

На правах рукописи



ОВСЯННИКОВ Виктор Евгеньевич

**ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ  
СТРОИТЕЛЬНО-ДОРОЖНЫХ МАШИН**

Специальность 05.05.04 – Дорожные, строительные и подъемно-транспортные  
машины, 05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-  
технической обработки

Автореферат  
диссертации на соискание ученой  
степени доктора технических наук

Омск– 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Курганский государственный университет» (КГУ).

**Научный консультант:**

**КОРЧАГИН Павел Александрович**

доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», проректор по научной работе (г. Омск).

**Официальные оппоненты:**

**АБРАМОВ Андрей Дмитриевич**

доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения», проректор по научной работе (г. Новосибирск);

**ЧЕРНЯВСКИЙ Дмитрий Иванович**

доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет, профессор кафедры «Машиноведение» (г. Омск);

**ХАНДОЖКО Александр Владимирович**

доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», профессор кафедры «Металлорежущие станки» (г. Брянск).

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»

Защита состоится 18 мая 2022 г. в 12-00 часов на заседании диссертационного совета ВАК РФ Д 212.250.02 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)» по адресу: 644080, г. Омск, проспект Мира, 5, ауд. 3124. Тел. (3812) 65-03-23, e-mail: dissovetsibadi@bk.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)» и на сайте университета по адресу: <http://sibadi.org/about/units/institut-magistratury-i-aspirantury/studies/dissertations/65810>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенной печатью учреждения, просим направлять в диссертационный совет по адресу: 644080, г. Омск, проспект Мира, 5. Тел. (3812) 65-03-23, e-mail: dissovetsibadi@bk.ru.

Автореферат разослан «16» марта 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук, профессор



Кузнецова  
Виктория Николаевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Эффективность эксплуатации строительно-дорожных машин определяется в значительной мере их долговечностью, которая закладывается при проектировании, обеспечивается при изготовлении, возобновляется при ремонте. При этом параметры качества исполнительных поверхностей деталей наравне с конструкцией машин, качеством их сборки, режимом эксплуатации и другими аспектами оказывают существенное влияние на многие показатели эффективности работы машин, механизмов и технологического оборудования. Большинство машин (85-90%) выходит из строя по причине износа деталей. Расходы на ремонт машин в нашей стране составляют десятки миллиардов рублей в год.

Процесс разработки грунта строительно-дорожными машинами характеризуется неблагоприятными условиями для элементов рабочих органов, которые непосредственно взаимодействуют с рабочей средой. При разработке техногенных грунтов (в частности, отвалов металлургических комбинатов) возникла проблема повышенного абразивного износа рабочих органов, которая не проявлялась в случае разработки природных грунтов. Таким образом, традиционные теории копания не в полной мере учитывают фактор абразивного действия грунта, в частности, при прогнозировании надежности рабочего оборудования строительно-дорожных машин.

При затуплении режущей кромки происходит увеличение сил сопротивления, которое может достигать 180-200%. В известных теориях Ю.А. Ветрова, К.А. Артемьева и др. влияние износа на величину силы копания учитывается за счет соответствующих поправочных коэффициентов (коэффициент затупления, относительное притупление лезвия и т.д.). Определены предельные значения затупления, при достижении которых процесс разработки грунта становится нецелесообразным. Однако данные теории не учитывают влияния физико-механических свойств материала режущих органов и не позволяют учесть динамику изнашивания режущей кромки, а следовательно, и прогнозировать наработку, которая соответствует наступлению указанного выше предельного состояния, что снижает эффективность планирования ремонтных мероприятий.

В практике применяются различные методы ремонта и восстановления шарниров рабочего оборудования. Реальный уровень восстановления потребительских качеств (оцениваемый в том числе и показателями надежности) составляет всего 40-50% (вместо нормативного значения в 80% согласно ГОСТ 22581-77). Сравнительно малая доля восстанавливаемых деталей объясняется тем, что используемые в ремонтном производстве технологии и оборудование не обеспечивают требуемых параметров качества поверхностного слоя (микротвердости, толщины упрочненного слоя, шероховатости и т.д.). Помимо этого традиционные методы упрочнения формируют слой, в котором микротвердость по толщине снижается. Такая ситуация порождает не совсем благоприятный характер изменения интенсивности отказов: удлинение периода приработки и сокращение периода нормальной работы узла.

Таким образом, объективно существует важная народнохозяйственная проблема повышения долговечности рабочего оборудования строительного дорожных машин.

**Степень разработанности темы исследования.** Большой вклад в развитие вопросов обеспечения долговечности и надежности машин на стадиях их жизненного цикла внесли разработки отечественных и зарубежных ученых К.П. Чудакова, А.С. Денисова, Д.П. Великанова, Ю.К. Беляева, Г.В. Крамаренко, Ф.Н. Авдонькина, Н.Я. Говорущенко, А.Д. Соловьева, Я.Б. Шора, Е.С. Кузнецова, И.Г. Крагельского, Я.Х. Закина, Я.И. Несвитского, Дж. Хунтера, В. Радановича, С.В. Репина, Ю.И. Густова, R. Barlou, F. Proschan, D. Khan, U. Mikker и др. Исследованиями научных коллективов Рыбинского государственного авиационного технического университета им. П.А. Соловьева и Брянского государственного технического университета, а также отечественных и зарубежных ученых В.Ф. Безъязычного, Ю.Р. Виттенберга, П.Е. Дьяченко, И.В. Крагельского, А.А. Маталина, Э.А. Сателя, А.Г. Сулова, Ю.Г. Кабалдина, Ю.Г. Шнейдера, W. Rau, E. Scherf, J.Z. Zhang, J.C. Chen и др. установлено, что на эксплуатационные свойства машин и узлов решающее влияние оказывают параметры качества рабочих поверхностей деталей.

Вопросами совершенствования конструкций и эксплуатации строительного дорожных машин занимались научные школы Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ), Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ), Санкт-Петербургского строительного архитектурного университета и т.д. Решению проблем в данном направлении посвящены работы С.В. Репина, Ю.И. Густова, В.А. Зорина, Н.Г. Гринчара, В.И. Баловнева, В.Н. Кузнецовой, И.А. Недорезова, А.К. Рейша, В.В. Савинкина, В.С. Щербакова, и многих других.

Вопросам восстановления изношенных деталей посвящены работы Е.В. Агеева, А.Н. Батищева, Ф.Х. Бурумкулова, И.Г. Голубева, В.А. Денисова, С.А. Зайдеса, Л.В. Дехтеринского, И.Е. Дюмина, В.И. Иванова, В.И. Казарцева, В.И. Карагодина, В.И. Колмыкова, А.В. Коломейченко, Р.И. Ли, В.П. Лялякина, Р.А. Латыпова, Н.В. Молодыка, А.Н. Новикова, П.В. Сенина, В.И. Серебровского, Д.Б. Слинко, В.А. Шадричева, В.И. Червоиванова, И.Е. Ульмана и др.

**Цель диссертационного исследования.** Повышение долговечности рабочего оборудования строительного дорожных машин на основе разработанных научных положений, новых методик прогнозирования предельного состояния и способов обеспечения, требуемых параметров качества поверхностного слоя технологическими методами.

Для достижения поставленной цели были определены следующие **задачи**:

1. Уточнить понятийный аппарат для разработки теоретических и практических основ обеспечения долговечности рабочего оборудования строительного дорожных машин на базе использования упрочнения на основе систематизации накопленного научного знания;

2. Разработать математическую модель для прогнозирования динамики изнашивания и долговечности элементов рабочего оборудования строительного дорожных машин, имеющих упрочненный слой;

3. Теоретически и экспериментально обосновать новый метод повышения долговечности рабочего оборудования строительного-дорожных машин с использованием поверхностного упрочнения;

4. Сформировать технологические рекомендации по обеспечению требуемых параметров качества поверхностного слоя деталей при поверхностном упрочнении на основе разработанного метода;

5. Исследовать особенности формирования шероховатости поверхностей при механической обработке шарниров рабочего оборудования с упрочненным слоем, разработать структурную схему и программно-аппаратный комплекс, реализующий устройство контроля износа инструмента;

6. Провести апробацию полученных результатов в реальных условиях эксплуатации.

**Объект исследования.** Рабочее оборудование строительного-дорожных машин и их приводы, рассматриваемые с точки зрения взаимосвязи свойств среды, параметров режимов, действующих усилий и параметров качества поверхностного слоя с долговечностью при их изготовлении и в ходе ремонтных воздействий.

**Предмет исследования.** Закономерности, характеризующие долговечность рабочего оборудования строительного-дорожных машин при взаимодействии с рабочей средой в процессе эксплуатации, а также в ходе технологических воздействий, получаемые на основе разработки новых методов, средств и технологий.

**Рабочая гипотеза** состоит в том, что использование метода поверхностного упрочнения, исследования параметров шероховатости и их обеспечения позволит повысить долговечность рабочих органов строительного-дорожных машин.

**Научную новизну** исследования представляют:

- предложенная концепция решения проблемы повышения долговечности рабочего оборудования строительного-дорожных машин посредством применения нового технологического метода, позволяющего в управляемом режиме получать поверхностные слои контактирующих деталей с параметрами качества поверхностного слоя, обеспечивающими оптимальные эксплуатационные свойства;

- полученная модель динамики затупления режущих элементов рабочих органов, дополняющая известные теории математического моделирования процесса разработки грунтов и дающая возможность прогнозировать наступление предельного состояния рабочих органов строительного-дорожных машин. Использование модели дает возможность до 1.5 раз точнее определять значения гамма-процентного ресурса для износостойких элементов рабочих органов с поверхностным упрочнением в зависимости от вида разрабатываемого грунта,

физико-механических свойств материала рабочих органов и режимов разработки грунта;

- доказанная возможность повышения долговечности до 40% при использовании шарниров рабочего оборудования СДМ с упрочненным слоем, имеющим обратное распределение твердости за счет сокращения приработки и увеличения периода нормального износа;

- термины, характеризующие процесс взаимодействия рабочих органов строительно-дорожных машин с грунтом, имеющим абразивные свойства, в частности, техногенным. Это позволяет учитывать влияние абразивных свойств грунта на надежность рабочих органов строительно-дорожных машин по сравнению с традиционными характеристиками грунта по ГОСТ 12536-2014. Введены термины: «коэффициент числа частиц грунта, взаимодействующих с поверхностью режущего элемента», «коэффициент глубины внедрения абразивных частиц грунта в поверхность режущего элемента» и «коэффициент числа рабочих циклов процесса копания циклов, приводящих к разрушению материала»;

- разработанный новый метод поверхностного упрочнения, который позволяет получать упрочненный слой толщиной до 3 мм с обратным распределением микротвердости, что дает возможность повысить долговечность рабочих органов строительно-дорожных машин;

- результаты исследований текстуры профиля шероховатости поверхностей шарниров рабочего оборудования строительно-дорожных машин с упрочненным слоем, а также разработанная структурная схема и программно-аппаратный комплекс, реализующий устройство контроля износа инструмента при обработке резанием.

**Теоретическая и практическая значимость исследования.** Полученные новые научные результаты, реализованные в виде комплекса теоретических и методологических положений, включая предложенную концепцию повышения долговечности рабочего оборудования строительно-дорожных машин, математические модели, алгоритмы и программное обеспечение по определению показателей долговечности и влияния характера распределения микротвердости, разработанный метод упрочнения вносят значительный вклад решение проблемы обеспечения долговечности рабочих органов строительно-дорожных машин.

