

На правах рукописи



КАРПЕНКО ВАДИМ ЮРЬЕВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА ВОССТАНОВЛЕНИЯ
ИЗНОШЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ АВТОМОБИЛЕЙ ПУТЕМ
ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОИСКРОВЫХ ПОКРЫТИЙ НА
ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ**

Специальность 05.22.10 – Эксплуатация автомобильного транспорта

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Орел – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Юго-Западный государственный университет» на кафедре автомобилей, транспортных систем и процессов

Научный руководитель: **АГЕЕВ Евгений Викторович**
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **СЕРЕБРОВСКИЙ Владимир Исаевич**
доктор технических наук, профессор, зав. кафедры
электротехники и электроэнергетики Курской государственной сельскохозяйственной академии им. И.И. Иванова;

ШАТЕРНИКОВ Владимир Степанович
кандидат технических наук, доцент, эксперт областного государственного автономного учреждения «Центр экспертизы на автомобильном транспорте «Белгородцентртранто».

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение всероссийский научно-исследовательский институт ремонта и эксплуатации машинно-тракторного парка (ФГБНУ ГОСНИТИ) г. Москва

Защита диссертации состоится **«30» марта 2016 г. в 13:00** часов на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.030.03 по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук на базе ФГБОУ ВО «Приокский государственный университет», ФГБОУ ВПО «Липецкий государственный технический университет», ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет» по адресу: **302030, г. Орел, ул. Московская, д.77, ауд. 426.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте (www.gu-unpk.ru) ФГБОУ ВО «Приокский государственный университет» по адресу: 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, д. 29, аудитория 340.

Автореферат разослан **«25» февраля 2016 г.** Объявление о защите диссертации и автореферат диссертации размещены в сети Интернет на официальном сайте ФГБОУ ВО «Приокский государственный университет» (www.gu-unpk.ru) и на официальном сайте Министерства образования и науки Российской Федерации (vak2.ed.gov.ru).

Отзывы на автореферат, заверенные печатью организации направлять в диссертационный совет по адресу: 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, д. 29. E-mail: D999.030.03@yandex.ru. Телефон для справок +7(905)8569797

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 999.030.03

Катунин А.А.

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Отсутствие необходимой номенклатуры запасных частей на складах предприятий автомобильного транспорта является одним из главных факторов снижения уровня технической готовности автомобильного парка. Поэтому одним из основных источников экономической эффективности ремонта автомобилей является восстановление изношенных деталей.

Восстановление изношенных деталей автомобилей обеспечивает экономию металла, топлива, энергетических и трудовых ресурсов, а также рациональное использование природных ресурсов и охрану окружающей среды. Для восстановления работоспособности изношенных деталей автомобилей требуется в 5...8 раз меньше технологических операций по сравнению с изготовлением новых деталей.

Обеспечение необходимой номенклатуры запасных частей на складах предприятий автомобильного транспорта требует масштабного развития авторемонтной инфраструктуры и научно-обоснованных методов организации и управления процессами восстановления изношенных деталей автомобилей. Решение этой важной научной и народнохозяйственной задачи приводит к объективной необходимости иметь научные основы организации эффективного авторемонтного производства, что предопределило выбор темы, актуальность научного исследования с учетом его теоретической и практической значимости, формулировку цели, научной новизны и задач диссертационной работы.

Степень ее разработанности. Выбором рациональных методов восстановления деталей начали заниматься с появлением промышленных видов ремонта. Значительный вклад в решение этих вопросов внесли ведущие специалисты в области ремонта, такие как: Батишев А.Н., Бурумкулов Ф.Х., Голубев И.Г., Денисов В.А., Дюмин И.Е., Иванов В.И., Казарцев В.И., Колмыков В.И., Коломейченко А.В., Молодык Н.В., Новиков А.Н., Латыпов Р.А., Лялякин В.П., Сенин П.В., Серебровский В.И., Соловьев С.А., Шадричев В.А., Червоинов В.И., Ульман И.Е. и другие.

Как показывает практика, порядка 85% деталей автомобилей восстанавливаются при износе не более 0,3 мм, то есть их работоспособность восстанавливается при нанесении покрытия незначительной толщины. Для восстановления деталей с такими износами наиболее целесообразно использовать электроискровую обработку (ЭИО). ЭИО отличается технологической гибкостью, дешевизной и позволяет получать покрытия с широким диапазоном свойств.

Однако, во многих случаях свойства электроискровых покрытий изношенных деталей автомобилей зависят от состава, структуры и свойств электродного материала. С практической точки зрения, наибольший интерес представляют электроды с наноразмерными частицами. Выполненный анализ опубликованных научных работ показал, что наиболее перспективным методом получения наноразмерных материалов является метод электроэрозионного диспергирования (ЭЭД).

Изложенное выше подтверждает, что тема диссертационного исследования является актуальной и направлена на решение научно-практической задачи, имеющей важное народно-хозяйственное значение.

Цель работы. Совершенствование на основе научных исследований технологии восстановления и поверхностного упрочнения изношенных деталей автомобилей путем применения электроискровых покрытий на основе электроэрозионных наноматериалов, обеспечивающих заданный ресурс.

Для достижения цели поставлены и решены следующие взаимосвязанные задачи:

1. Выполнен анализ дефектов деталей автомобилей типа «вал», а также анализ методов восстановления деталей автомобилей типа «вал».
2. Выполнен анализ материалов, используемых для электроискровой обработки деталей, и технологических особенностей получения наноматериалов электроэрозионным диспергированием.
3. Рассмотрены теоретические основы повышения ресурса восстановленных валов турбокомпрессоров автомобилей, а также теоретические основы триботехнической работоспособности восстановленных сопряжений.
4. Исследованы износстойкость, коэффициент трения, шероховатость, микроструктура, микротвердость электроискровых покрытий восстановительных валов турбокомпрессоров, влияющие на его ресурс.
5. Исследована величина пористости электроискровых покрытий наноструктурными электродами.
6. Разработана технология восстановления и упрочнения вала турбокомпрессора электроэрозионными наноматериалами.
7. Проведены производственные испытания турбокомпрессоров, восстановленных по рекомендуемой технологии.
8. Выполнен расчет экономической эффективности от внедрения.

Объект исследования – детали автомобилей, подлежащие восстановлению.

