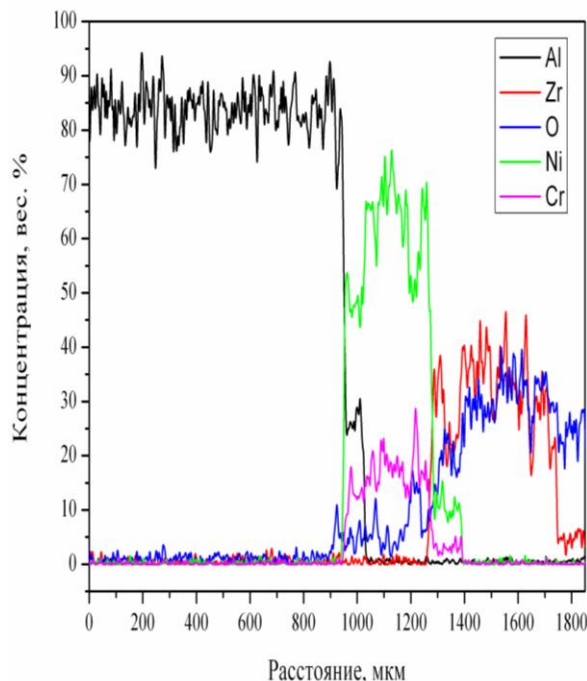
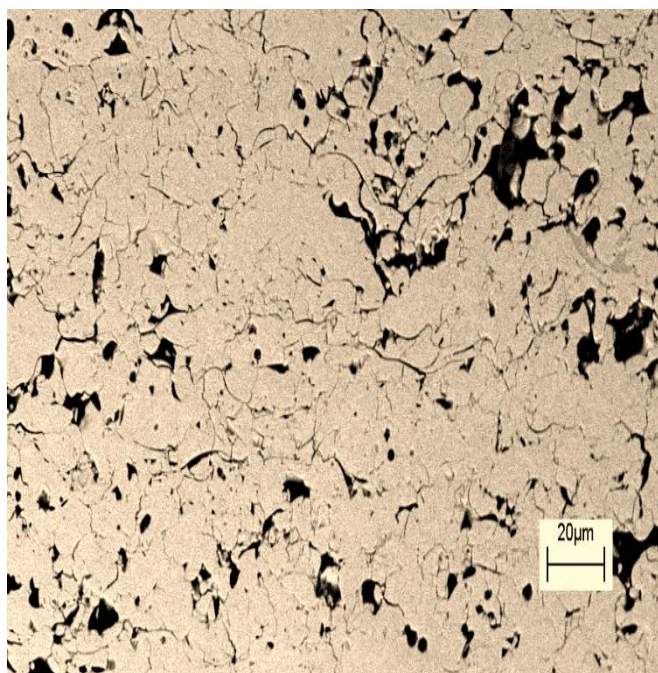
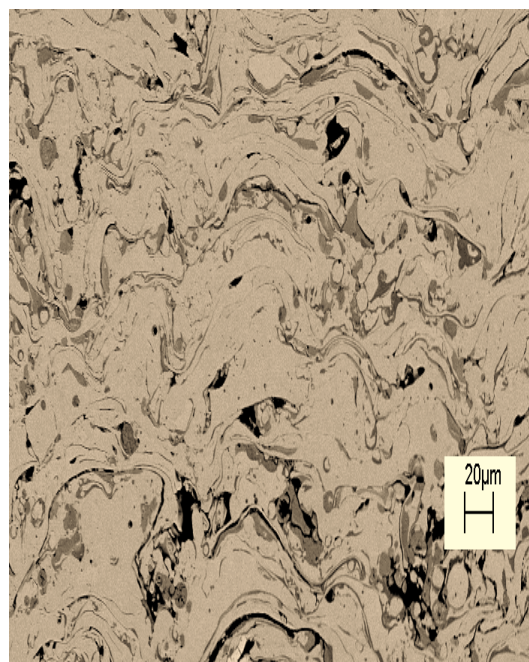


Figure 6. SEM image and distribution of characteristic X-ray radiation of elements along a selected line on a transverse section of the coating



a



b

Figure 7. SEM image of the microstructure of the zirconium dioxide coating (a) and the Ni-Cr intermediate layer (b) on a transverse section

For $RN2=55$ l/min, maximum instrumentation factor=56% corresponds to $I=600$ A, for $RN2=50$ l/min maximum instrumentation factor=54% corresponds to $I=650$ A. The results

of studying the microstructure of the cross sections of the formed coatings are presented in Figure 5. From the presented data it can be seen that the thickness of the ZrO₂ coating is about 800 μm. Between the coating based on zirconium oxide ZrO₂, the image revealed the presence of an intermediate sublayer, the thickness and elemental composition of which were studied using X-ray microanalysis. The results presented in Figure 6 indicate that the sublayer thickness is about 450 μm. Elemental analysis revealed that the sublayer consists of nickel and chromium. Figure 7 shows SEM images of the microstructure of cross sections of the ZrO₂ coating and the Ni-Cr intermediate layer. From the presented data it is clear that in the initial state the coating is characterized by porosity, with the average pore size being several micrometers, and in some areas reaching 20 microns. The microstructure of the Ni-Cr layer is characterized by less porosity.