Применение разработанной технологии изготовления износостойких элементов из серого чугуна дает возможность повысить долговечность быстроизнашивающихся частей строительно-дорожных машин с одновременным снижением затрат на 20-30%.

Повышается эффективность процесса изготовления и ремонта шарниров рабочего оборудования строительно-дорожных машин за счет того, что в упрочненном слое наблюдается обратный характер распределения микротвердости, что дает возможность отказаться от повторного упрочнения после обработки детали в ремонтный размер. Результаты исследования могут быть использованы при изготовлении и ремонте быстроизнашивающихся частей рабо-

чих органов строительного-дорожных машин и соединительных элементов рабочего оборудования.

**Методология и методы исследования.** Общая концепция исследований построена на комплексе теоретических и экспериментальных методов, включающих математическое, компьютерное, имитационное моделирование и теории обеспечения долговечности строительного-дорожных машин, оценке сходимости результатов теоретических и экспериментальных исследований, а также методологии исследования, включающей методы математической статистики, методы расчета на износ и определения наработки на отказ, метода конечных элементов, матричное построение факторов эксперимента, оценку экономической эффективности.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Математическая модель, позволяющая прогнозировать динамику затупления режущей кромки рабочих органов строительного-дорожных машин как для природных, так и техногенных грунтов и дискретных материалов, дополняющая известные теории математического моделирования процесса разработки грунта.

2. Результаты экспериментальных исследований, подтверждающие возможность повышения долговечности рабочих органов строительного-дорожных машин на 15-20% за счет использования износостойких элементов с упрочненным слоем.

3. Математическая модель, позволяющая прогнозировать вероятность безотказной работы шарниров рабочего оборудования строительного-дорожных машин, содержащих упрочненный слой, в том числе после обработки в ремонтный размер при различных сочетаниях конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов.

4. Результаты теоретического обоснования и экспериментального подтверждения возможности реализации повышения долговечности рабочего оборудования строительного-дорожных машин на основе нового метода упрочнения, который позволяет получать слои с обратным распределением микротвердости толщиной до 3 мм.

5. Алгоритм, структурная схема и программно-аппаратный комплекс, реализующий устройство контроля износа инструмента, использование которого дает возможность производить автоматический контроль состояния режущего инструмента, выполнять своевременную замену изношенного инструмента и обеспечить требуемые параметры шероховатости поверхности шарниров рабочего оборудования строительного-дорожных машин.

**Степень достоверности** обеспечивается применением общепринятых методов и методик выполнения теоретических и экспериментальных исследований, корректным использованием методик измерения и последующего анализа результатов, применением сертифицированных средств измерения, обеспечивающих надлежащую точность, и согласованностью полученных результатов теоретических исследований и эксперимента.

**Апробация результатов работы.** Основные результаты работы докладывались на: Международной научно-технической конференции «Инновационные технологии в автоматизированном машиностроении и арматуростроении» (Курган, 2010), III Международной научно-технической конференции «Теплофизические и технологические аспекты повышения эффективности машиностроительного производства (Тольятти, 2011), Международной научно-практической конференции, посвященной 85-летию транспортного образования в Зауралье и 55-летию УрГУПС «Актуальные проблемы современной науки и практики» (Курган, 2011), II Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии и экономика в машиностроении» (Юрга, 2011), Международной научно-технической конференции «Инновационные технологии в машиностроении: проблемы, задачи, решения» (Орск, 2012), Первой международной научно-технической конференции «Инновации и исследования в транспортном комплексе» (Курган, 2013), Международной научно-практической конференции «Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе» (Пермь, 2019), Международной конференции «IOP Conference Series: Materials Science and Engineering», 2019, Международной конференции «Transport of Siberia», 2019, Международной научно-технической конференции «Транспортные и транспортно-технологические системы» (Тюмень, 2020), IV Региональной научно-практической конференции «Образование. Транспорт. Инновации. Строительство» (Омск, 2021).

**Реализация результатов работы.** Результаты работы приняты к внедрению на АО «Курганский завод дорожных машин», ООО «Спецтехсервис», разработки прошли апробацию в ООО «Региональная транспортная компания» и АО «Тюменское областное дорожно-эксплуатационное предприятие ДРСУ-4», ООО «Зауральский инструментальный завод». Результаты используются в учебном процессе Курганского государственного университета и Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета.

**Личный вклад автора** состоит в постановке и решении крупной научной проблемы за счет анализа, обобщения и дополнения теории обеспечения надежности строительно-дорожных машин. В разработке математических моделей, которые дополняют известные теории копания тем, что дают возможность прогнозирования динамики износа режущей кромки рабочего органа и прогнозирования предельного состояния. В обосновании метода и разработке технологии упрочнения, позволяющей получать слой толщиной до 3 мм с обратным распределением твердости. В разработанной концепции, моделях, алгоритмах, программном обеспечении и устройствах, а также методе изготовления и ремонта, использование которых позволяет повысить долговечность строительно-дорожных машин.

Соискателем получены новые научные результаты, направленные на достижение показателей, которые определены «Стратегией развития строительной отрасли Российской Федерации до 2030 года».

**Соответствие паспорту специальностей.** Содержание диссертационной работы соответствует требованиям паспортов научных специальностей 05.05.04

(п. 5 «Методы повышения долговечности, надежности и безопасности эксплуатации машин, машинных комплектов и систем») и 05.02.07 (п. 2 «Теоретические основы, моделирование и методы экспериментального исследования процессов механической и физико-технической обработки, включая процессы комбинированной обработки с наложением различных физических и химических воздействий» и п. 3 «Исследование механических и физико-технических процессов в целях определения параметров оборудования, агрегатов, механизмов и других комплектующих, обеспечивающих выполнение заданных технологических операций и повышение производительности, качества, экологичности и экономичности обработки»).

**Публикации.** Основные результаты диссертационной работы отражены в 56 публикациях, в том числе в 22 работах, входящих в список ВАК РФ, 7 публикациях в журналах Scopus и Web of science, 2 монографиях. Получены 7 патентов на изобретения и полезные модели и 5 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, семи глав, общих выводов и приложений. Работа изложена на 210 страницах машинописного текста, содержит 136 рисунков, 63 таблицы, список литературы из 152 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** представлена актуальность проблемы исследования, сформулирована цель, приведена научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, даны общая характеристика исследования, сведения об апробации и внедрении, а также основные положения, которые выносятся на защиту.

**В первой главе** представлен обзор существующих методов и результатов научных исследований в области повышения долговечности рабочего оборудования строительно-дорожных машин, в том числе при их восстановлении. При этом традиционные методы повышения долговечности требуют длительной приработки. Также в ходе обзора установлено, что доля восстанавливаемых деталей в строительно-дорожных машинах составляет 35-40%, при этом долговечность после восстановления не соответствует нормативным значениям (70-80% от долговечности изделия, полученной в условиях производства).

На основании проведенного анализа определены следующие направления решения обозначенной проблемы:

- разработка моделей, дающих возможность прогнозировать предельное состояние режущих элементов рабочих органов строительно-дорожных машин;
- повышение долговечности рабочих органов строительно-дорожных машин за счет разработки новых технологических методов, обеспечивающих получение упроченных слоев с высоким сопротивлением абразивному износу;
- совершенствование технологий изготовления и ремонта шарниров рабочего оборудования строительно-дорожных машин за счет разработки решений,

позволяющих обеспечить требуемые параметры качества поверхностного слоя при оптимальных затратах.

**Вторая глава** посвящена разработке концепции исследования, общим теоретическим исследованиям и методологическим аспектам их реализации. Исследования выполнялись на основе системного подхода.

**Концепция заключается** в предложенной возможности повышения долговечности рабочего оборудования строительно-дорожных машин посредством применения нового технологического метода, позволяющего в управляемом режиме получать упрочненные слои контактирующих деталей с параметрами качества поверхностного слоя, обеспечивающими требуемые эксплуатационные свойства на основе:

- разработки решений в области прогнозирования долговечности рабочих органов и шарниров рабочего оборудования;
- разработки и реализации нового метода поверхностного упрочнения, который позволяет повысить долговечность рабочих органов, в том числе для случаев взаимодействия с абразивной средой;
- совершенствования подходов к изготовлению и восстановлению шарниров рабочего оборудования на основе применения материалов с обратным распределением твердости по толщине слоя.

Одним из путей повышения ресурса рабочих органов строительно-дорожных машин является использование износостойких элементов. Исследованиями Ю.И. Густова, В.Н. Кузнецовой и др. доказано, что в качестве материала для изготовления таких элементов может быть использован чугун с поверхностным упрочнением. В результате комплексного технико-экономического анализа методов повышения долговечности чугунов было установлено, что наилучшим сочетанием критериев обладает метод химико-термической обработки. В систему критериев оценки включались: толщина упрочненного слоя, управляемость процессом (комплексный показатель, характеризующий требования к квалификации рабочего, простоту методики назначения режимов и сложность технологического процесса), обрабатываемость упрочненного слоя резанием, твердость, экономичность способа. Однако традиционные методы упрочнения чугунов посредством химико-термической обработки требуют специального оборудования, газовых сред, что делает их малоприменимыми в условиях мелкосерийного производства.

В ходе проведенных исследований была выдвинута гипотеза о том, что поверхностная энергия железа способствует диссоциации оксидов легирующих элементов, при этом имеется возможность реализации метода термодиффузионного поверхностного легирования чугуна без необходимости использования вспомогательных сред, содержащих хлориды и фториды. В результате термодинамических расчетов данная гипотеза была подтверждена. В ходе теоретических расчетов установлено, что при использовании оксидов железа, хрома и молибдена имеется возможность получать на поверхности упрочненные слои, в то время как применение оксидов ванадия и титана этого сделать не позволяет.

Это дает возможность изготавливать износостойкие элементы рабочих органов строительно-дорожных машин непосредственно из чугуна без использования процессов наплавки чугуна на стальную основу. На рисунке 1 приведен один из примеров потенциального использования модернизированного чугуна в качестве защитных элементов ковша экскаватора.

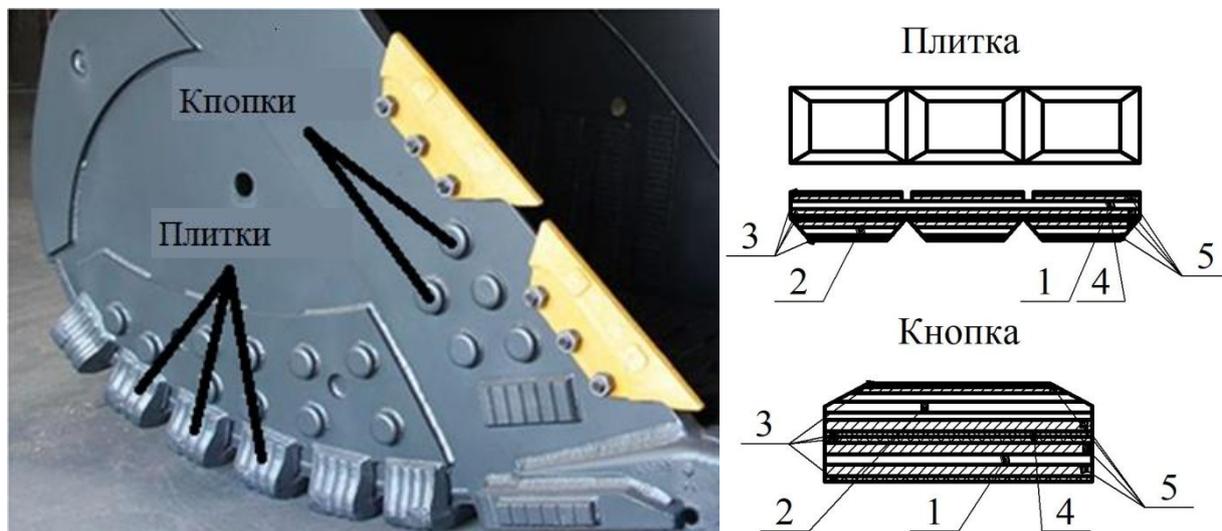


Рисунок 1 – Использование защитных элементов из серого чугуна с упрочненным слоем: 1 – основание; 2 – рабочая часть; 3 – ферритная кайма; 4 – сварной шов; 5 – упрочненный слой

Для подтверждения выдвинутой гипотезы были проведены исследования повышения долговечности посредством применения указанного материала при контакте с рабочей средой (в условиях абразивной среды). Кроме того исследовались технологические возможности метода упрочнения (получаемая толщина слоя, распределение твердости, свариваемость и т.д.).