Предмет исследования – технология восстановления изношенных валов турбокомпрессоров электроискровой обработкой электроэрозионными наноматериалами.

Научная новизна работы состоит:

- в научном обосновании применения эффективной технологии для восстановления изношенных деталей автомобилей путем применения новых электроискровых покрытий на основе электроэрозионных наноматериалов;
- в установлении зависимости влияния свойств электроэрозионных материалов на свойства электроискровых покрытий восстановленных деталей автомобилей, позволяющей добиться необходимого качества поверхности;
- в установлении зависимости влияния свойств электроискровых покрытий на ресурс восстановленных деталей автомобилей, позволяющей добиться требуемого срока службы.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в исследовании и разработке технологий:

- восстановления и упрочнения изношенных деталей автомобилей электроискровой обработкой электроэрозионными наноматериалами, обеспечивающими этим деталям высокие эксплуатационные свойства, в том числе высокую износостойкость в условиях абразивного изнашивания. Разработанная технология отличается технологической гибкостью, дешевизной, простотой, не требует использования дорогих и дефицитных материалов и оборудования, а также отвечает требованиям экологической безопасности. Предлагаемая технология может быть использована для восстановления широкой номенклатуры деталей автомобилей, тракторов и других машин;
- получения новых электродов для электроискровой обработки изношенных деталей автомобилей путем пропускания высокоамперного тока при температуре 950°C и времени выдержки 3 минуты (патент РФ на изобретение № 2563609 от 20.09.2015 г.).

Результаты исследований внедрены в учебный процесс при чтении лекций, выполнении лабораторных работ, курсовых и выпускных квалификационных работ со студентами и аспирантами в ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» г. Курск.

Методология и методы исследования. Исследование проведено путем формирования новых положений и научной аргументации предложений на основе многочисленных трудов отечественных и зарубежных ученых в области восстановления изношенных деталей автомобилей. При решении поставленных задач использовались современные методы испытаний и исследований, в том числе: гранулометрический состав определяли на лазерном анализаторе размеров частиц «Analysette 22 NanoTec»; рентгеноспектральный микроанализ порошкового материала электродов определяли с помощью энергодисперсионного анализатора рентгеновского излучения фирмы «EDAX»; исследования формы и морфологии микрочастиц определяли с помощью растрового электронного микроскопа фирмы «FEI» «Quanta 600 FEG»; рентгеноструктурный анализ порошкового материала электродов проводили на аналитическом рентгеновском дифрактометре «ARL9900 Intellipower Workstation»; удельную поверхность определяли по одно- и пятиточечному методу БЭТ на газо-адсорбционном анализаторе «TriStar II 3020»; твердость

электродов определяли с помощью полуавтоматического микротвердомера «Instron 402 MVD» по шкале Виккерса; исследования плотности проводили с помощью пикнометра «Micromeritics AccuPic II 1340» гелиевого типа; пористость, микроструктуру и размера зерна электродов для электроискровой обработки проводили с помощью оптического инвертированного микроскопа «OLYMPUS GX51»; коэффициент трения и интенсивность износа поверхности электроискровых покрытий и контртела определяли на автоматизированной машине трения «Tribometer»; шероховатость поверхности образцов исследовали на профилометре «SURTRONIC 25»; металлографические исследования (микроструктуру, толщину слоя покрытия, состояние поверхности покрытия) проводили с помощью оптического инвертированного микроскопа «OLYMPUS GX51» и электронно-ионного сканирующего микроскопа «Quanta 200 3D»; микротвердость покрытий определяли с помощью микротвердомера «AFFRI DM-8» и др.

Положения, выносимые на защиту

1. Теоретические, технологические и технические решения, позволяющие получать износостойкие покрытия на изношенных валах турбокомпрессоров автомобилей путем применения электроискровых покрытий на основе электроэррозионных наноматериалов, обеспечивающих заданный ресурс.
2. Совокупность результатов экспериментальных исследований влияния свойств наноструктурированных электродов, полученных методом электроэррозионного диспергирования отходов быстрорежущих сталей, на ресурс восстановленных валов турбокомпрессоров (ТКР) и физико-механические свойства покрытий на валах ТКР.

Степень достоверности полученных результатов. Обоснованность и достоверность выносимых на защиту научных положений и выводов обеспечиваются принятой методологией исследования, включающей в себя современные научные методы, корректностью разработанных математических моделей, апробацией при обсуждении результатов диссертации на международных научно-технических конференциях. Это позволило обеспечить репрезентативность, доказательность и обоснованность разработанных положений и полученных результатов. Достоверность теоретических положений и выводов диссертации подтверждена положительными результатами при внедрении в практическую деятельность, отмеченных в подразделе «Реализация результатов работы».

Реализация результатов работы. Разработанные технологии и оборудование апробированы и внедрены в ООО АТП «РосАвтоТранс» г. Курск; ООО «Научно-производственный центр «Технические системы и комплексы» г. Курск. Результаты исследований используются в учебном процессе при чтении лекций, выполнении лабораторных работ, курсовых и выпускных квалификационных работ со студентами и аспирантами в ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» г. Курск.

Апробация и реализация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на Международных научных,

научно-практических и научно-технических конференциях: «Поколение будущего: взгляд молодых ученых» (Курск, 2013); «Современные автомобильные материалы и технологии» (Курск, 2014); «Naukowa prezestrzen Europy» (Пшемысьль (Чехия), 2014); «Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов» (Курск, 2014) и др.

Личный вклад автора заключается в постановке и решении актуальной и важной научно-производственной задачи, на основе разработанных: концепции исследования, идей и целей диссертационной работы; теоретико-методологических и научно-методических положений для решения всех элементов научной новизны; совершенствовании методов восстановления изношенных деталей, применении новых электроискровых покрытий на основе электроэрозионных наноматериалов. Автором лично выполнен весь объем экспериментальных исследований, проведены необходимые расчеты, обработка результатов и их анализ, выбран комплекс методик для аттестации порошков и изделий из порошковой быстрорежущей стали (ПБРС) и электроискровых покрытий. Автор принимал непосредственное участие в разработанной методике проведения эксперимента.