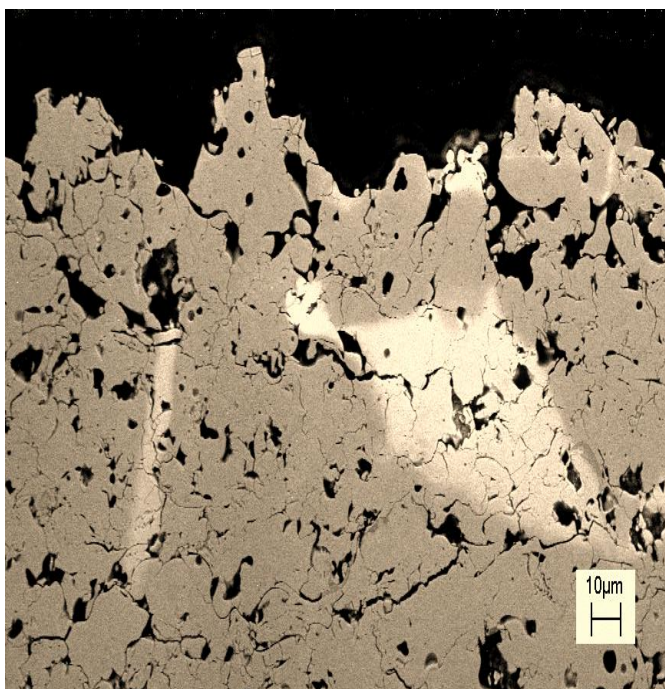


Figure 8. SEM image of the surface layer of the coating before exposure to compression plasma flows (cross section)

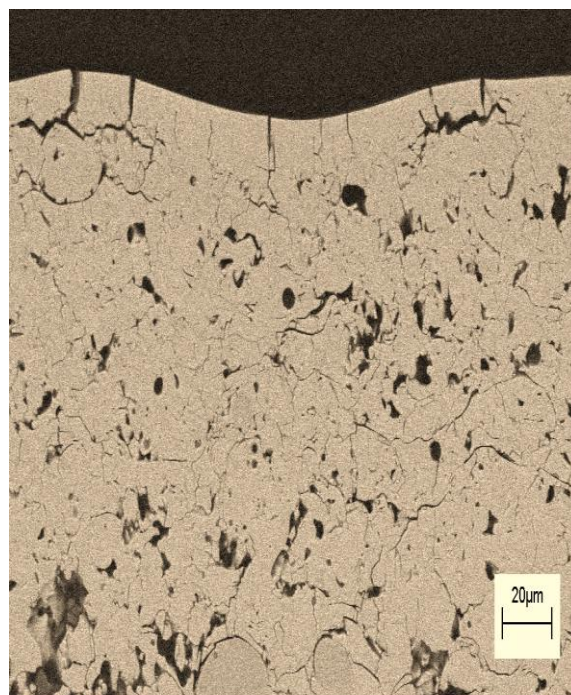


Figure 9. SEM images of a cross-section of the coating after exposure to compression plasma flows at different magnifications

Figure 8 shows a SEM image of the surface layer of the coatings obtained on a transverse section before exposure to compression plasma flows. The data obtained show that in the initial state, the near-surface layer is characterized by the presence of a large number of microcracks extending both along the surface and in depth. After exposure of the coating to compression plasma flows, the surface is smoothed, as evidenced by the SEM image of the transverse section shown in Figure 9. Analysis of the obtained SEM images showed that the number of microcracks and pores in the near-surface modified layer of the coatings is significantly reduced. This may result in melting of the near-surface layer and its crystallization from the melt. Nevertheless, some number of microcracks are present due to high-speed cooling of the crystallized layer. However, these microcracks extend mainly into the depth of the coating, which may prevent peeling off of parts of the coatings during mechanical action. Based on the presence of cracks extending into the sample, it is possible to determine the thickness of the molten layer, which is 12–15 μm.

4 Conclusion

1. Optimization of plasma spraying of two-layer composite coatings based on nickel-chromium and zirconium dioxide on elements of protective screens was carried out based on obtaining the maximum coefficient of powder utilization. Studies have been carried out of the influence of plasma jet parameters (current, spraying distance, consumption of plasma-forming gas nitrogen), the fractional composition of the initial powder on the characteristics of coatings. A comparative analysis of the dependence of the powder utilization coefficient of viscous metal layers of nickel-chromium and nickel-aluminum on the spraying distance shows that with a similar nature of the curves of the presented dependences in absolute value, the values of the powder utilization coefficient are greater under optimal conditions for nickel-chromium powder. This can be explained by the higher plasticity of the latter and, accordingly, less rebound of particles colliding with the substrate.

2. The results of studies of the microstructure of the cross sections of the formed coatings, carried out using scanning electron microscopy, showed that the sprayed structure is a coating based on zirconium dioxide ZrO_2 with a coating thickness of approximately 800 microns. Between the coating and the aluminum alloy substrate there is a transitional viscous layer of Ni-Cr transition metals, the thickness of which is 450 μm . The effect of compression plasma flows on the coating leads to the formation of a remelted oxide layer with a thickness of about 12–15 microns, promotes smoothing of the surface topography and the formation of cracks on the surface, propagating mainly into the depth of the coating. Treatment of oxide coatings with compression plasma also leads to a decrease in their porosity.

LITERATURE:

1. Panteleenko, F. I. Optimization of ceramic plasma coating deposition process model elements Screen protivometeoroy protection / Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G., Astashinsky V. A. // Proceedings of International Scientific and Technical Conference "Mechanical Engineering and Technosphere of the 21st century", 15-20 September 2014, Sevastopol, v.2, s.123-127.

2. Devoino, O. G. Plasma thermal protective coating based on zirconium oxide with high thermal stability / Devoino O. G., Okovitogo V. V. // "Science and Technology", National Technical University - Minsk, 2014.-Vyp.6.- S.3-10.