Применительно к шарнирам рабочего оборудования помимо сопротивления износу важным фактором обеспечения долговечности является приработка контактирующих пар. Известно, что на стадии приработки наблюдается повышенная интенсивность отказов, поэтому ведущие производители строительно-дорожных машин, таких как «Амкодор», «Komatsu», «ЧЛМЗ» и др. в эксплуатационной документации к технике рекомендуют производить процесс обкатки новой техники на пониженных режимах в течение довольно длительного времени (десятков часов). Данный подход вполне оправдывает себя, когда речь идет о новой технике, ввиду того, что в данном режиме осуществляется приработка большинства функциональных узлов одновременно. Однако в случае ремонта такой подход не вполне оправдан, поскольку необходима приработка только узлов, подвергшихся восстановлению. Поэтому требуется внедрение технических решений, позволяющих ускорить процесс приработки восстановленных узлов при минимизации наработки машины в целом.

Учитывая, что использование рассмотренного выше способа упрочнения позволяет получать обратное распределение твердости, можно предположить,

что это позволит сократить период приработки ( $T_{\text{ПР}}$ ) и увеличить зону нормального износа ( $T_{\text{НИ}}$ ) (см. рисунок 2).

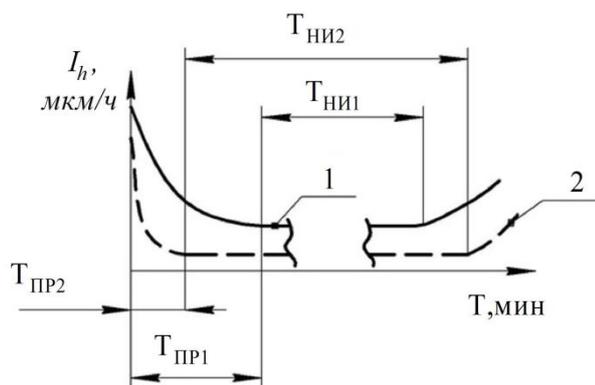


Рисунок 2 – Интенсивности изнашивания:  $T_{\text{ПР1}}$ ,  $T_{\text{НИ1}}$  – период приработки и нормального износа для традиционного упрочнения (кривая 1);  $T_{\text{ПР2}}$ ,  $T_{\text{НИ2}}$  – период приработки и нормального износа для упрочнения с обратным распределением твердости (кривая 2)

Помимо твердости, важным фактором, который оказывает влияние на долговечность, является шероховатость исполнительных поверхностей. Причем оптимальные значения возможно получить при некотором, строго определенном значении шероховатости.

Шероховатость поверхности, которая формируется в ходе механической обработки, может рассматриваться как суммарный результат реализации многих процессов, например, упругих и пластических деформаций, кинематики процесса обработки, вибраций и т.д.

Для исследования указанного выше соотношения составляющих был использован корреляционный анализ (определялся уровень случайной составляющей профиля  $\gamma$ ) и методы фрактальной геометрии (вычислялось значение показателя Херста). Было проанализировано более 100 профилей, результаты представлены на рисунках 3 и 4.

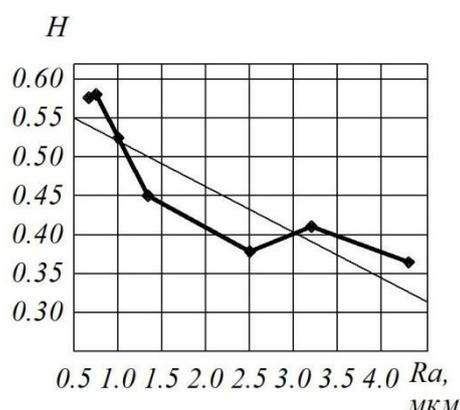
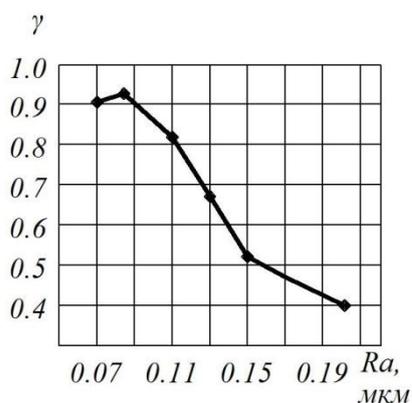


Рисунок 3 – Зависимость  $\gamma=f(Ra)$  Рисунок 4 – Зависимость  $H=f(Ra)$

Анализ полученных зависимостей показывает, что чем меньше  $Ra$ , тем выше уровень случайной компоненты профиля и тем больше влияние вибраций

при обработке на формирование профиля поверхности шарниров рабочего оборудования строительного-дорожных машин.

В третьей главе рассмотрены вопросы разработки модели прогнозирования долговечности рабочих органов строительного-дорожных машин. Машины при разработке грунта работают с режущими кромками, которые затуплены до некоторого значения. Увеличение износа вызывает рост сил сопротивления копанию, а следовательно, и нагрузки на силовые приводы машины. В известных теориях копания рассмотрены вопросы разработки грунта рабочими органами как с острой, так и с притупленной режущей кромкой. В частности в теории резания Н.Г. Домбровского и теории копания А.Н. Зеленина для учета влияния износа режущей кромки на усилия используется поправочный коэффициент. Дальнейшее развитие данный подход получил в теориях резания Ю.А. Ветрова и К.А. Артемьева, где было учтено влияние затупления режущей кромки на силу резания грунта. Численно дополнительная сила резания грунта, возникающая из-за износа, может быть определена по формуле Р.А. Кабашева. Указанные выше теории говорят о том, что существует некоторое предельное значение износа режущей кромки, при котором дальнейшая разработка грунта становится нецелесообразной. Однако возможность учета динамики процесса изнашивания и прогнозирования надежности рабочих органов в данных теориях отсутствует.

В работах А.К. Рейша, посвященных повышению износостойкости рабочих органов строительных и дорожных машин, абразивные свойства грунта учитываются через коэффициент абразивности грунта. Величина ресурса вычисляется через линейные функции. При этом не учитывается форма и размер частиц грунта, площадь контакта абразива с режущим элементом рабочего органа. Кроме того, как отмечает сам автор, некоторые из приведенных факторов нуждаются в дополнительных исследованиях и уточнениях. Кроме того, все зависимости были получены для разработки природных грунтов (чернозем, глина, песок, суглинок, песчаники, гранитно-известняковый щебень).

В настоящее время уделяется большое внимание вопросам экологии. Согласно стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года необходимо активно внедрять механизмы переработки и рециклинга не только бытовых, но и промышленных отходов. Одним из направлений переработки отходов горно-обогатительных, металлургических комбинатов, ТЭЦ, ТЭС и т.д. является использование их в дорожном строительстве. При этом техногенные грунты отличаются от природных по своим физико-механическим свойствам, например, сталь-шлаки – повышенными абразивными свойствами.

Таким образом, в настоящее время отсутствуют закономерности, позволяющие моделировать износ режущих элементов рабочих органов СДМ, а также не учитывается ряд важных факторов, таких как абразивные свойства, в частности, техногенных грунтов и дискретных материалов.

В качестве входных данных, которые необходимы для оценки надежности рабочих органов строительного-дорожных машин, можно использовать:

- физико-механические свойства грунта по ГОСТ 12536-2014 (сопротивление разрушению, плотность грунта, коэффициент трения грунта о грунт и т.д.);
- физико-механические свойства материала режущих элементов рабочих органов СДМ с упрочненным слоем (твердость, модуль продольной упругости, предел выносливости и т.д.);
- действующие усилия со стороны рабочего органа;
- параметры режимов разработки грунта.

К известным параметрам необходимо добавить абразивные свойства грунта (размеры абразивных частиц, площадь взаимодействия частиц и рабочего органа, глубина внедрения абразивных частиц и т.д.).

Графически модель представлена на рисунке 5.

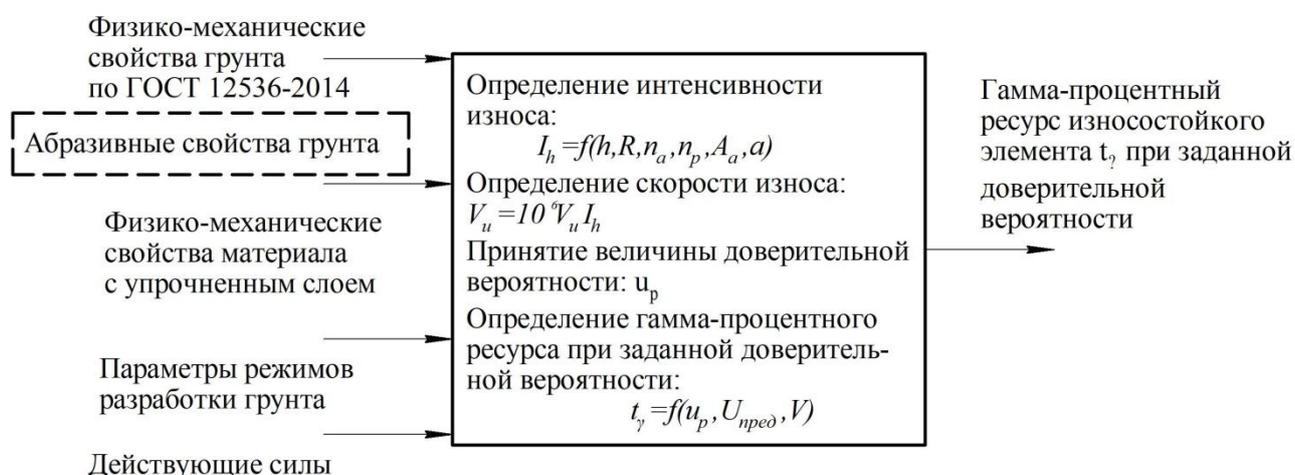


Рисунок 5 – Структура модели прогнозирования долговечности деталей строительно-дорожных машин с упрочненным слоем

Для определения показателей долговечности была модернизирована известная зависимость, приведенная в работах А.Г. Сулова, позволяющая оценить гамма-процентный ресурс при заданном уровне доверительной вероятности, посредством учета изменения среднего значения скорости изнашивания ( $V_u = 10^6 \cdot I_{hg} \cdot V$ ) и параметров ее рассеяния ( $\sigma_{Vg}$ ) при изменении твердости по толщине слоя:

$$u_p = \frac{(U_{пред} - \Delta a) - \bar{V}_u \cdot t_{\gamma g}}{\sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_{Vg}^2 \cdot t_{\gamma i}^2}}, \quad (1)$$

где  $V_u = 10^6 \cdot I_{hg} \cdot V$  – скорость изнашивания;  $I_{hg}$  – значение интенсивности изнашивания по сечениям;  $V$  – скорость относительного передвижения;  $\sigma_a$  – параметр рассеяния;  $\sigma_{Vg}$  – параметры рассеяния по сечениям;  $U_{пред}$  – характеристика предельного состояния детали;  $\Delta a$  – допуск на размер;  $u_p$  – вероятность безотказной работы.