Публикации. Основные научные результаты, изложенные в диссертации, опубликованы в 17 изданиях, в том числе: 2 статьи в журналах, входящих в международную базу SCOPUS, 10 публикаций в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы и приложения. Общий объем работы составляет 213 страниц, в том числе 19 таблиц, 70 рисунков, 6 страниц приложений. Список литературы включает в себя 147 источников.

2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность решаемой проблемы, сформулированы цель и задачи исследования, изложена научная новизна и практическая значимость работы, а также приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе «Состояние вопроса и задачи исследования» выполнен анализ и методов восстановления деталей автомобилей типа «вал». Представлены материалы, используемые для электроискровой обработки деталей и технологические особенности получения наноматериалов электроэрозионным диспергированием.

Из всей совокупности восстанавливаемых поверхностей валов 46 % изнашиваются до 0,3 мм; 27 % — от 0,3 до 0,6 мм; 19 % — от 0,6 до 1,2 мм и 8 % — более 1,2 мм. Анализ дефектов деталей типа «вал» по степени износа представлен на рисунке 1.

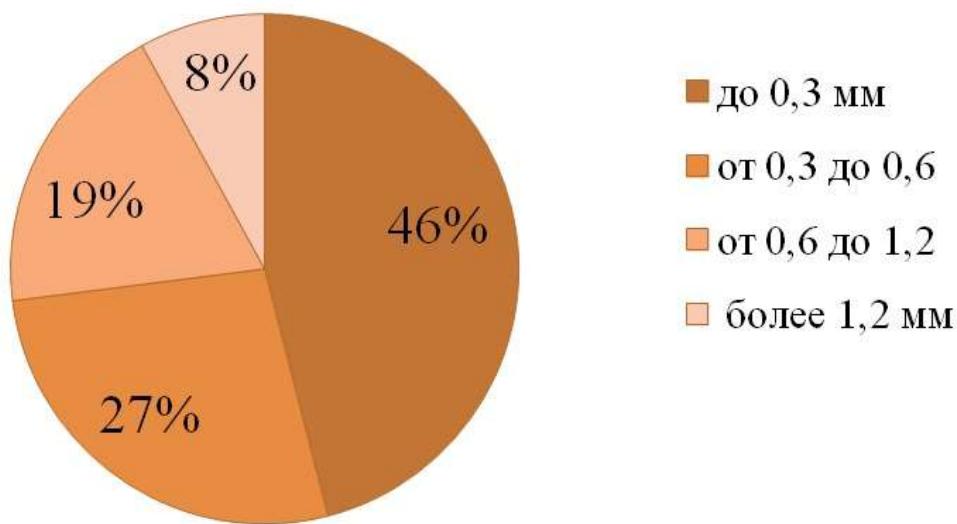


Рисунок 1 – Анализ дефектов деталей типа «вал»
по степени износа

Анализ дефектов в деталях типа «вал» показал, что 70 % основных дефектов является изнашивание деталей, которые работают в сопряжениях типа вал – подшипник. Оценка методов восстановления показал, что одним из перспективных методом восстановления деталей типа «вал» является электроискровая обработка. Проведен анализ материалов, используемых для электроискровой обработки деталей в качестве электродов для нанесения покрытий. Установлено, что содержание наноразмерных частиц в электродном материале способствует улучшению физико-механических свойств восстановительных покрытий. Проведена оценка возможности применения метода электроэррозионного диспергирования для получения частиц, содержащих наноразмерную фракцию.

Во второй главе «Теоретические основы обеспечения заданного ресурса восстановленных деталей турбокомпрессора» рассмотрены теоретические основы повышения ресурса восстановленных валов турбокомпрессоров автомобилей, а также теоретические основы триботехнической работоспособности восстановленных сопряжений.

Наблюдения износов деталей в процессе эксплуатации, стендовых, а также лабораторных испытаний позволяют наметить основные пути повышения их износостойкости и несущей способности.

Для пар трения в зонах фактического касания удельная сдвиговая прочность молекулярных связей описывается биноминальной зависимостью:

$$\tau = \tau_0 + \beta \cdot p_r, \quad (1)$$

где τ_0 – удельная сдвиговая прочность молекулярных связей при экстраполяции нормального фактического давления к нулю; β – коэффициент упрочнения молекулярной связи; $p_r \sim HB$ – фактическое давление на контакте.

Известно, что в приработанных парах трения теоретическое значение контурного давления больше, чем фактическое, и они работают в режиме внешнего трения с упругой деформацией.

Для таких пар теоретическое значение коэффициента трения рассчитывается по формуле:

$$f = 1,5 \left[\frac{\tau_0 \cdot \alpha_e \cdot (1 - \mu_2^2)}{E_{\sigma_{np}}} \right]^{0.5} + \beta, \quad (2)$$

где $E_{\sigma_{np}}$ – приведенный модуль упругости материалов пары трения E_{σ_1} и E_{σ_2} ,

$$E_{\sigma_{np}} = \frac{E_{\sigma_1} \cdot E_{\sigma_2}}{E_{\sigma_1} + E_{\sigma_2}}; \quad (3)$$

α_e – коэффициент гистерезисных потерь.

Пара работает при внешнем трении, если

$$\frac{h_e}{r} \leq \frac{1}{2} \left(1 - \frac{2\tau}{\sigma_0} \right), \quad (4)$$

где σ_0 – предел текучести приповерхностных слоев более мягкой поверхности; h_e – глубина внедрения единичной неровности; r – средний радиус кривизны вершин единичной неровности.

Установлено, что, зная закономерности изменения технического состояния первого, второго и третьего видов, можно: количественно оценить вероятности нахождения турбокомпрессора в работоспособном состоянии, а также выбирать и эффективную стратегию поддержания восстановленного турбокомпрессора в работоспособном состоянии. Отмечено, что оптимально подобранные материалы и технологии нанесения покрытий восстанавливаемых соединений могут улучшить триботехнические характеристики узла.

В третьей главе «Материалы и методики исследования» представлены: оборудование, используемое при выполнении исследований; методы исследования электроэррозионных порошков, используемых при восстановлении и упрочнении изношенных деталей автомобилей; методы исследования спеченных электродов, используемых для получения электродов для электроискровой обработки изношенных деталей автомобилей; объект реновации; методы исследования покрытий, полученных электроискровым легированием на валах турбокомпрессоров; методика проведения эксплуатационных испытаний; оценка достоверности при проведении эксплуатационных испытаний.