3. Panteleenko, F. I. The development of plasma application technology of composite coatings based on zirconium dioxide systems for spacecraft / Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G., Astashinsky V. M., Okovity V. V., Sobolewski S. B. // "Science and Technology", National Technical University - Minsk, 2015.-Vyp.3.- S.5-9.

4. Okovity, V. V. Selecting oxide to stabilize the zirconia in the preparation of thermal barrier coatings units / V. V. Okovity // "Science and Technology", National Technical University - Minsk, 2015.-Vyp.5.- S.26-32.

5. Devoino, O. G. The high-energy treatment of plasma coatings based on zirconium dioxide / Devoino O. G., Okovity V. V. // Proceedings of the international scientific-technical conference "Innovations in engineering." Kemerovo, 2015.C.332-335.

6. Kudinov V. V. Coating Plasma / V. V. Kudinov, PY Peck shev, V. E. Belashchenko, O. P. Solonenko // Moscow, 1990. - 244 p.

7. Antsiferov, V. N. Thermal coatings. Ekaterinburg, 1994. - 324

8. Kupriyanov, IL Thermal coatings with high adhesion strength. MN, 1990. -. 254.

9. Kulik, AJ Gas thermal spraying composite powders / A. Y. Kulik, Y. S. Borisov, A. S. Mnukhin, M. D. Nikitin. M., 1985. - 261 p.

10. Pyuschenko, A. F. Thermal barrier coatings based on ZrO₂ / Al₂O₃ // Yushchenko, V. S. Iwashko, V. A. Okovity, S. B. Sobolevskiy.- Minsk Remick, 1998.- 128 p.

11. Akishin, AI Space Materials. Teaching and learning posobie.- M: SINP, 2007, p. 209.

12. Okovity, V. A. Formation and research of multi-layer composite of oxide coatings on plasma screen protivometeorной protection elements "for the international scientific and technical journal / Okovity V. A. Panteleenko F. I., Devoino O. G. Okovity V.V., Astashinsky V. M. Hramtsov P. P., Cernik M. Y., Corners V. V. Sobolewski S. B. // "Science and Technology" National Technical University, 2016.- Vyp.5.- S.357-364

Поступила в редколлегию 15.05.2025 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**, Ph. D., **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)

Ren Pencheng, Yantai Huaheng Energy Conservation, LTD (136 15 45 13 76, 2578815835@qq.com), Yantai, People's Republic of China

DEVELOPMENT FOR PLASMA SPRAYING OF COMPOSITE MATERIAL BASED ON OXIDE CERAMICS

The results of a study of powders of the following composition are presented: $Al_2O_3+30\%TiO_2+12.5\%MoS_2$; $Al_2O_3+30\%TiO_2+12.5\%CaF_2$. To obtain these compositions, the following dispersed materials were used: titanium PTM grade, aluminum oxide EBM-40, molybdenum disulfide MoS_2 or calcium fluoride CaF_2 . The synthesis of the compositions was carried out in a reactor in the self-propagation mode without supplying energy from an external source, in a nitrogen-oxygen environment with an oxygen content of 10 to 25 wt.% and a pressure of 0.1-0.9 MPa, which is necessary for the powder oxidation reaction titanium. For spheroidization, particles of the resulting composite powder were introduced into a plasma jet and sprayed into a steel cylinder 1 m long filled with argon. The coatings were applied using an APS air plasma spraying installation from Plasma-Tekhnik AG. The disadvantage of carbide ceramics with solid lubricant inclusions is high thermal dissociation during plasma spraying. During flight in a plasma jet, carbide ceramic particles are prone to loss of stability with a change in chemical composition, which leads to a high coefficient of friction for coatings and negatively affects their performance properties. A composite ceramic material based on oxide ceramics with the addition of a solid lubricant, obtained by the method of self-propagating high-temperature synthesis, has good technological characteristics, is resistant to maintaining the chemical composition during plasma spraying and is capable of forming coatings with high wear resistance and low coefficient friction.

Keywords: composite material, use of SHS powders, oxide ceramics, plasma spraying, coatings, durability and reliability, heating rate of powder parts.

Ф. И. Пантелеенко, В. А. Оковитый, О. Г. Девойно, В. В. Оковитый, А. А. Литвинко, В. Ю. Серед, В. М. Асташинский, Рэн Пенчен

РАЗРАБОТКА ДЛЯ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ОКСИДНОЙ КЕРАМИКИ

Приведены результаты исследования порошков следующего состава: $Al_2O_3+30\%TiO_2+12,5\%MoS_2$; $Al_2O_3+30\%TiO_2+12,5\%CaF_2$. Для получения указанных композиций использовались следующие дисперсные материалы: титан марки ПТМ, оксид алюминия марки ЭБМ-40, дисульфид молибдена MoS_2 или фтористый кальций CaF_2 .

Синтез композиций осуществлялся в реакторе в режиме самораспространения без подвода энергии от внешнего источника, в азотно-кислородной среде при содержании кислорода от 10 до 25 мас.% и давлении 0,1-0,9 МПа, которая необходима для проведения реакции окисления порошка титана. Для сфероидизации частицы полученного композиционного порошка вводили в плазменную струю и производили их распыление в стальной цилиндр, длиной 1 м, заполненный аргоном. Покрытия наносили на установке плазменного напыления на воздухе APS фирмы "Плазма-Техник АГ". Недостатком карбидной керамики с включениями твердой смазки, является высокая термическая диссоциация в процессе плазменного напыления. В период полета в плазменной струе частицы карбидной керамики склонны к потере устойчивости с изменением химического состава, что приводит к получению высокого коэффициента трения покрытий и негативно отражается на их эксплуатационных свойствах. Композиционный керамический материал на основе оксидной керамики с добавлением твердой смазки, полученный методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, обладает хорошими технологическими характери-

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

стиками, устойчив к поддержанию химического состава в процессе плазменного напыления и способен формировать покрытия с высокой износостойкостью и низким коэффициентом трения.