Суммарная величина гамма-процентного ресурса определяется следующим образом:

$$t_{\gamma} = \sum_{g=1}^n t_{\gamma g}, \quad (2)$$

где  $n$  – число расчетных сечений.

Ввиду того, что используется материал с поверхностным упрочнением, при расчетах значения микротвердости  $HV$  пересчитываются в значения  $HV_{\text{сеч}}$ .

Для корректного учета влияния изменения твердости на интенсивность изнашивания необходимо брать во внимание условия взаимодействия абразивных частиц, в том числе и техногенного грунта, и материала рабочего органа строительного-дорожного машины, содержащего износостойкий элемент с упрочненным слоем. Определение интенсивности изнашивания производилось на основе зависимостей К.Х. Макхамова, которые были модернизированы с учетом специфики разработки грунта строительного-дорожного машиной, имеющей рабочие органы с упрочненным слоем.

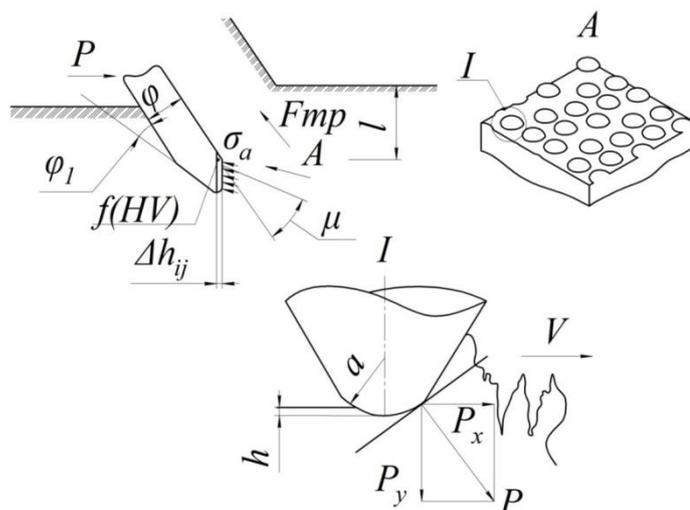


Рисунок 6 – Расчетная схема взаимодействия режущей кромки рабочего органа СДМ с рабочей средой

В зависимости были введены коэффициенты числа частиц грунта, взаимодействующих с поверхностью режущего элемента  $Kn_{ai}$ , глубины внедрения абразивных частиц грунта в поверхность режущего элемента  $K_{hi}$  и числа рабочих циклов процесса копания циклов, приводящих к разрушению материала  $Kn_{pi}$ :

$$I_{hg} = \frac{2 \cdot K_{hg} \cdot (R - h/3) \cdot Kn_{ag}}{A_a \cdot a \cdot Kn_{pg}}, \quad (3)$$

где  $h$  – глубина внедрения абразивных частиц грунта;  $a$  – радиус контакта частиц грунта с поверхностью зуба;  $R$  – усредненный радиус абразивных частиц грунта;  $A_a$  – площадь контакта режущего элемента рабочего органа с абразивной частицей грунта. Данная модель позволяет корректно учитывать абразивные свойства рабочей среды, при помощи показателей  $a, R, Kn_a$  учитывается влияние размеров, формы абразивных частиц грунта на износостойкость рабо-

чих органов СДМ. Учитывая свойства упрочненного слоя, параметры  $Kn_{ag}$ ,  $K_{hg}$ ,  $Kn_{pg}$  необходимо рассматривать как зависимости от физико-механических свойств упрочненного слоя режущего элемента рабочего органа:

$$K_{hg} = \frac{12}{HB_g + 100} \sqrt{0.25 \cdot \pi \cdot a^2}, \quad (4)$$

где  $a$  – радиус контакта абразивных частиц грунта с поверхностью рабочего органа;

$$Kn_{ag} = \frac{4 \cdot A_a \cdot K_{Tg}}{\pi \cdot d^2 \cdot \beta^{2/3}}, \quad (5)$$

где  $\beta$  – плотность грунта;  $K_{Tg} = H_{абр} / HB_g$  – коэффициент, учитывающий соотношение твердостей материала абразивных частиц грунта и поверхности режущего элемента рабочего органа;  $A_a$  – площадь контакта режущего элемента рабочего органа с абразивом;  $d$  – усредненный диаметр частиц абразива.

$$Kn_{pg} = \left( \frac{\sigma_a}{\sigma_{-1g} N_G^{-m}} \right)^{-m}, \quad (6)$$

где  $\sigma_a = P / A_a$  – напряжение на поверхности режущего элемента рабочего органа;  $P$  – усилие резания;  $\sigma_{-1g}$  – предел выносливости материала;  $N_G$  – абсцисса перегиба кривой Велера;  $m$  – показатель для материала.

Таким образом, данная модель дополняет известные теории копания и дает возможность учитывать динамику затупления режущей кромки и прогнозировать долговечность режущих элементов рабочих органов СДМ до 1.5 раз точнее по сравнению с расчетами на основе усредненных значений рассматриваемых величин, которые использовали предыдущие исследователи.

**Четвертая глава** посвящена разработке метода упрочнения на основе экспериментальных исследований и последующей обработки их результатов.

Экспериментальные исследования проводились в два этапа. Целью первого этапа являлось подтверждение основной гипотезы о возможности формирования упрочненного слоя требуемой толщины и физико-механических свойств. Данный этап включал в себя:

- экспериментальные исследования по выявлению закономерностей формирования слоя по толщине;
- выявление закономерностей обеспечения требуемых физико-механических свойств упрочненного слоя.

В качестве образцов использовались износостойкие накладки на рабочие органы. При реализации данного этапа экспериментальных исследований упрочняемые образцы подвергались нагреву в контакте с оксидами легирующих элементов и выдерживались в печи в течении 2-8 часов без доступа воздуха, что достигалось посредством создания восстановительной атмосферы.

В ходе второго этапа ставилась задача выявить зависимости между параметрами качества упрочненного слоя и технологическими режимами, которые позволят обеспечить требуемые величины послеремонтной надежности:

- установление зависимостей между режимами упрочнения и толщиной слоя;

- выявление зависимостей для определения режимов закалки образцов, обеспечивающих требуемые физико-механические свойства.

Микротвердость ( $H_{50}$ ) без упрочнения менялась в пределах 1.63-1.75 ГПа, таким образом, использование рассматриваемых решений позволяет увеличить микротвердость более чем в 2 раза.

Определение зависимостей толщины слоя от режимов (температуры  $t^{\circ}\text{C}$  и времени выдержки  $\tau, \text{ч}$ ) проводилось на основе планирования эксперимента. Был использован композиционный план второго порядка. Температура варьировалась в пределах  $900 \dots 1100^{\circ}\text{C}$ , время выдержки  $2 \dots 8 \text{ ч}$ .

В результате расчетов были получены следующие зависимости для определения толщины упрочненного слоя в зависимости от технологических факторов (температуры  $t$ , и времени выдержки  $\tau$ ):

$$\text{FeO: } g = 5,8 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 - 4,167 \cdot 10^{-6} \cdot t \cdot \tau - 8,689 \cdot 10^{-3} \cdot t + 3,111 \cdot 10^{-3} \cdot \tau^2 + 3,722 \cdot 10^{-3} \cdot \tau + 3,281$$

$$\text{Cr}_2\text{O}_3: g = 4,7 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 + 1,7 \cdot 10^{-4} \cdot t \cdot \tau - 7,32 \cdot 10^{-3} \cdot t + 0,012 \cdot \tau^2 - 0,243 \cdot \tau + 3,124$$

$$\text{MoO}_2: g = 2,03 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 - 3,7 \cdot 10^{-4} \cdot t \cdot \tau - 0,03 \cdot t + 0,049 \cdot \tau^2 - 0,029 \cdot \tau + 11,291$$

Толщина упрочненного слоя в случае использования оксидов FeO и  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  достигает 1 мм, а при использовании оксида  $\text{MoO}_2$  – 3 мм.

Также было установлено, что на поверхности имеется дефектный слой с малой твердостью (ферритная кайма). Было установлено, что толщина дефектного слоя составляет в среднем 30% от упрочненного слоя для FeO, а для  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  и  $\text{MoO}_2$  – 10%.

На рисунках 7-9 приведены графики распределения микротвердости по толщине слоя и зависимость толщины дефектного слоя при взаимодействии с оксидами железа, хрома и молибдена.

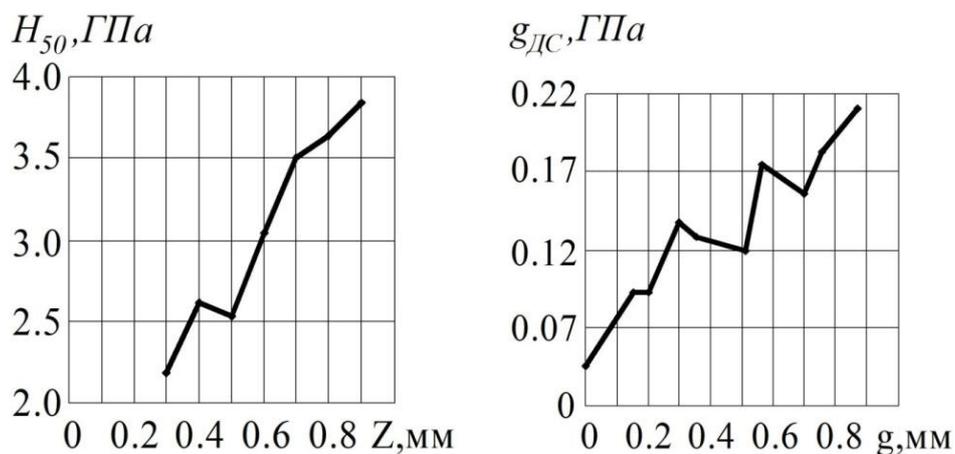


Рисунок 7 – Распределение микротвердости по толщине слоя и зависимость толщины дефектного слоя от толщины упрочненного слоя (Оксид FeO)

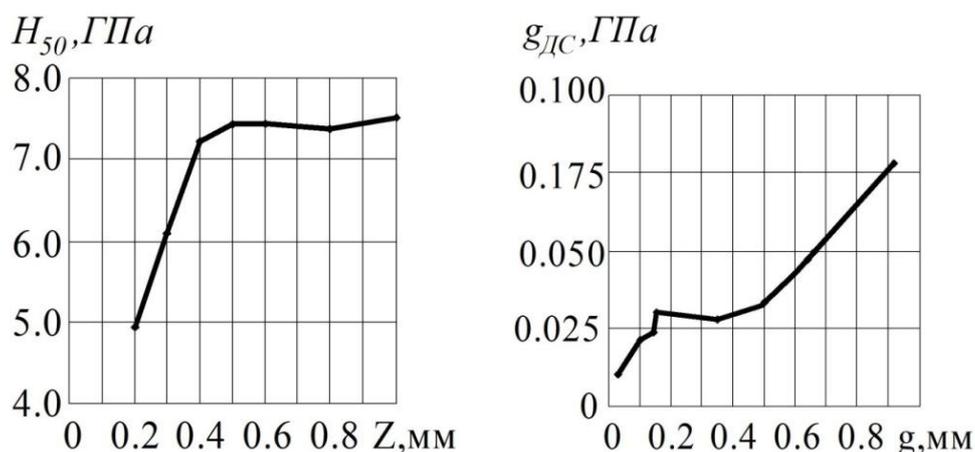


Рисунок 8 – Распределение микротвердости по толщине слоя и зависимость толщины дефектного слоя от толщины упрочненного слоя (Оксид Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