За объект реновации был выбран вал ротора турбокомпрессора фирмы «Garrett» GT2049S для двигателя 2.0 TDI DuraTorq «Ford Transit V». При решении поставленных задач использовались современные методы испытаний и исследований, в том числе: материал электродов для ЭИО получали методом электроэррозионного диспергирования на установке для получения нанодисперсных порошков из токопроводящих материалов (Патент РФ № 2449859); гранулометрический состав определяли на лазерном анализаторе размеров частиц «Analysette 22 NanoTec»; рентгеноспектральный микроанализ

порошкового материала электродов определяли с помощью энергодисперсионного анализатора рентгеновского излучения фирмы «EDAX», встроенного в растровый электронный микроскоп «Quanta 600 FEG»; исследования формы и морфологии микрочастиц определяли с помощью растрового электронного микроскопа фирмы «FEI» (производства Голландии) «Quanta 600 FEG»; рентгеноструктурный анализ порошкового материала электродов проводили на аналитическом рентгеновском дифрактометре «ARL9900 Intellipower Workstation»; электрод для электроискровой обработки получали на установке искрового плазменного спекания; удельную поверхность заготовок определяли по одно- и пятиточечному методу БЭТ на газо-адсорбционном анализаторе «TriStar II 3020»; микротвердость определяли с помощью полуавтоматического микротвердометра «Instron 402 MVD» по шкале Виккерса; механическую обработку спеченных образцов проводили на автоматическом высокоточном настольном отрезном станке «Accutom-5»; а также шлифовально-полировальном станке «LaboPol-5»; исследования плотности проводили с помощью пикнометра «Micromeritics AccuPic II 1340» гелиевого типа; пористость, микроструктуру и размер зерна электродов для электроискровой обработки исследовали с помощью оптического инвертированного микроскопа «Olympus GX51», оснащенного системой автоматизированного анализа изображений «Simagis Photolab»; электроискровые покрытия на автомобильных деталях выполняли с помощью установки «UR-121» (производство фирмы «ПЭЛМ», г. Подольск); коэффициент трения и интенсивность износа поверхности образца с нанесенным на него электроискровым покрытием и контртела исследовали на автоматизированной машине трения «Tribometer» фирмы «CSM Instruments»; шероховатость поверхности образцов исследовали на профилометре «Surtronic 25»; металлографические исследования (микроструктуру, толщину слоя покрытия, состояние поверхности покрытия) проводили с помощью оптического инвертированного микроскопа «Olympus GX51», оснащенного системой автоматизированного анализа изображений «Simagis Photolab» и электронно-ионного сканирующего микроскопа «Quanta 200 3D»; микротвердость образцов определяли с помощью микротвердометра «AFFRI DM-8» и др.

В четвертой главе «Результаты экспериментальных исследований» представлены: результаты исследования электроэрзационных порошков, используемых при восстановлении и упрочнении изношенных деталей автомобилей; результаты исследования спеченных электродов; результаты исследования электроискровых покрытий валов турбокомпрессоров; результаты проведения производственных испытаний; результаты проведения эксплуатационных испытаний; результаты оценки достоверности при проведении эксплуатационных испытаний.

Результаты исследований свойств ПБРС представлены на рисунках 2 и 3.

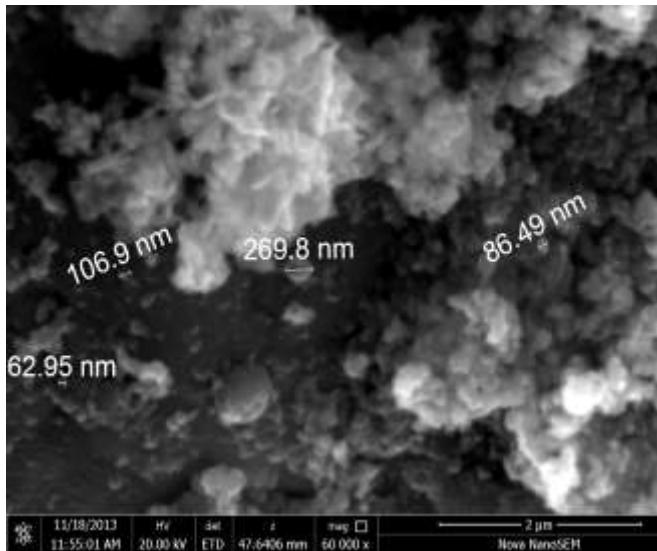


Рисунок 2 – Снимок с РЭМ частиц ПБРС, полученных ЭЭД

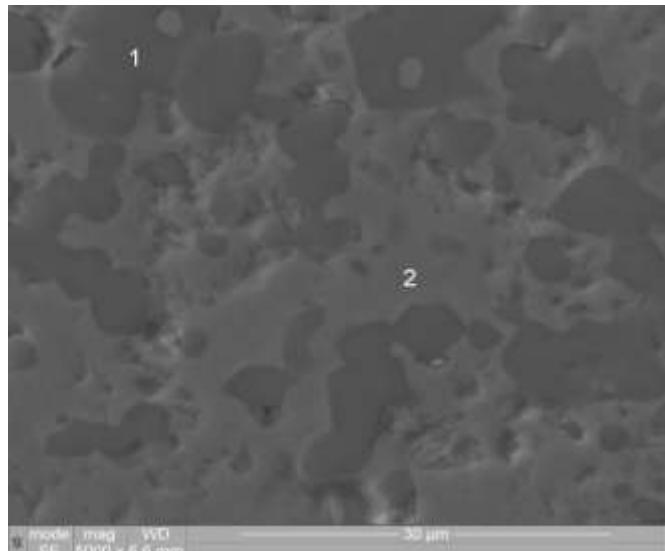


Рисунок 3 – Микроструктура спеченного электрода из ПБРС



а)



б)

Рисунок 4 – Оптическое изображение пятна износа контртела (шарика) после многократных проходов по исследуемой поверхности экспериментальных образцов: ПБРС (а); исходная сталь 30ХГСА (б)

Установлено: средний размер частиц ПБРС, полученных в воде дистиллированной, составляет 16,88 мкм; удельная площадь поверхности размер частиц ПБРС, полученного в воде дистиллированной составляет $28476,27 \text{ см}^2/\text{см}^3$. Частицы порошка в основном имеют сферическую и эллиптическую форму. Основными элементами в порошке являются железо,

кислород, углерод, вольфрам и молибден, а основными фазами являются железо (Fe) вольфрам (W), магнетит (Fe_3O_4) и оксид кобальтохрома ($CoCr_2O_4$).