Ключевые слова: композиционный материал, применение СВС – порошков, оксидная керамика, плазменное напыления, покрытия, долговечность и надежность, скорость нагрева порошковых части.

1. Introduction

Containing solid lubricants for application to wear surfaces of parts by plasma spraying and subsequent treatment with highly concentrated energy flows, should provide regulation of structure formation and the production of wear-resistant surface layers of coatings in combination with increased cohesive and adhesive strength of the sawn material. To do this, when developing the scientific foundations and technological principles of applying such coatings, the processes and mechanism of synthesis of initial composite powders, the processes and mechanism of formation of coatings during plasma spraying of compositions and subsequent exposure to highly concentrated energy flows should be taken into account [1-3]. The mechanism for strengthening coatings sawn and treated with highly concentrated energy flows should take into account the possibility of regulating the fine structure of the applied compositions, including for the production of amorphous phases. Based on the results of the research, it is necessary to optimize the technological parameters for applying the coatings being developed. When studying the processes of friction and wear of coatings obtained using optimal technology, their antifriction properties and wear resistance under friction conditions with marginal (imperfect) lubrication or in the absence of a lubricant, at increased contact loads and temperatures, should be studied. The mentioned friction conditions correspond to the operating modes of a wide range of tribocouplings (heavy-loaded friction pairs of internal combustion engines, pumps, metallurgical and other equipment). Successful preliminary experiments on the synthesis of composite powders with solid lubricant inclusions show that there is a fundamental possibility of obtaining such powders with appropriate development of SHS technology [4-6]. As noted, this opens up prospects for the effective modification of friction surfaces with solid lubricant components during gas-thermal spraying of the mentioned powder materials. Pulsed plasma effects on self-lubricating sprayed coatings contribute to increasing the efficiency of modification and additionally improving the tribological properties of friction surfaces. This statement is based on the existing prerequisites for the strengthening of coatings when exposed to highly concentrated energy flows.

2. Technology for producing a composite material based on oxide ceramics with solid lubricant inclusions

To test the possibility of obtaining SHS powders with solid lubricant components, the synthesis of compositions containing MoS₂ and CaF₂ was carried out. Research was carried out on powders of the following composition: Al₂O₃+30%TiO₂+12.5%MoS₂; Al₂O₃+30%TiO₂+12.5%CaF₂. To obtain these compositions, the following dispersed materials were used: titanium grade PTM, aluminum oxide grade EBM-40, molybdenum disulfide MoS₂ or calcium fluoride CaF₂, taken in a ratio of 57.5:30:12.5. Mixing of the starting components was carried out in a ball mill with a ball to charge ratio of 25:1 and a mechanical activation time of 2-4 hours. The synthesis of the compositions was carried out in a reactor in self-propagation mode without supplying energy from an external source, in a nitrogen-oxygen environment with an oxygen content of 10 to 25 wt.% and a pressure of 0.1-0.9 MPa, which is necessary for the powder oxidation reaction titanium. The reactor is equipped with current leads with a tungsten helix to initiate the process. The use of a nitrogen-oxygen environment during synthesis with an oxygen content of 10 to 25 wt.% is necessary to carry out the oxidation reaction of titanium powder. When the oxygen content is less than 10 wt.% and

the pressure is less than 0.1 MPa, complete oxidation of the powder and sufficient penetration of the reagent gas into the charge layer do not occur. When the oxygen content is more than 25 wt.% and the pressure is more than 0.9 MPa, the combustion temperature rises so much that the particles melt and form a barrier layer that prevents the penetration of the reagent gas into the charge layer. The synthesis products were crushed in a jaw crusher to obtain a fraction of 0.050-0.063 mm, which ensures the spraying of oxide ceramic coatings with a maximum utilization rate of the material. The operation of thermochemical treatment in an air environment at a temperature of 500-800° C for 4-6 hours is carried out in order to oxidize the particles of the composite powder. At a temperature of thermochemical treatment of less than 500° C and a time of less than 4 hours, complete oxidation of particles does not occur, and carrying out the operation at a temperature of more than 800° C and a time of more than 5 hours leads to an increase in energy consumption and partial sintering of particles among themselves [7]. For spheroidization, particles of the resulting composite powder were introduced into a plasma jet and sprayed into a 1 m long steel cylinder filled with argon. The degree of spheroidization was determined by the form factor of the particles (degree of non-sphericity, value 1 - corresponds to a sphere) by the method of optical metallography. The power of the plasma jet was varied from 30 to 40 kW. With a plasma jet power of less than 30 kW, more than 50% of the particles had a form factor of less than 0.7; with a plasma jet power of 40 kW, more than 90% of the particles had a form factor of 0.9 - 1. When the plasma jet power increased above 40 kW, the increase The particle form factor is insignificant. Applying a thin-film metal shell to $\text{Al}_2\text{O}_3+30\%\text{TiO}_2+12.5\%\text{MoS}_2$ powder particles; $\text{Al}_2\text{O}_3+30\%\text{TiO}_2+12.5\%\text{CaF}_2$. carried out by chemical nickel plating. When performing the main operation, a solution of the following composition was used: nickel chloride – 28 g/l; sodium hypophosphite - 30 g/l; sodium citrate - 10 g/l; acetic acid – 10 ml/l. The solution temperature was maintained within 363 – 368 K, pH was 9.0 – 9.5. To obtain a uniform coating of particles, the solution with the powder in the bath was subjected to forced mixing. the optimal duration of nickel plating is 10-12 hours. During this time, a thin-film shell of Ni with a thickness of 6-7 microns is formed on the particles, which is necessary and sufficient according to the accepted criterion for optimizing the cladding of powders for plasma spraying of coatings. Analysis of particle sizes, shape and surface topography of the synthesized composite powders was carried out using scanning electron microscopy (SEM). The study of the structure of particles of composite powders was carried out by metallographic analysis of thin sections of their cross section. For this purpose, Unimet (Japan) and MeF-3 (Austria) microscopes were used.