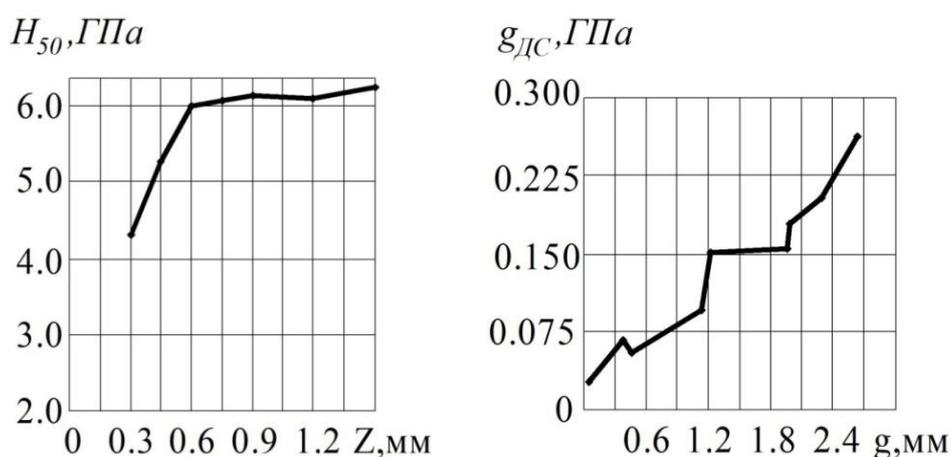


Рисунок 9 – Распределение микротвердости по толщине слоя и зависимость толщины дефектного слоя от толщины упрочненного слоя (Оксид MoO<sub>2</sub>)

Изучалось влияние толщины слоя на прочность с использованием программного пакета Ansys. Определение граничных условий выполнялось экспериментально на прессе П-150М с максимальным усилием сжатия 15000 Н. Был выполнен полный факторный эксперимент, в результате которого получена зависимость предела прочности в зависимости от диаметра образца ( $d_{обр}$ ) и толщины упрочненного слоя ( $g$ ):

$$\sigma_b = 0,23 \cdot d_{обр}^2 - 0,42 \cdot d_{обр} \cdot g - 21,5 \cdot d_{обр} - 9,92 \cdot g^2 + 80,18 \cdot g + 1016,16$$

Также изучалась жесткость образцов без упрочнения и с упрочнением. В результате исследований разработанного метода упрочнения показана возможность увеличения прочности материала до 2,5 раз по сравнению с аналогичными характеристиками при отсутствии упрочнения.

Таким образом, разработанный метод упрочнения дает возможность получать на поверхности чугуна слой толщиной до 3 мм (что в 10-15 раз больше, чем при использовании других применяемых в промышленной практике технологий поверхностного упрочнения чугунов). При этом вместо дорогостоящих расходных материалов (феррохрома и т.д.) используются оксиды элементов.

Экспериментальные исследования проводились в контакте образца с абразивной лентой на испытательной машине. Результаты исследований приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты экспериментальной оценки гамма-процентного ресурса образцов по результатам испытаний в контакте с абразивной лентой

Образец	L, мм	$\Delta m_{cp}$ , г	$t_{\gamma}$ , ч, при $u_p=95\%$
СЧ20	100	0,0086	114
СЧ20упрочнение FeO	100	0,0039	253
СЧ20упрочнение Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	100	0.00023	429
СЧ20 упрочнение MoO <sub>2</sub>	100	0.00027	365
Хромистый чугун (15% Cr)	100	0.00019	511

В результате экспериментальных исследований было установлено, что величина гамма-процентного ресурса образца с упрочненным слоем увеличилась более чем в два раза по сравнению с исходным материалом.

Таким образом использование разработанного метода упрочнения позволяет увеличить прочность в 2,5 раза, повысить износостойкость в 2 раза и расширить спектр использования более дешевого материала – серого чугуна.

**Пятая глава** посвящена проведению исследований долговечности рабочих органов строительно-дорожных машин с упрочненным слоем.

По результатам экспериментальных исследований, проведенных в главе 4, были получены зависимости параметров, входящих в выражение (3), учитывающие как параметры износостойких элементов рабочих органов строительно-дорожных машин, так и физико-механические свойства грунта.

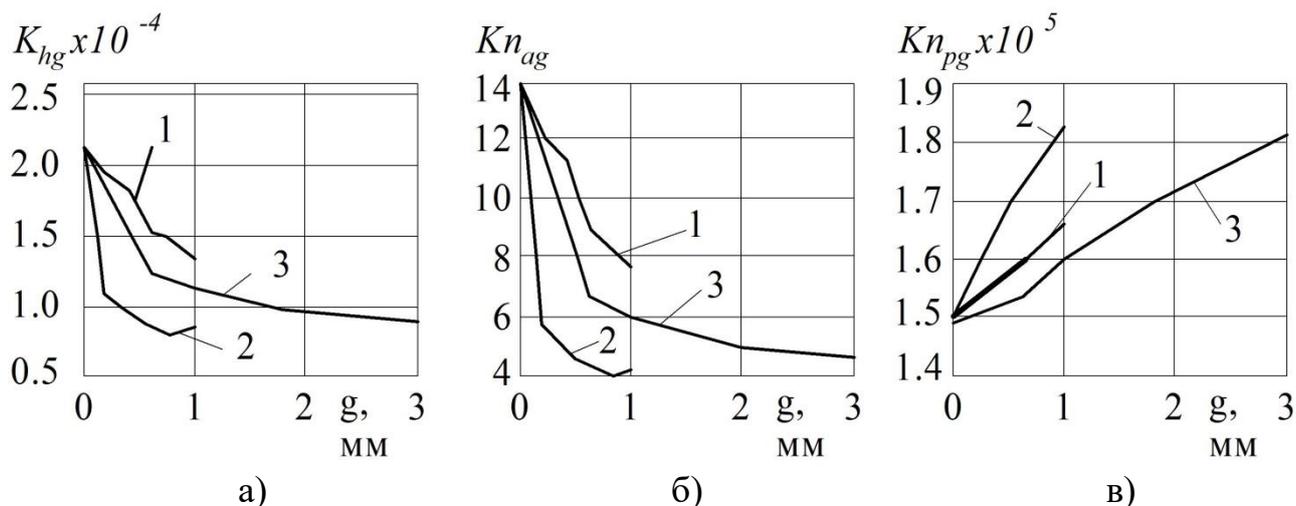


Рисунок 9 – Пример зависимостей параметров для определения интенсивности изнашивания от толщины упрочненного слоя (для зубьев ковшей экскаватора 2 размерной группы, содержащих износостойкие элементы (грунт IV категории): а) оксид FeO; б) оксид Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; в) оксид MoO<sub>2</sub>

На рисунке 10 представлена расчетная схема для определения интенсивности изнашивания зубьев ковша экскаватора, содержащих износостойкие элементы с упрочненным слоем. Составляющие силы копания определялись на основе теории Н.Г. Домбровского.

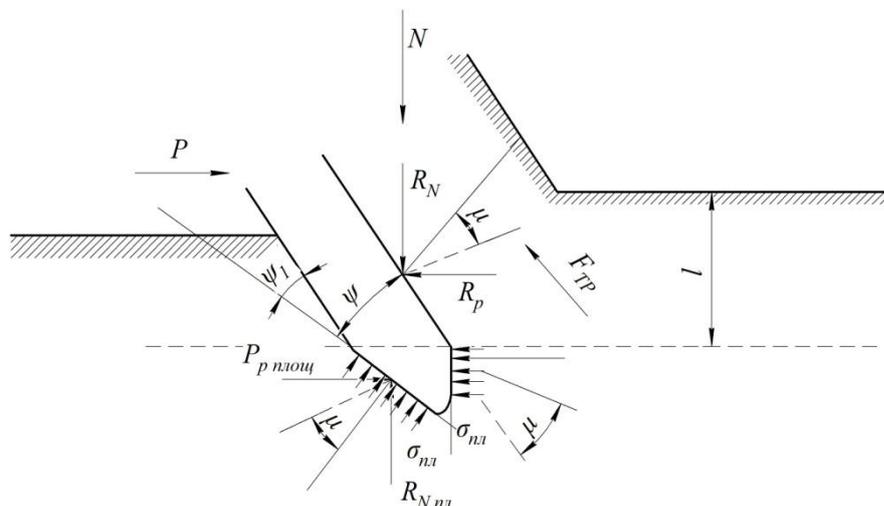


Рисунок 10 – Расчетная схема взаимодействия зуба экскаватора с разрабатываемым грунтом

Расчеты производились с использованием выражений (3-6). Ввиду переменного характера распределения твердости расчет производился послойно. На рисунке 11 приведены результаты расчетов интенсивности изнашивания зубьев ковша экскаватора 2 размерной группы при разработке грунта IV категории.

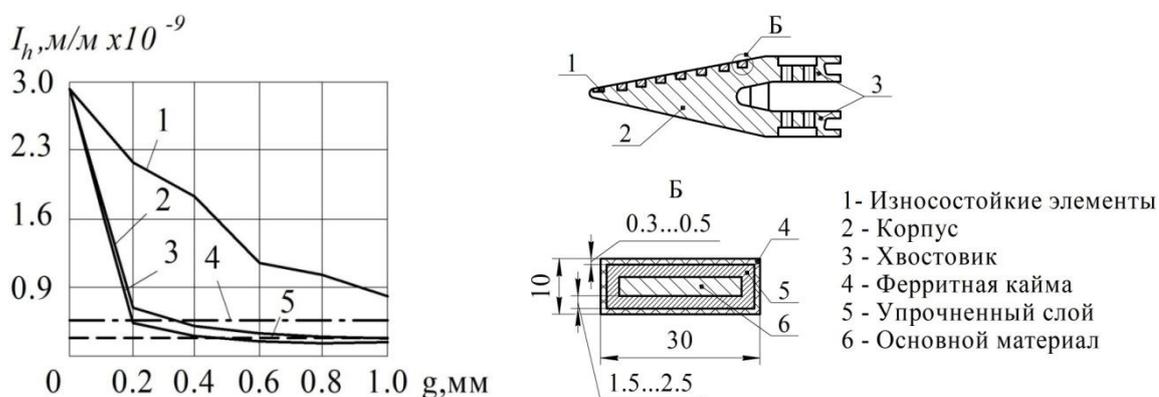


Рисунок 11 – Расчетная зависимость интенсивности изнашивания по толщине слоя для зубьев ковшей экскаватора, содержащих износостойкие элементы (грунт IV категории):  
 1 - легирование FeO; 2 - легирование Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 3 - легирование MoO<sub>2</sub>; 4 – чугун ИЧХ-28;  
 5 – белохромистый чугун

Значения гамма-процентного ресурса зубьев ковша экскаватора 3-й размерной группы с износостойкими накладками при разработке грунта IV категории определялись по формуле (1) и приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения гамма-процентного ресурса для зубьев ковша экскаватора, содержащих износостойкие накладки

Материал	Вид упрочнения	$t_{\text{теор}}, \text{ч}, u_p=95\%$
СЧ-20	Легирование $\text{Cr}_2\text{O}_3$	667
ИЧХ-28	Закалка	715
БХЧ	Закалка	789
СЧ-20	Легирование $\text{MoO}_2$	752

Также был произведен расчет гамма-процентного ресурса для упрочненного слоя, при котором твердость принималась усредненной. Все параметры, входящие в выражения (3)-(6) принимались усредненными. В частности, для легирования  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  погрешность составляла 26%.