Экспериментально установлены свойства спеченных электродов из электроэррозионных порошков для ЭИО: среднее значение твердости заготовок по микро-Виккерсу при нагрузке на индентор 30 Н – 477 HV; плотность – 6,504 cm^3/g ; основные элементы – Fe, W, Mo, Cr, C.

Таблица 1 – Значения измеренной микротвердости HV, ГПа

| Номер отпечатка | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | Среднее значение |
|----------------------------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------------------|
| Подложка (Сталь 30ХГСА) | 1,80 | 1,98 | 2,02 | 2,11 | 2,19 | 2,13 | 2,15 | 2,20 | 2,17 | 2,11 | 2,09 |
| Покрытие (ПБРС) | 2,20 | 2,86 | 4,61 | 12,11 | 9,29 | 9,46 | 15,0 | 4,39 | 6,50 | 5,12 | 4,36 |

Среднее значение коэффициента трения (μ) у подложки из стали марки 30ХГСА составило 0,486, а у электроискрового покрытия – 0,146.

Износостойкость образца с электроискровым покрытием выше износостойкости подложки. Шероховатость образцов с электроискровым покрытием составляет Rz 13,2 мкм (Ra 2,14 мкм). Толщина покрытия от 19,07 мкм до 31,42 мкм. Среднее значение микротвердости покрытия, полученного электродным материалом из электроэррозионных порошков быстрорежущей стали, больше микротвердости подложки в 2,1 раза.

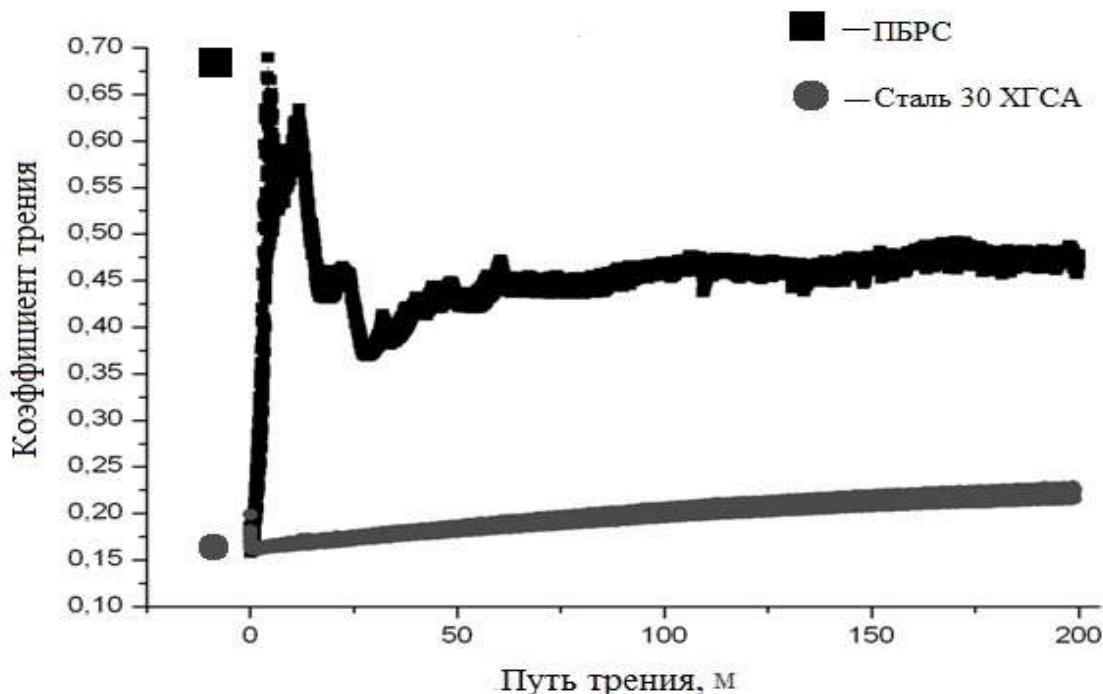
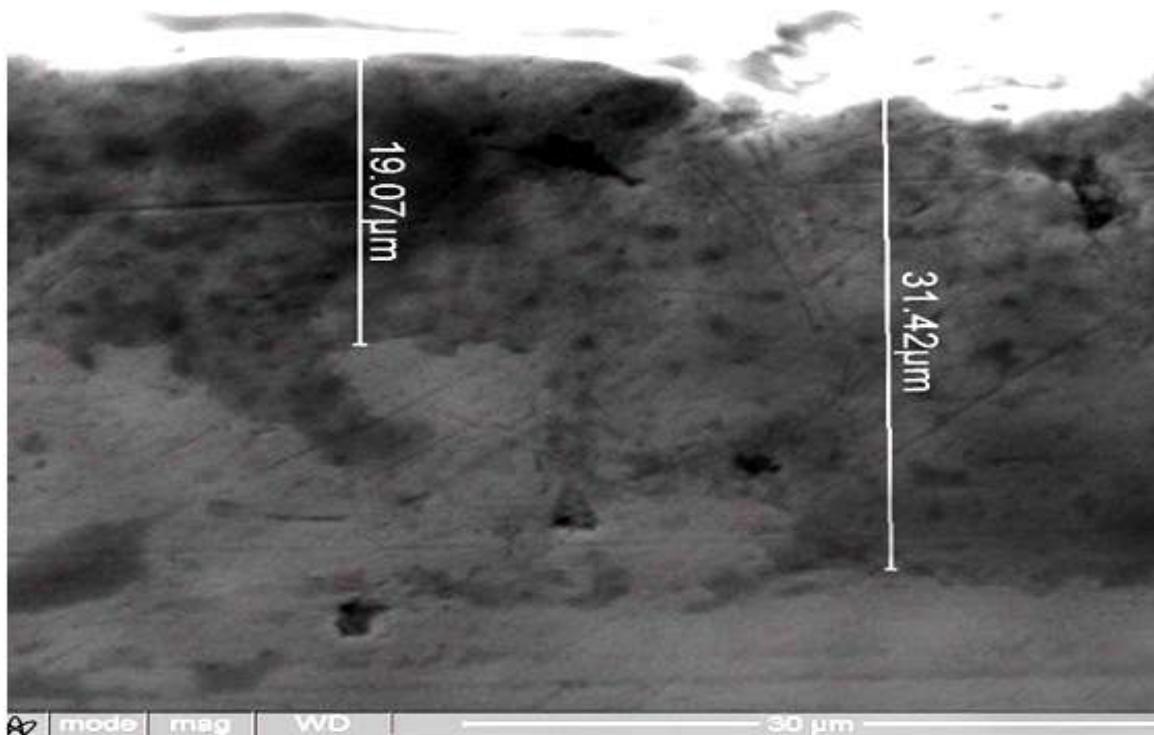
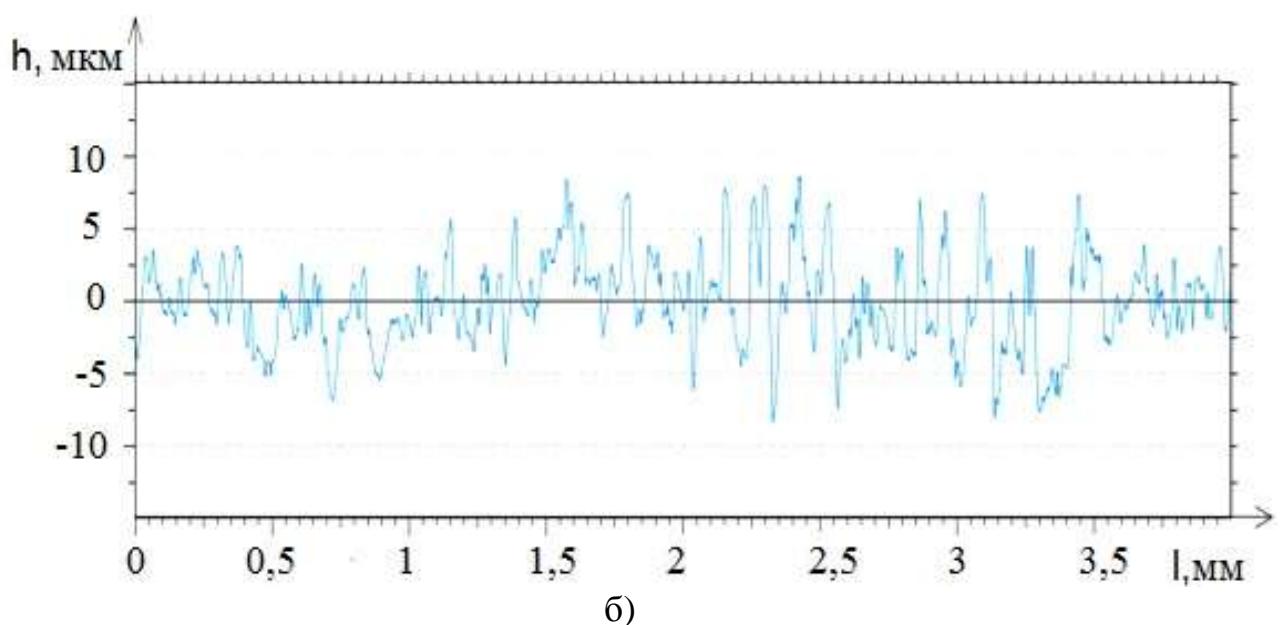