3. Application of wear-resistant coatings

The coatings were applied using an APS air plasma spraying installation from Plasma-Tekhnik AG under the conditions given in Table 1 and figure 1-4. Friction and wear tests were carried out on an SMTs-2 friction machine according to the scheme: coated pads - cast iron roller (SCh24-44), pads coated with nitrided steel (38XVA). Tribological tests were carried out under conditions of friction with lubricant and in the absence of lubricant at a load in a friction pair of 5 MPa for 10 hours. Data on the parameters of friction and wear of coatings made from powders obtained according to the prototype and the claimed invention are given in Table 2. The results of metallographic analysis were also taken into account when studying the size and shape of particles.

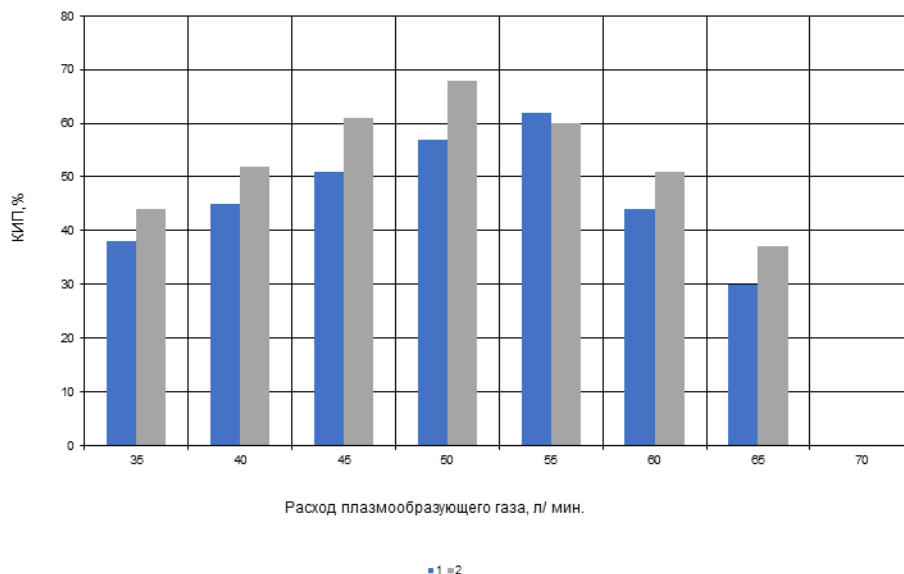


Figure 1. Dependence of the KIP, % on the spraying distance L, mm for powders Al₂O₃- 30% TiO₂-12.5% MoS₂ (1 - with a fraction of 63...100 μm; 2 - with a fraction of 40...63 μm; I=450 A, RN=45 l/min, R por.=3.5 kg/hour)

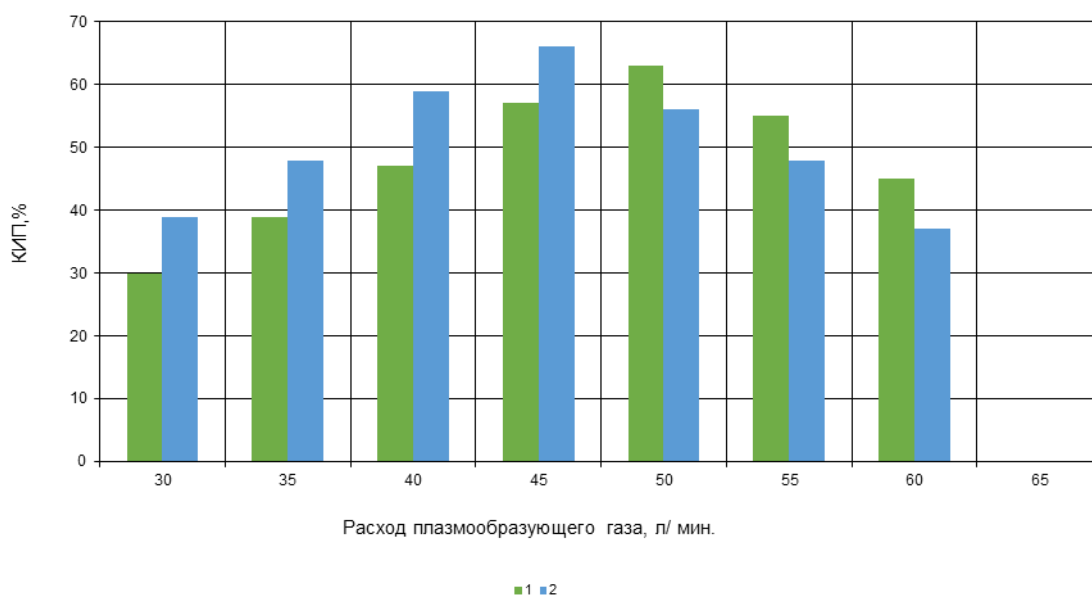


Figure 2. Dependence of the instrumentation and control, % on the consumption of plasma-forming gas N₂ for powders Al₂O₃-30% TiO₂-12.5% MoS₂ (1 - with a fraction of 63...100 μm; 2 - with a fraction of 40...63 μm; L=110 mm; I=500 A; R por.=3.0 kg/hour)