Аналогичным образом были произведены расчеты для отвала бульдозера. Пример результатов расчета приведен в таблице 3 и на рисунке 12.

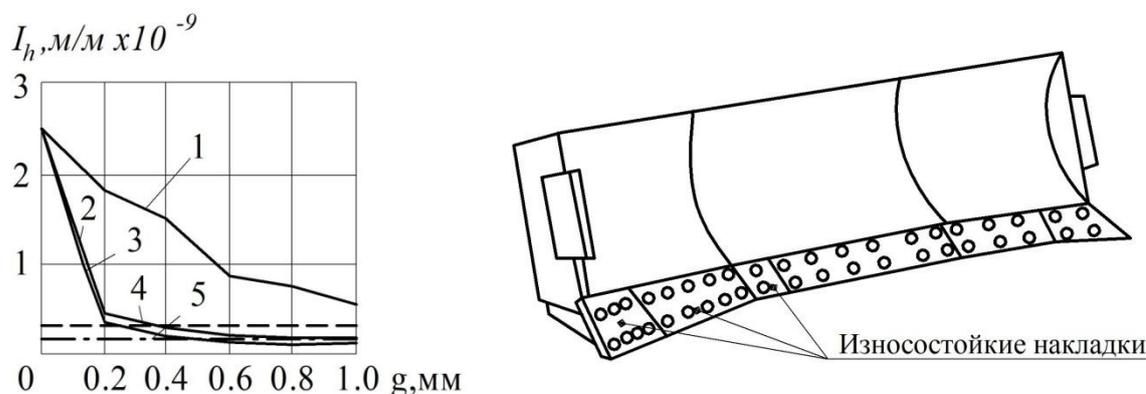


Рисунок 12 – Расчетная зависимость интенсивности изнашивания по толщине слоя для ножей бульдозера, содержащих износостойкие элементы (грунт IV категории)  
 1 - легирование  $\text{FeO}$ ; 2 - легирование  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ; 3 - легирование  $\text{MoO}_2$ ; 4 – чугун ИЧХ-28; 5 – белохромистый чугун

Таблица 3 – Значения гамма-процентного ресурса для ножей бульдозера, содержащих износостойкие накладки

Материал	Вид упрочнения	$t_{\text{теор}}, \text{ч}, u_p=95\%$
СЧ-20	Легирование $\text{Cr}_2\text{O}_3$	834
ИЧХ-28	Закалка	925
БХЧ	Закалка	962
СЧ-20	Легирование $\text{MoO}_2$	955

Как видно из представленных данных, применение упрочнения накладок режущих элементов рабочих органов строительных и дорожных машин, изготовленных из серого чугуна, позволяет повысить их гамма-процентный ресурс до величины, близкой к величине гамма-процентного ресурса накладок, изготовленных из износостойкого чугуна.

В шестой главе рассмотрены вопросы повышения долговечности шарниров рабочего оборудования. Достаточно важным фактором, определяющим долговечность, является время приработки. Наличие дефектного слоя (ферритной каймы) позволяет сократить период приработки узлов. В качестве примера

рассматривались втулки проушины ковша. Расчеты проводились на основе использования зависимостей И.В. Крагельского.

В данном случае контакт с рабочей средой отсутствует, характер изменения твердости в упрочненном слое учитывался посредством учета изменения коэффициента молекулярной составляющей силы трения  $f_{mHBg}$ :

$$I_h = 0.24 \cdot 0.5^{ty - \frac{5}{4}} \cdot 15^{\frac{2ty}{5}} \cdot \alpha \cdot K_{tv} \cdot p \cdot E^{\frac{ty-1}{5}} \cdot \tau_0^{12} \cdot \alpha_G^{\frac{ty}{2}} \cdot \left( \frac{k \cdot f_{mHBg}}{\sigma_0} \right)^{ty}, \quad (7)$$

где  $\sigma_0$  – напряжение, которое вызывает разрушение материала при однократном нагружении;  $t_y$  – параметр кривой фрикционной усталости;  $K_{tv}$  – поправочный коэффициент;  $\alpha$  – коэффициент, учитывающий соотношение площадей контакта;  $\alpha_G$  – коэффициент гистерезисных потерь;  $p$  – контактное давление.

Для сравнения был произведен расчет для двух вариантов:

1. Контакт стального пальца и втулки проушины ковша из высокопрочного закаленного чугуна. Твердость принималась равной НВ=500. Ширина контакта  $b_h=10$  мм. Толщина изнашиваемого слоя принималась равной  $h=1$  мм. Диаметры принимались равными  $D_1=D_2=100$  мм. Величина ресурса работы при указанных выше условиях для рассматриваемой пары составила  $t_1=21992$  ч. Расчеты выполнялись при величине силы, соответствующей разработке грунта ковшом экскаватора объемом  $0.3$  м<sup>3</sup>.

2. Контакт пальца из стали с втулкой проушины ковша из серого чугуна с упрочненным слоем. Ввиду того, что твердость слоя меняется по мере продвижения вглубь сплава, расчеты проводились послойно.

На рисунке 13 представлены результаты расчетов времени изнашивания втулки проушины ковша погрузчика. Как видно из представленных зависимостей общая износостойкость упрочненного слоя превышает аналогичный показатель для высокопрочного закаленного чугуна на 15 %.

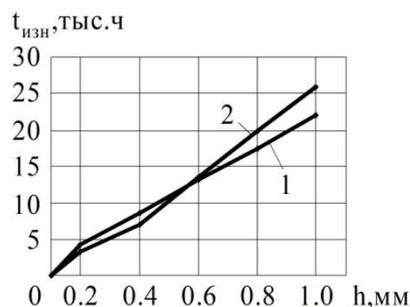


Рисунок 13 – Зависимости  $t_{изн}=f(h)$ : 1 – взаимодействие стального пальца и втулки проушины ковша из высокопрочного закаленного чугуна; 2 – взаимодействие стального пальца и втулки проушины ковша с упрочненным слоем

Введение функции изменения коэффициента трения позволяет вычислять значения износа узлов, имеющих обратное распределение твердости и не контактирующих с рабочей средой, с погрешностью не превышающей 10%.

В целом расчеты показали, что имеется возможность сокращения периода приработки более чем в 1.5 раза и общего повышения долговечности шарниров рабочего оборудования строительного-дорожных машин до 30%.

Помимо микротвердости на интенсивность изнашивания оказывает влияние шероховатость поверхности. Как было отмечено выше, при чистовой обработке шарниров рабочего оборудования строительного-дорожного машин существенным фактором, влияющим на образование шероховатости, являются вибрации. Поэтому были проведены исследования изменения их характера по мере износа режущего инструмента при токарной обработке.

Исследование механической обработки образцов производилось на токарных станках с числовым программным управлением 16К20Ф3 и 1И611ПФ2.

Режимы резания в ходе экспериментов варьировались в пределах: скорость резания  $V = 100 \dots 315 \text{ м/мин}$ , подача  $S = 0.07 \dots 0.2 \text{ мм/об}$ , глубина резания  $t = 0.25 \dots 1.5 \text{ мм}$ . В качестве режущего инструмента использовались стандартные резцы с механическим креплением режущих пластин.

В результате исследования установлено, что наиболее чувствительная полоса спектра к изменению режимов резания от 6 кГц до 12 кГц. Все дальнейшие исследования сигналов проводились в данном частотном диапазоне. Адекватность полученных данных была подтверждена проверкой результатов анализа сигналов виброакустики при помощи аттестованной измерительной аппаратуры – анализатора спектра ZET017-U8. Посредством расчета коэффициентов корреляции были выбраны параметры для оценки износа режущего инструмента: мощность вибросигнала в частотном диапазоне от 6 до 12 кГц и корреляционная энтропия. Была разработана структурная схема и программно-аппаратный комплекс, реализующий устройство контроля износа инструмента при обработке резанием, использование которого позволяет обеспечить требуемые параметры качества поверхностного слоя шарниров рабочего оборудования строительного-дорожного машин.

Был выполнен расчет наработки на отказ втулок проушины ковша экскаватора с упрочненным слоем. Значения математического ожидания наработки и ее рассеяния определялись следующим образом:

$$R_1 = \frac{I_{\max}(1+v_h^2)}{V_H} - I_{\max}v_h\sqrt{1+2v_h^2}/V_H\sqrt{\ln(n)}, \quad (8)$$

$$\sigma_1 = \pi I_{\max}v_h\sqrt{1+2v_h^2}/V_H\sqrt{6\ln(n)}, \quad (9)$$

где  $n$  – количество втулок;  $v_h$  – коэффициент вариации;  $I_{\max}$  – максимально допустимый износ.

Таблица 4 – Результаты расчетов скорости изнашивания втулок проушины ковша погрузчика

Наименование детали	Материал, упрочнение	$V_H$ , мкм/ч (до / после ремонта)
Втулка проушины ковша 1	Высокопрочный закаленный чугун	0,95/0,95
Втулка проушины ковша 2	Сталь 12ХНЗА цементация + закалка	1,1/1,8
Втулка проушины ковша 3	Поверхностное упрочнение в контакте с оксидом молибдена	0,88/0,82

Учитывая обратный характер распределения твердости, был выполнен расчет наработки на отказ для указанных выше втулок проушины ковша при восстановлении в ремонтный размер.

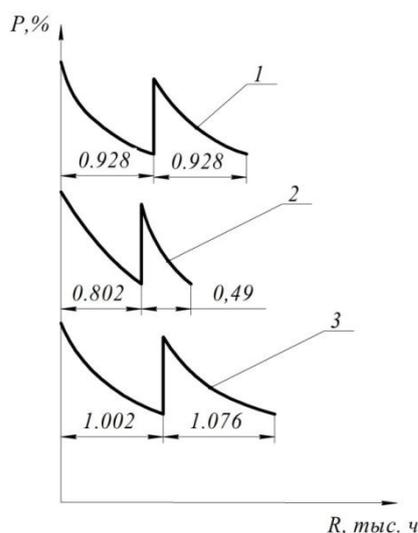


Рисунок 14 – Вероятность безотказной работы втулок проушины ковша после ремонтного растачивания

1 – высокопрочный закаленный чугун; 2 – сталь 12ХН3А, упрочнение, цементация + закалка; 3 – серый чугун, поверхностное упрочнение в контакте с оксидом молибдена

Как можно видеть из представленных зависимостей, расчетные значения вероятности безотказной работы после обработки в ремонтный размер увеличиваются на 5-10%.

В **седьмой главе** рассмотрены вопросы прогнозирования долговечности рабочего оборудования строительно-дорожных машин и оценки эффективности полученных результатов экспериментальных исследований.

Зубья с износостойкими накладками (рисунок 15, а) и футеровочные пластины (рисунок 15, б), упрочненные в соответствии с разработанным методом, были изготовлены на ООО «Спецтехсервис» и установлены на ковш экскаватора второй размерной группы (рисунок 5, в).