Рисунок 5 – Результаты трибологических испытаний образцов на пути трения 200 м



a)



б)

а) поперечный шлиф («Quanta 200 3D»), б) шероховатость поверхности (автоматизированный прецизионный контактный профилометр «SURTRONIC 25»)

Рисунок 6 – Характеристики электроискрового покрытия

Таблица 2 – Трибологические характеристики исследуемых покрытий

| | Коэффициент трения (μ) | | | | | Фактор износа статистического партнера, $mm^3 \cdot H^{-1} \cdot m$ | Фактор износа образца, $mm^3 \cdot H^{-1} \cdot m$ |
|--|------------------------------|-----------------------|------------------------|-------------------------------|---------------------------------|---|--|
| | Началь- ный | Мини- мальн- ый | Макси- мальн- ый | Сред- нее значе- ние | Сред- нее откло- нение | | |
| Сталь 30ХГСА (контртело Stainless Steel AISI 420) | | | | | | | |
| 100 м | 0,145 | 0,143 | 0,633 | 0,426 | 0,061 | $3,671 \cdot 10^{-6}$ | $1,978 \cdot 10^{-7}$ |
| 200 м | 0,184 | 0,176 | 0,611 | 0,457 | 0,046 | $2,150 \cdot 10^{-7}$ | $1,168 \cdot 10^{-6}$ |
| 500 м | 0,207 | 0,191 | 0,629 | 0,486 | 0,034 | $2,620 \cdot 10^{-7}$ | $5,340 \cdot 10^{-7}$ |
| ПБРС | | | | | | | |
| ПБРС (контртело 100Cr6) | 0,345 | 0,220 | 0,481 | 0,374 | 0,081 | $2,643 \cdot 10^{-5}$ | 0 |
| ПБРС (контртело Stainless Steel AISI 420) | | | | | | | |
| 100 м | 0,173 | 0,156 | 0,194 | 0,179 | 0,010 | $3,788 \cdot 10^{-11}$ | 0 |
| 200 м | 0,199 | 0,162 | 0,221 | 0,197 | 0,017 | $3,240 \cdot 10^{-7}$ | 0 |
| 500 м | 0,162 | 0,118 | 0,162 | 0,146 | 0,008 | $1,595 \cdot 10^{-7}$ | 0 |

В пятой главе «Практические рекомендации по работе» разработана технология восстановления и упрочнения вала турбокомпрессора электроэррозионными наноматериалами (рисунки 7, 8 и таблицы 3, 4), а также проведены производственные испытания турбокомпрессоров, восстановленных по рекомендуемой технологии и произведен расчет экономической эффективности от внедрения.

Разработанная технология восстановления и упрочнения деталей турбокомпрессора методом электроискровой обработки с использованием наноструктурированного электрода, полученного из отходов быстрорежущей стали марки Р6М5 методом электроэррозионного диспергирования в кислородсодержащей рабочей жидкости. Предложенная технология позволяет увеличить ресурс восстановленных деталей в 1,5 раза по сравнению с новыми.