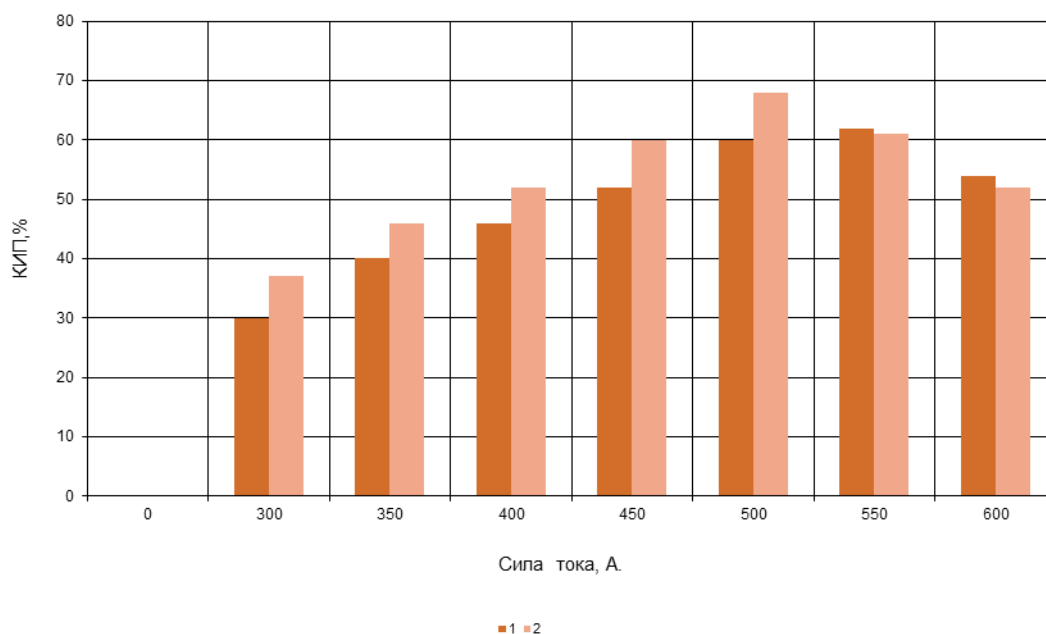


Figure 3. Dependence of the KIP, % on the electric arc current I, A for powders Al₂O₃-30%TiO₂-12.5%MoS₂ (1 - with a fraction of 63...100 μm; 2 - with a fraction of 40...63 μm; L=90 mm; RN=50 l/min, R por.=4.5 kg/hour)

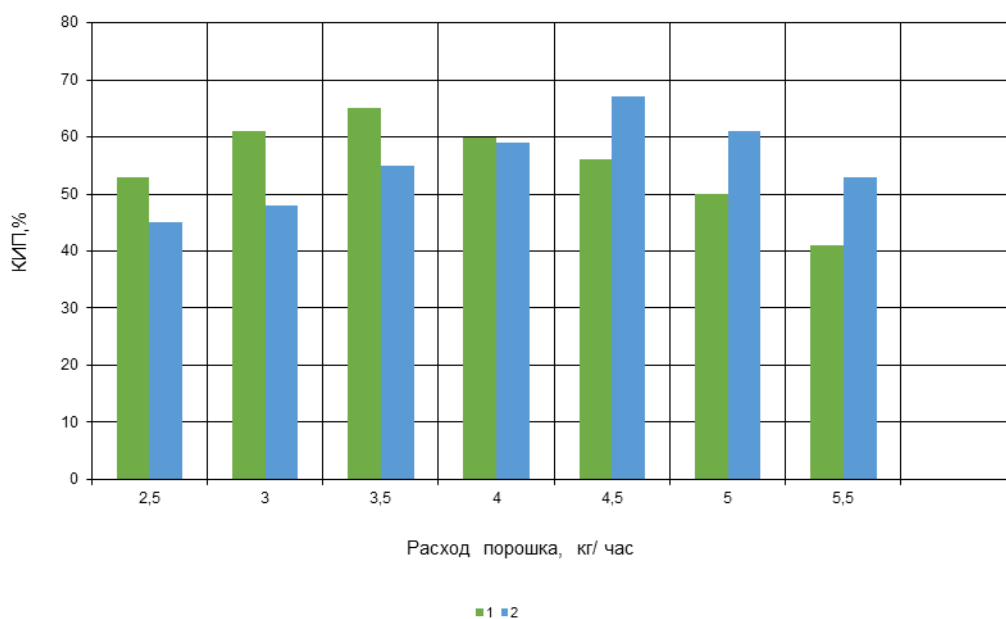


Figure 4. Dependence of the KIP, % on the powder consumption Rп, kg/hour for oxide powders (1 - Al₂O₃-30% Cr₂O₃-12.5%MoS₂; 2 - Al₂O₃-25%TiO₂-25%Cr₂O₃-12.5%MoS₂; L=100 mm; I=500 A; RN=50 l/min)