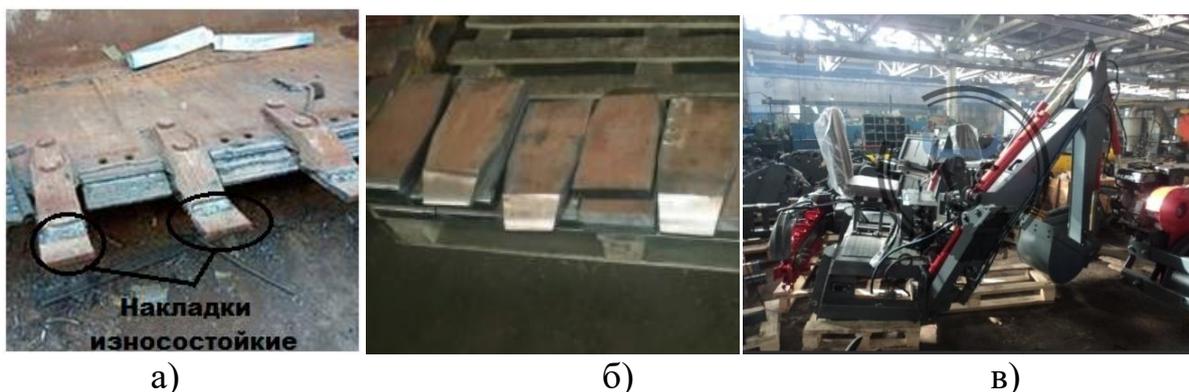


Рисунок 15 – Примеры использования износостойких элементов: а) зубья с износостойкими накладками; б) футеровочные пластины; в) установка зубьев с износостойкими элементами на ковш экскаватора в ООО «Спецтехсервис»

В ходе проведения испытаний экскаватором производилась разработка связного грунта III и IV категории с плотностью 1600-2000 кг/м<sup>3</sup>, коэффициент

разрыхления 1,2-1,35, удельное сопротивление грунта резанию 150-300 КПа. В таблице 6 приведены средняя долговечность износостойких накладок зубьев ковша экскаватора, полученные в ходе испытаний, а также расчетная величина гамма-процентного ресурса, полученная с использованием выражений (1-6). Аналогичные данные приведены для отвала бульдозера.

Таблица 6 – Результаты испытаний зубьев ковша экскаватора и отвала бульдозера с износостойкими накладками

Название детали	Материал	Способ упрочнения	Твердость	Средняя долговечность по результатам испытаний, ч	Расчетная величина гамма-процентного ресурса $t_{\gamma}$ , ч, $\alpha_p=95\%$
Зуб ковша экскаватора 2 размерной группы	110Г13Л	Без упрочнения	НВ 229	262	225
	СЧ-20	Легирование $MoO_2$ + закалка	НВ 580-600	285	256
Нож отвала бульдозера (бульдозер относится к группе «средние» по тяговому усилию)	110Г13Л	Без упрочнения	НВ 229	584	548
	СЧ-20	Легирование $MoO_2$ + закалка	НВ 580-600	689	643

Испытания износостойких элементов, упрочненных в соответствии с разработанным методом, проводились на минипогрузчике Termit 1000 производства Курганского завода дорожных машин. Условия проведения испытаний – проведение работ по перегрузке насыпных грунтов (щебня) при дорожном строительстве. Гранулометрический состав щебня 10-20 и 20-40, лещадность III-IV группа, твердость НВ740-820, насыпная плотность 1250 кг/м<sup>3</sup>.

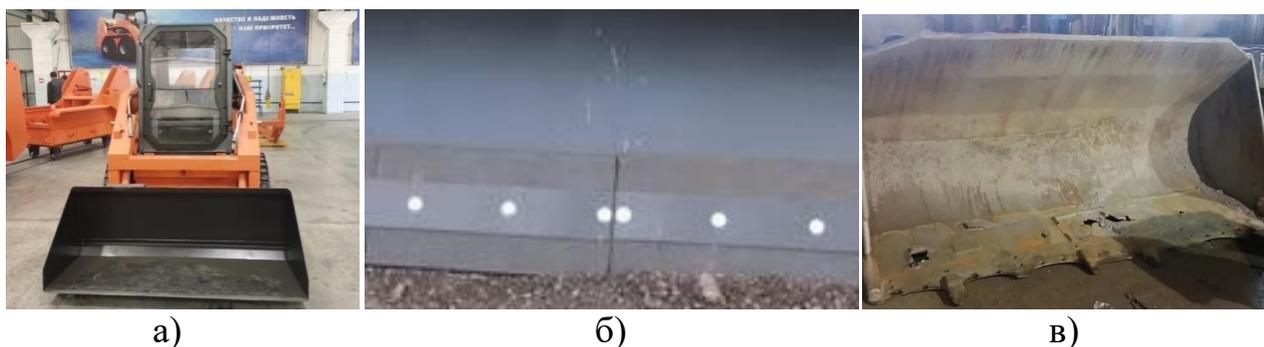


Рисунок 16 – Использование износостойких элементов для ковшей минипогрузчиков: а) минипогрузчик Termit 1000; б) пример установки износостойких элементов на ковш; в) ковш минипогрузчика Termit 1000 без износостойких элементов через 2 месяца работы

Средняя долговечность износостойких элементов ковша минипогрузчика Termit 1000, полученная в ходе испытаний, и расчетные значения гамма-процентного ресурса приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Результаты испытаний износостойких накладок ковша минипогрузчика Termit 1000

Название детали	Материал	Способ упрочнения	Твердость	Средняя долговечность по результатам испытаний, ч	Расчетная величина гамма-процентного ресурса $t_\gamma$ , ч, $u_p=95\%$
Ковш мини-погрузчика	110Г13Л	Без упрочнения	НВ 229	612	587
	СЧ-20	Легирование $MoO_2$ + закалка	НВ 580-600	745	708

Как видно из представленных результатов, использование предлагаемых решений позволяет снизить скорость изнашивания и повысить долговечность рабочих органов строительно-дорожных машин при разработке связных грунтов и работе с дискретными материалами на 15-20%.

Кроме того, из таблиц 6 и 7 видно, что расчетные значения гамма-процентного ресурса меньше чем величины, полученные в результате испытаний. Следовательно, при использовании значений гамма-процентного ресурса, полученных теоретически для планирования ремонта и восстановления элементов рабочего оборудования может возникнуть ситуация, когда ресурс выработан не полностью. Данное обстоятельство объясняется неопределенностью входных параметров.

Для решения данной проблемы была разработана модель экспертной системы с гибким логическим блоком, построенным на нечеткой логике, которая позволяет повысить эффективность планирования ремонтных мероприятий. Логический блок позволяет оценить необходимость ремонта при достижении наработки, соответствующей расчетному значению  $t_\gamma$ .

В качестве входных параметров задействованы коэффициенты использования сменного времени ( $K_B$ ) и интенсивности использования машин ( $K_A$ ), рекомендованные для разработки сметных норм. Выходная переменная – это риск выхода из строя ( $Risk$ ). Данная переменная имеет значения:

- «средний уровень риска», при этом рекомендуется снизить интенсивность использования;
- «высокий уровень риска», при этом рекомендуется сменить категорию работ;
- «критический уровень риска», при этом рекомендуется вывести машину из эксплуатации и отправить в ремонт.

Функция нечеткой логики для экскаваторов задается следующей системой правил:

- если  $K_B < 0,4$  и  $K_A < 0,75$ , то  $Risk =$  «средний уровень риска»;
- если  $0,4 \leq K_B \leq 0,6$  и  $K_A < 0,75$ , то  $Risk =$  «средний уровень риска»;
- если  $0,4 \leq K_B \leq 0,6$  и  $0,75 \leq K_A \leq 1,0$ , то  $Risk =$  «высокий уровень риска»;
- если  $K_B > 0,6$  и  $0,75 \leq K_A \leq 1,0$ , то  $Risk =$  «критический уровень риска»;
- если  $K_B > 0,6$  и  $K_A > 1,0$ , то  $Risk =$  «критический уровень риска».

В настоящее время на строительно-дорожные машины, изготавливаемые Курганским заводом дорожных машин, устанавливаются бортовые компьютеры (рисунок 17), которые позволяют собирать статистические данные по величине наработки и режимах работы машины. Предлагаемая экспертная система может быть встроена в программное обеспечение бортового компьютера для более эффективной оценки риска и планирования на этой основе мероприятий по ремонту и замене элементов рабочих органов строительно-дорожных машин, в частности для минипогрузчиков Termit 1000.

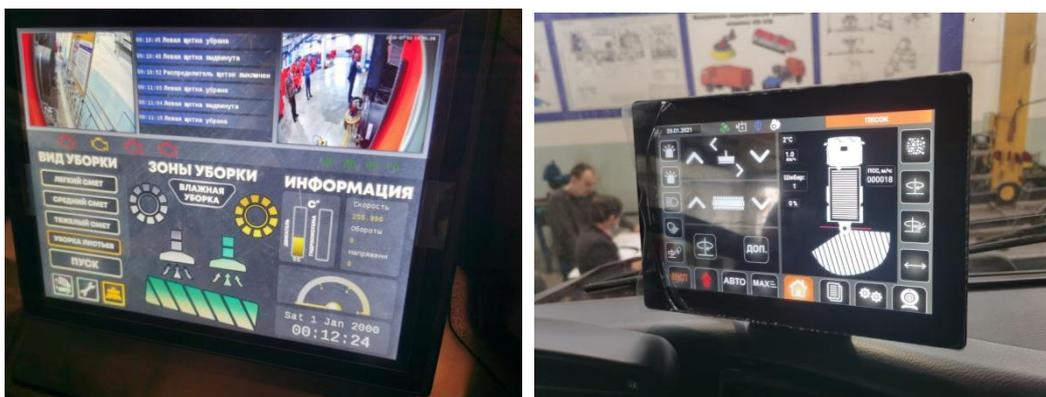


Рисунок 17 – Пример интерфейса бортового компьютера машин Курганского завода дорожных машин

В результате оценки технического уровня разработанного в ходе исследований метода упрочнения было установлено, что предлагаемое решение существенно превосходит аналоги, которые традиционно используются для повышения долговечности рабочих органов строительно-дорожных машин (наплавку и индукционную пайку). Коэффициент технического уровня по сравнению с аналогом «пайка» составляет 1,6, а с аналогом «наплавка» - 1,92.

По результатам экономических расчетов затраты на изготовление износостойкого элемента из серого чугуна составили 292 руб., а на изготовление двухкомпонентной защиты из износостойкого чугуна со стальным основанием 400 руб без учета стоимости припоя. Таким образом снижение затрат составляет до 27%.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Введены новые термины, характеризующие процесс взаимодействия рабочих органов строительно-дорожных машин с грунтом, имеющим абразивные свойства, в частности, техногенным: «коэффициент числа частиц грунта, взаимодействующих с поверхностью режущего элемента», «коэффициент глубины внедрения абразивных частиц грунта в поверхность режущего элемента» и «коэффициент числа рабочих циклов процесса копания циклов, приводящих к разрушению материала». Это позволяет более корректно учитывать влияние абразивных свойств грунта на долговечность рабочих органов строительно-

дорожных машин по сравнению с традиционными характеристиками грунта по ГОСТ 12536-2014.

2. Разработан комплекс математических моделей, позволяющих прогнозировать:

- динамику изнашивания режущей кромки и значение наработки, которое соответствует достижению предельного состояния, и более корректно определять величину межремонтного интервала в зависимости от вида разрабатываемого грунта, физико-механических свойств материала рабочих органов и режимов разработки грунта. Данные модели позволяют до 1,5 раз точнее определять значение гамма-процентного ресурса для износостойких элементов рабочих органов с поверхностным упрочнением;

- вероятность безотказной работы узлов, содержащих упрочненный слой, после обработки под ремонтный размер.