Таблица 3 – Технологический процесс восстановления вала ротора турбокомпрессора электроискровой обработкой электроэрозионными наноматериалами

| № п/п | Наименование операции |
|----------|---|
| 005 | Моечная Вымыть вал ротора ТКР в моющем средстве «HELIT» с концентрацией 25 г/л при температуре 80...90 °С для очищения их от нагара и смоляных отложений. |
| 010 | Дефектовочная 1. Проверить вал ротора на изгиб (при значении биения более допустимого техническими требованиями на ремонт деталь подлежит замене). 2. Определить износ канавок для колец уплотнения. 3. Определить износ опорных поверхностей вала ротора под подшипник. |
| 015 | Электроискровая 1. Закрепить в трехкулачковый патрон токарно-винторезного станка 1К62 обратный центр. 2. Закрепить вал ротора ТКР в центрах станка. 3. Обработать опорные поверхности вала ротора турбокомпрессора под подшипник. 4. Обработать поверхность на вале ротора под уплотнительную втулку, электрод – Ø2 мм, режим установки – 5, $n_d = 30$ об/мин, $S_{эл} = 0,23$ мм/об. |
| 020 | Поверхностно-пластиическая Обкатать опорные поверхности вала ротора под подшипник $n_d = 30$ об/мин, $S_{эл} = 0,11$ мм/об. |
| 025 | Притирочная Притереть опорные поверхности вала ротора под подшипник до номинального размера. |
| 030 | Балансировочная Произвести балансировку вала ротора ТКР с турбинным колесом в двух плоскостях по достижению величины, указанной в спецификации на капитальный ремонт. |
| 035 | Очистка Промыть блок в растворе моющего средства «HELIT», с концентрацией 25 г/л при температуре 80...90°С. |
| 040 | Контрольная Произвести технический контроль восстановленного вала на соответствие размерам. |

Таблица 4 – Параметры электроискровой обработки поверхности вала турбокомпрессора

| № | Параметры | Нанесение ЭИ покрытия |
|---|---|---|
| 1 | Частота вращения детали, мин ⁻¹ | 50 |
| 2 | Подача электрода, мм/мин | 0,04...0,05 |
| 3 | Диаметр детали, мм | 12 ^{-0,040} _{-0,050} |
| 4 | Шероховатость поверхности, R _a . мкм | 0,8...1,6 |
| 5 | Время настройки, мин. | 20,0 |
| 6 | Время обработки (одна опора), мин. | 10 |



Рисунок 7 – Токарный станок с интегрированной в него установкой для электроискровой обработки UR-121



Рисунок 8 – Выглаживание поверхности вала турбокомпрессора после электроискровой обработки

Отремонтированные турбокомпрессоры с деталями, восстановленными по предложенной технологии, эксплуатируются в автохозяйствах Курской области. Результаты показывают, что их ресурс выше ресурса серийных агрегатов в среднем в 1,5 раза.

На основании произведенных расчетов экономическая эффективность от внедрения предложенного технологического процесса восстановления вала ротора ТКР методом ЭИО наноструктурированным электродом в ООО АТП «РосАвтоТранс» составила 1341145 руб.

Таким образом, даже на малых предприятиях с небольшими программами восстановления ТКР с аварийными дефектами экономический эффект от применения разработанного нового технологического проекта весьма значительный.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена важная научно-практическая задача, направленная на совершенствование на основе научных исследований технологии восстановления и поверхностного упрочнения изношенных деталей автомобилей путем применения электроискровых покрытий на основе электроэррозионных наноматериалов, обеспечивающих заданный ресурс.

Основные результаты и выводы

1. Научно обосновано применение эффективной технологии для восстановления изношенных деталей автомобилей путем применения новых электроискровых покрытий на основе электроэррозионных наноматериалов. Разработанная технология отличается технологической гибкостью, дешевизной, простотой, не требует использования дорогих и дефицитных материалов и оборудования, а также отвечает требованиям экологической безопасности. Предлагаемая технология может быть использована для восстановления широкой номенклатуры деталей автомобилей, тракторов и других машин.

2. Экспериментально установлены зависимости влияния свойств электроэррозионных материалов на свойства электроискровых покрытий восстановленных деталей автомобилей. Показано, что содержание наноразмерных частиц в электродном материале способствует улучшению физико-механических свойств электроискровых покрытий. В частности, среднее значение микротвердости электроискрового покрытия (4,36 HV), полученного электродным материалом из электроэррозионных порошков быстрорежущей стали, больше микротвердости подложки (2,09 HV) в 2,1 раза.

3. Экспериментально установлены зависимости влияния свойств электроискровых покрытий на ресурс восстановленных деталей автомобилей. Показано, что ресурс валов турбокомпрессоров, восстановленных по рекомендуемой технологии выше ресурса новых валов в среднем в 1,5 раза.

4. Экспериментально установлены рациональные режимы нанесения износостойких покрытий на изношенные валы турбокомпрессоров, обеспечивающие необходимый комплекс физико-механических свойств

покрытиям и заданный ресурс валам в целом (частота вращения детали, мин⁻¹ – 50; подача электрода, мм/мин – 0,4...0,5).

5. Изучены характеристики износостойкости электроискровых покрытий валов турбокомпрессоров, полученных с использованием электроэрозионных наноматериалов. Показано, что среднее значение коэффициента трения (μ) у электроискрового покрытия составило 0,146 вместо 0,486 без покрытия, что в 3,3 раза ниже.

6. По результатам производственных испытаний установлено, что продолжительность работы турбокомпрессора, с восстановленным методом электроискровой обработкиnanoструктурным электродом валом, в 2,1 раза увеличилась по сравнению с новым промышленно изготовленным валом. Так, при введении абразивного материала, содержащего фракцию размером 0,1...0,4 мм время работы турбокомпрессора с восстановленным валом составило 12,8 часов, а время работы турбокомпрессора с новым валом без износа номинального размера составило 8,1 ч.

7. Разработанные технологии и оборудование апробированы и внедрены: в ООО АТП «РосАвтоТранс» г. Курск; в ООО «Научно-производственный центр «Технические системы и комплексы» г. Курск. Общий ожидаемый экономический эффект от внедрения составит 1341145 руб. в год.