Table 1. Plasma spraying modes

Sprayed material	Spray modes				
	Plasma-tron arc current, A	Arc voltage, V	Sputtering distance, mm	Consumption of plasma-forming gas-hydrogen, l/min	Consumption of sprayed powder, kg/hour
Ni80Cr20+12,5%MoS ₂ +40%TiC	400	75	120	10	3,0
Ni80Cr20+12,5%CaF ₂ +40%TiC	400	75	120	10	3,0
Al ₂ O ₃ +30%TiO ₂ +12,5%MoS ₂	450	80	110	12	3,5
Al ₂ O ₃ +30%TiO ₂ +12,5%CaF ₂	450	80	110	12	3,5

Consumption of plasma-forming gas - argon 50 l/min

According to metallographic analysis data, the main components of composite particles are oxide phases and solid lubricant inclusions in the form of molybdenum disulfide or calcium fluoride (Figure 5a). The presence of the mentioned constituent powder particles creates the prerequisites for obtaining wear-resistant coatings from them, which are effective against molecular-mechanical and abrasive wear under unfavorable friction conditions (boundary lubrication or lack of lubricant, increased temperature effects) [8, 9]. The powders under consideration are characterized by a complex geometric shape and a developed surface relief of the particles. The tendency to form lumps reduces the flowability of powder materials and their manufacturability during plasma spraying of coatings.

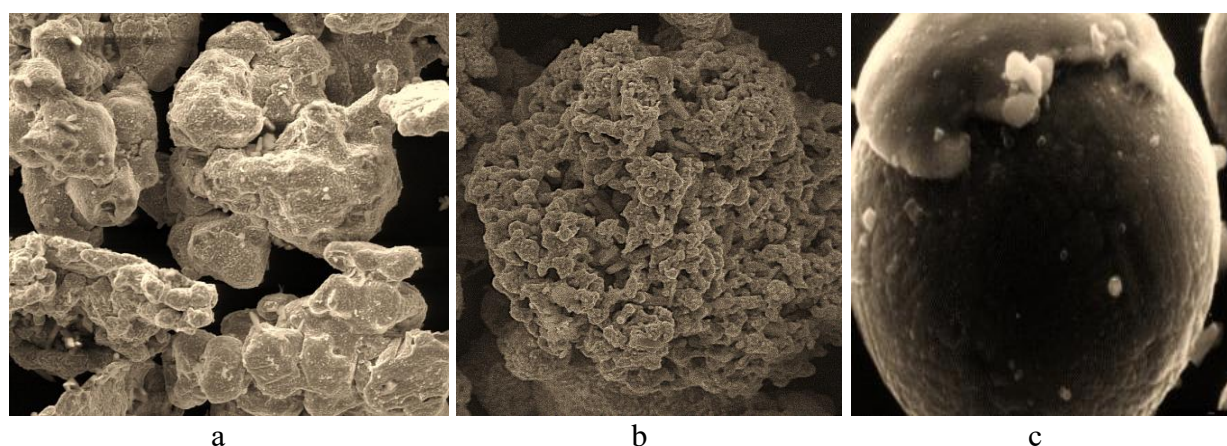


Figure 5. Microstructure of Al₂O₃+30%TiO₂+12.5%MoS₂ composite powder obtained by SHS method: a -after crushing (x 200); b - after spheroidization (x 400); c - after cladding (x 400).

Therefore, to improve the technological parameters of the powders, their spheroidization was carried out [10, 11] by introducing powder particles into a plasma jet with a power of 30-40 kW and spraying in an argon environment (Figure 5b) followed by cladding (Fig-

ure 5c). According to Figure 3, a continuous coating is formed on the surfaces of particles when cladding powders (individual micro-sections of it crumbled during the preparation of polished sections). The mass content of Ni - P in the form of a cladding shell is 30 – 40%. Plasma coatings from composite powders $Al_2O_3+30\%TiO_2+12.5\%MoS_2$; $Al_2O_3+30\%TiO_2+12.5\%CaF_2$. are promising for restoring and strengthening parts operating under unfavorable friction conditions, which is confirmed by the results of Table 2.

Table 2. Friction and wear of coatings on cast iron and steel

Method of obtaining the material	Friction on cast iron				Friction on 38XIOA CT45			
	Friction with lubricant		Dry friction		Friction with lubricant		Dry friction	
	Coating wear, μm	Coefficient friction	Wear of coating, μm	Load bully, kg	Coating wear, μm	Coefficient friction	Wear of coating, μm	Load bully, kg
Ni80Cr20+ 12,5%MoS ₂ +40%TiC	1,2	0,011	10,2	5,8	1,9	0,03	6,1	6,9
$Al_2O_3+30\%$ $TiO_2+12,5\%$ MoS_2	0,9	0,008	7,9	6,9	1,6	0,02	4,9	8,1

4. Conclusion

The disadvantage of carbide ceramics with solid lubricant inclusions is high thermal dissociation during plasma spraying. During flight in a plasma jet, carbide ceramic particles are prone to loss of stability with a change in chemical composition, which leads to a high coefficient of friction for coatings and negatively affects their performance properties. A composite ceramic material based on oxide ceramics with the addition of a solid lubricant, obtained by self-propagating high-temperature synthesis, has good technological characteristics, is resistant to maintaining the chemical composition during plasma spraying and is capable of forming coatings with high wear resistance and low coefficient friction. Coatings obtained from $Al_2O_3+30\%TiO_2+12.5\%MoS_2$ powder; manufactured by the method of self-propagating high-temperature synthesis, have 1.2 times greater wear resistance during friction with lubricant and 1.3 times greater wear resistance during dry friction on cast iron and steel than a coating obtained from Ni80Cr20 + 12.5% MoS₂ powder +55% TiC. Thus, the proposed method makes it possible to increase the wear resistance of coatings.