8. Результаты исследований внедрены в учебный процесс при чтении лекций, выполнении лабораторных работ, курсовых и выпускных квалификационных работ со студентами и аспирантами в ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» г. Курск.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЩИХ РАБОТАХ

В изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук

1. **Карпенко, В.Ю.** Восстановление вала ротора турбокомпрессора электроэрозионной обработкой с использованием электроэрозионных нанопорошков / Е.В. Агеев, В.Ю. Карпенко, А.С. Осьминина // Мир транспорта и технологических машин. – 2015. – № 4. – С. 3-12.

2. **Карпенко, В.Ю.** Совершенствование метода ремонта турбокомпрессора / Е.В. Агеев, И.П. Емельянов, В.Ю. Карпенко // Мир транспорта и технологических машин. – 2016. – № 1. – С. 31-38.

3. **Карпенко, В.Ю.** Влияние технологии получения электродного материала из отходов быстрорежущей стали на износостойкость электроискровых покрытий / Е.В. Агеева, Е.В. Агеев, В.Ю. Карпенко, А.Ю. Алтухов // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2015. – № 1. – С. 36-41.

4. **Карпенко, В.Ю.** Оценка износостойкости электроискровых покрытий, полученных с использованием электроэрозионных порошков быстрорежущей стали/ Е.В. Агеева, Е.В. Агеев, Р.А. Латыпов, В.Ю. Карпенко, А.Ю. Алтухов //

Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2015. – № 3. – С. 45–46.

5. **Карпенко, В.Ю.** Исследование свойств спеченных образцов из порошков, полученных электроэррозионным диспергированием отходов быстрорежущей стали / Е.В. Агеев, Р.А. Латыпов, В.Ю. Карпенко // Международный технико-экономический журнал. – 2014. – № 4. – С. 90–94.

6. **Карпенко, В.Ю.** Рентгеноструктурный анализ порошка, полученного из вольфрамсодержащих отходов электроэррозионным диспергированием в водной среде / Е.В. Агеева, Е.В. Агеев, В.Ю. Карпенко // Вестник машиностроения. – 2014. – № 12. – С. 64–66.

7. **Карпенко, В.Ю.** Состав, структура и свойства порошка из быстрорежущей стали, полученной электроэррозионным диспергированием в воде / Е.В. Агеева, Е.В. Агеев, В.Ю. Карпенко // Международный технико-экономический журнал. – 2014. – № 5. – С. 88–96.

8. **Карпенко, В.Ю.** Свойства синтезированной порошковой быстрорежущей стали из электроэррозионных порошков, полученных в водной среде / Е.В. Агеев, Е.В. Агеева, А.Ю. Алтухов, Д.А. Чумак-Жунь, С.В. Пикалов, В.Ю. Карпенко // Известия ЮЗГУ. – 2015. – № 1 (58). С. 17–26.

9. **Карпенко, В.Ю.** Размерный анализ частиц порошка, полученного из вольфрамсодержащих отходов электроэррозионным диспергированием в воде / Е.В. Агеева, Е.В. Агеев, В.Ю. Карпенко // Вестник машиностроения. – 2015. – № 1. – С. 56–60.

10. **Карпенко, В.Ю.** Характеристики электроискровых покрытий, полученных электродным материалом из электроэррозионных порошков быстрорежущей стали / Е.В. Агеева, Е.В. Агеев, Р.А. Латыпов, В.Ю. Карпенко, А.Ю. Алтухов // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2015. – № 1. – С. 71–76.

Статьи в изданиях, индексируемых международной базой Scopus

11. **Karpenko, V.Yu.** Studing Tungsten-containing Electroerosion Powders and Alloys Synthesized from Them / E.V. Ageev, E.V. Ageeva, V.Yu. Karpenko, A.S. Osminina// Journal of nano- and electronic physics. – 2014. – Vol. 3. – pp. 03049-1– 03049-3.

12. **Karpenko, V.Yu.** Nanopowder Produced from High-Speed Steel Waste by Electrospark Dispersion in Water / E.V. Ageev, E.V. Ageeva, V.Yu. Karpenko, // Russian Engineering Research. – 2015. – Vol. 35. – No. 3, pp. 189–190.

Патенты РФ

13. Пат. 2563609 Российская Федерация, МПК, B22F 3/14, B22F 3/087, B22F 3/105 . Способ получения заготовок из порошковой быстрорежущей стали / Е.В. Агеев, В.Ю. Карпенко, А.Е. Гвоздев, Е.В. Агеева; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет». – №2014137211/02, заявл. 16.09.2014; опубл. 20.09.2015.

Статьи и материалы конференций

14. **Карпенко, В.Ю.** Переработка отходов быстрорежущих сталей / В.Ю. Карпенко // Поколение будущего: взгляд молодых ученых: матер. II Междунар. молодеж. науч. конф. в 6 т. – Т. 6. – Курск, 2013. – С. 135-138.
15. **Карпенко, В.Ю.** Анализ электроэрозионных порошков, полученных из отходов быстрорежущих сталей в водной среде/ Е.В. Агеева, Е.В. Агеев, В.Ю. Карпенко // Современные материалы, техника и технологии: матер. III Междунар. науч. практ. конф. в 3 т. – Т. 2. – Курск, 2013. – С. 23-27.
16. **Карпенко, В.Ю.** Исследование пористости заготовок твердого сплава, полученных холодным изостатическим прессованием и спеканием вольфрамсодержащих электроэрозионных порошков / Е.В. Агеев, Е.В. Агеева, В.Ю. Карпенко, А.С. Осьминина // Naukowa prezestrzen Europy - 2014: сб. тр. 10-ой Междунар. науч.-практ. конф. – Przemysl, 2014. – С. 5-7.
17. **Карпенко, В.Ю.** Исследование свойств заготовок из вольфрамсодержащих инструментальных материалов, полученных электроэрозионным диспергированием / Е.В. Агеев, Е.В. Агеева, В.Ю. Карпенко, А.С. Осьминина // Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов: тр. XI Междунар. конф. / Юго-Зап. гос. ун-т; НИТУ МИСиС. – Курск, 2014. – Ч. 2. – С. 178-183.