LITERATURE:

1. Rymorov, E. V. New methods of restoring and strengthening machine parts. M., 2007. – 226 p.
2. Tseev, N. A. Materials for dry friction units operating in vacuum. Directory. - M., - 2001. – 322 p.
3. Braithwaite E. R. Solid lubricants and anti-friction coatings. - M. - 1997. – 182 p.
4. Weld, J. Crankshaft repaired at 30% saving. Vol.58, No.2. 2009. R.710-715.

5. Panteleenko, F. I. Formation of multifunctional plasma coatings based on ceramic materials / F. I. Panteleenko, V. A. Okovity // BNTU-Minsk. 2019.- 231 p.
6. Advanced materials and technologies/ S. M. Aldoshin [etc.]; edited by V. V. Rubanika -Minsk: Publishing house. BSU center, -2021.-658 p. (Panteleenko, F. I. Chapter 6. Optimization of the spraying process of multilayer composite coatings based on nickel M-crowns and zirconium dioxide / Panteleenko F. I., Okovity V. A., Astashinsky V. M. S. 72-92).
7. Okovity, V. A. Plasma wear-resistant coatings with the inclusion of solid lubricant / Okovity V. A. // Welding production-M., 2002. - No. 6. -P.41-43.
8. Okovity, V. Plasma wear-resistant coatings with inclusions of a solid lubricant/ Okovity V // J. Welding International - 2003.-vol.16, No. 11 - P. 918-920.
9. Okovity, V. A. Preparation of composite ceramic material for applying wear-resistant coatings / Okovity V. A., Ilyushchenko A. F., Shevtsov A. I., Panteleenko F. I., Okovity V. V. // Powder metallurgy. - Minsk: Belarusian Science, 2008. - Issue. 31.- pp. 156-162.
10. Okovity, V. A. Ceramic material of the titanium oxide-aluminum oxide-solid lubricant system / Okovity V. A., Devoino O. G., Panteleenko A. F., Okovity V. V., //Bulletin of the Belarusian National Technical University. BNTU - Minsk, 2011.-Issue 1.- From 16-20.
11. Panteleenko, F. I. Development of a composite material based on ceramics using additives of refractory metal compounds / Panteleenko F. I., Astashinsky V. M., Okovity V. A., Sidorov V. A., Rafail K. // Bulletin of the Kuzbass State Technical University-Kemerovo-2020. No.4 (140).-P.18-24.

Поступила в редколлегию 14.05.2025 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Багайсков Ю. С., Некипелов Н. В. АНАЛИЗ ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ДРОБЕМЕТНОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ СТАЛЬНЫХ ТРУБ.....	3
Еронько С. П., Ошовская Е. В., Прилуцкий О. А., Петров П. А., Петров М. П. СИСТЕМА КОМПЛЕКСНОЙ ПОДАЧИ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ И ШЛАКООБРАЗУЮЩЕЙ СМЕСИ В КРИСТАЛЛИЗАТОР МНЛЗ.....	9
Матвиенко С. А. ИННОВАЦИОННЫЙ ПОДХОД СИНТЕЗА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ КРИТИЧЕСКИХ ПО НАДЕЖНОСТИ ДЕТАЛЕЙ АВТОРТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ.....	18
Мельникова Е. П., Быков В. В., Абрамов А. Г. ВЛИЯНИЕ СИЛ ТРЕНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ СРАБАТЫВАНИЯ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ.....	29
Прокопец Г. А., Мельникова Е. П., Чаава М. М. ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ВИБРОУДАРНОЙ ОБРАБОТКИ НА КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ.....	34
Чигринова Н. М., Чигринов В. Е., Шпадарук С. Д., Крушная П. Е. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ФОРМИРОВАНИЯ КЕРАМОПОДОБНЫХ ПОКРЫТИЙ МИКРОПЛАЗМЕННЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ	41
Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G., Okovity V. V., Litvinko A. A., Bendik T. I., Sereda V. Yu., Astashinsky V. M., Ren Pencheng RESEARCH OF PLASMA COMPOSITE COATINGS FROM OXIDE AND NICKEL BASE ALLOY.....	49
Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G., Okovity V. V., Litvinko A. A., Sereda V. Yu., Astashinsky V. M., Ren Pencheng DEVELOPMENT FOR PLASMA SPRAYING OF COMPOSITE MATERIAL BASED ON OXIDE CERAMICS.....	57

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

Абрамов А. Г.	29
Багайсков Ю. С.	3
Быков В. В.	29
Еронько С. П.	9
Крушная П. Е.	41
Матвиенко С. А.	18
Мельникова Е. П.	29
Некипелов Н. В.	3
Ошовская Е. В.	9
Петров М. П.	9
Петров П. А.	9
Прилуцкий О. А.	9
Прокопец Г. А.	34
Чаава М. М.	34
Чигринов В. Е.	41
Чигринова Н. М.	41
Шпадарук С. Д.	41
Astashinsky V. M.	49, 57
Bendik T. I.	49
Devoino O. G.	49, 57
Litvinko A. A.	49, 57
Okovity V. A.	49, 57
Okovity V. V.	49, 57
Panteleenko F. I.	49, 57
Ren Pencheng	49, 57
Sereda V. Yu.	49, 57

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 (210x297 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 60x60 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 нумеруются (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 //Научно-технический журнал 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 3 (90)' 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»,

+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>

Сборник (Е) зарегистрирован в Министерстве информации Донецкой Народной Республики.