3. На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработан новый метод повышения долговечности рабочих органов и шарниров рабочего оборудования строительного-дорожных машин, который позволяет получать упрочненный слой толщиной до 3 мм. Решения защищены патентами № 2614227, № 2486031, № 2493289, № 186172, № 210779, № 200310.

4. Разработаны технологические рекомендации в виде зависимостей для определения параметров легирования, закалки и составляющих припуска под последующую механическую обработку ремонтируемых деталей строительного-дорожных машин. Решения защищены патентами № 2614227, № 2486031, № 2493289, № 186172.

5. Проведены теоретические исследования профиля шероховатости поверхности деталей на основе теории случайных процессов и методов фрактальной геометрии, которые показывают, что при уменьшении среднеарифметического отклонения профиля растет доля случайной компоненты и увеличивается влияние вибраций при обработке на формирование профиля поверхности. Разработана структурная схема и программно-аппаратный комплекс, позволяющий производить автоматический контроль состояния режущего инструмента, выполнять своевременную замену изношенного инструмента и обеспечить требуемые параметры шероховатости поверхности шарниров рабочего оборудования строительного-дорожных машин. Разработки защищены патентами № 166356, № 143324.

6. Проведены экспериментальные исследования и апробация полученных результатов в реальных условиях эксплуатации, которые подтвердили справедливость теоретических исследований. По результатам испытаний и экспериментальных исследований установлено, что предлагаемые решения обеспечивают повышение долговечности рабочего оборудования строительного-дорожных машин (по показателю гамма-процентного ресурса на 18-25%). По результатам экономических расчетов затраты на изготовление износостойкого элемента из серого чугуна составили 292 руб., а на изготовление двухкомпонентной защиты из износостойкого чугуна со стальным основанием – 400 руб без учета стоимости припоя. Таким образом, снижение затрат составляет 27%.

На основании разработанных теоретических и экспериментальных положений в настоящей работе предложено решение научно-технической проблемы повышения долговечности рабочего оборудования строительно-дорожных машин, имеющей важное народнохозяйственное и социальное значение. Направлением для дальнейших исследований является развитие системы планирования ремонта и технического обслуживания рабочего оборудования строительно-дорожных машин за счет совершенствования разработанных теоретических и риск-ориентированных моделей на основе реальной эксплуатационной информации, получаемой с бортовых компьютеров СДМ, и создания цифровых двойников рабочего оборудования строительно-дорожных машин.

**Основное содержание диссертации изложено в следующих публикациях:**

**Научные публикации по теме диссертации в изданиях,  
рекомендованных ВАК РФ для докторских диссертаций**

1. Овсянников, В.Е. Перспективы применения диффузионного легирования для деталей рабочих органов строительно-дорожных машин / В.Е. Овсянников, В.И. Васильев, В.А. Фролов // Научно-технический вестник БГУ, 2020. – №3. – С. 411-419.
2. Овсянников, В.Е. Некоторые аспекты применения износостойких чугуновых накладок для повышения долговечности отвалов дорожных машин / В.Е. Овсянников, Р.Ю. Некрасов, Д.Е. Васьков, В.И. Васильев // Журнал «Строительные и Дорожные машины», 2020. – №7. – С. 35-38.
3. Овсянников В.Е. Повышение долговечности чугуновых гильз двигателей строительно-дорожных машин / В.Е. Овсянников, В.И. Васильев // Журнал «Грузовик», 2020. – №11. – С. 35-38.
4. Овсянников, В.Е. Исследование дефектного слоя после поверхностного легирования чугуновых блоков цилиндров двигателей экскаваторов / В.Е. Овсянников, В.И. Васильев // Журнал «Строительные и Дорожные машины», 2019. – №10. – С. 19-24.
5. Овсянников, В.Е. Повышение долговечности строительно-дорожных машин на основе совершенствования ремонта узлов трения / В.Е. Овсянников // Научно-технический вестник БГУ, 2019. – №3. – С. 377-385.
6. Овсянников, В.Е. Применение расчетного метода для оценки работоспособности деталей тормозных систем строительно-дорожных машин / В.Е. Овсянников, Г.Н Шпитко // Известия МГТУ МАМИ, 2019. – №4. С. 49-53.
7. Овсянников, В.Е. Повышение эффективности метода ремонтных размеров при восстановлении деталей строительно-дорожных машин из серого чугуна / В.Е. Овсянников, В.И. Васильев // Вестник СибАДИ, 2019. – №6. – С. 658-668.
8. Овсянников, В.Е. Повышение прочности чугуновых гильз цилиндров двигателей строительно-дорожных машин / В.Е. Овсянников, Р.Ю. Некрасов, Д.Е. Васьков, Г.Н. Шпитко // Известия МГТУ МАМИ, 2020. – №3. С. 22-26.

9. Овсянников, В.Е. К вопросу применимости расчетного метода оценки сопротивления износу деталей после термодиффузионного упрочнения / В.Е. Овсянников, В.И. Васильев // Вестник СибАДИ, 2018. – №3 (61). – С. 412-420.
10. Овсянников, В.Е. Контроль износа инструмента при токарной обработке деталей строительно-дорожных машин в условиях ремонтного производства / В.Е. Овсянников, В.И. Васильев // Научно-технический вестник БГУ, 2019. – №4. – С. 488-496.
11. Овсянников, В.Е. Моделирование колебаний при ремонтном растачивании деталей строительно-дорожных машин / В.Е. Овсянников, В.И. Васильев, Р.Ю. Некрасов // Вестник СибАДИ, 2019. – №5. – С. 534-542.
12. Гуревич, Ю.Г. Диффузионное хромирование деталей из феррито-перлитного серого чугуна / Ю.Г. Гуревич, В.Е. Овсянников В.А. Фролов // Машиностроение и инженерное образование, 2011. – № 2 (27). – С. 2-10.
13. Гуревич, Ю.Г. Технология упрочнения деталей из серого чугуна / Ю.Г. Гуревич, В.Е. Овсянников, В.А. Фролов // Известия Самарского научного центра РАН. – Самара: Изд-во Самарского научного центра РАН, 2011. – С. 1018-1021.
14. Гуревич Ю.Г. Теоретические основы технологии повышения износостойкости деталей из серого чугуна / Ю.Г. Гуревич, В.Е. Овсянников, В.А. Фролов // Известия Самарского научного центра РАН. – Самара: Изд-во Самарского научного центра РАН, 2011. – С. 1021-1025.
15. Гуревич, Ю.Г. Поверхностная закалка деталей из феррито-перлитного серого чугуна / Ю.Г. Гуревич, В.Е. Овсянников, В.А. Фролов, П.А. Суханов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2012. № 10 (94). С. 3-5.
16. Гуревич, Ю.Г. Термодинамика реакций на поверхности металлов и сплавов / Ю.Г. Гуревич, В.Е. Овсянников // Вестник Саратовского государственного технического университета, 2012. – Т. 2. № 1 (65). – С. 69-73.
17. Гуревич, Ю.Г. Поверхностное упрочнение феррито-перлитного серого чугуна взаимодействием с оксидом молибдена / Ю.Г. Гуревич, В.Е. Овсянников, В.А. Фролов // Упрочняющие технологии и покрытия, 2013. – № 6 (102). – С. 7-9.
18. Гуревич, Ю.Г. Выглаживатель из феррито-перлитного серого чугуна с легированной молибденом рабочей поверхностью / Ю.Г. Гуревич, В.Е. Овсянников, В.А. Фролов // Технология машиностроения. 2013. № 6. С. 18-21.
19. Чудинова, Е.А. Теплотехнический расчет режимов получения композиционного материала для изготовления выглаживателей / Е.А. Чудинова, В.Е. Овсянников // Вестник КузГТУ №1. - Кемерово, 2013. - С. 56-57.
20. Овсянников, В.Е. Применение вейвлет-анализа для оценки параметров качества поверхностного слоя деталей машин / В.Е. Овсянников // Вестник КузГТУ. - 2014. - №2. - С. 56-57..
21. Чудинова, Е.А. Перспективы применения композиционного материала сталь-белый чугун для изготовления выглаживателей / Е.А. Чудинова, В.Е. Овсянников // Вестник КузГТУ №3. - Кемерово, 2013. - С. 55-56.

22. Остапчук, А.К. Применение теории случайных процессов для моделирования параметров качества деталей машин / А.К. Остапчук, В.Е. Овсянников // Вестник КузГТУ №3. - Кемерово, 2013. - С. 75-78.

### **В изданиях, включенных в базы цитирования Web of Science и Scopus**

1. Ovsyannikov V.E. Peculiar features of formation of surface roughness profile upon mechanical processing of iron parts of handling machines after diffusion alloying / Ovsyannikov V.E., Vasiliev V.I., Ziganshin R.A., Terekhov A.S. // International journal of mechanical engineering and technology. – 2018. – №3. – pp. 1061-1067.

2. Ovsyannikov V.E. Influence of diffusional surface alloying on the hardened-layer thickness for gray-iron machine parts / Ovsyannikov V.E., Vasiliev V.I., Nekrasov R.Yu, Tempel Y.A. // Russian engineering research. – 2018. – №48 – pp. 901-903.

3. Ovsyannikov V.E. Using surface diffusion hardening in the manufacturing and repair technology of industrial vehicle components / Ovsyannikov V.E., Vasiliev V.I., Ziganshin R.A. // International journal of mechanical engineering and technology. – 2017. - №9. – pp. 399-406.

4. Ovsyannikov V.E. Determination of quenching modes after thermodiffusion hardening of parts from gray cast iron / Ovsyannikov V.E., Vasiliev V.I., Nekrasov R.Yu // Proceeding of the international conference issues of mechanical engineering (AIME). – 2017. – pp. 537-542.

5. Gurevich Y.G. Diffusion chromizing of grey iron by reaction with chromiumoxide / Gurevich Y.G, Ovsyannikov V.E., Frolov V.A. // Metallurgist. – 2012. – pp. 854-858.

6. Gurevich Y.G. Development of technology for strengthening gray iron components by heating with iron scale / Gurevich Y.G, Ovsyannikov V.E., Frolov V.A. // Metallurgist. – 2012. – pp. 526-529.

7. Gurevich Y.G. Surface hardening of parts from ferrite-pearlite gray iron / Gurevich Y.G., Ovsyannikov V.E., Marfitsyn V.V., Frolov V.A. // Metal science and heat treatment. – 2011. – pp. 318-321.

### **Монографии**

1. Остапчук, А.К. Научные основы обеспечения шероховатости поверхности на базе анализа случайных процессов: Монография / А.К. Остапчук, В.Е. Овсянников. – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2012.- 188 с.

2. Гуревич, Ю.Г. Влияние катализатора (железа) на взаимодействие оксидов с основой феррито-перлитного серого чугуна, обеспечивающее закалку и диффузионное легирование: Монография / Ю.Г Гуревич, В.Е. Овсянников, В.А. Фролов. – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2013.- 102 с.

## Патенты

1. Патент RU № 200311. Зуб ковша экскаватора // Овсянников В.Е., Васильев В.И; заявитель и патентообладатель Овсянников В.Е. – Оpubл. 16.10.2020. Бюл. № 2.
2. Патент RU № 200310. Защита ковша экскаватора // Овсянников В.Е., Васильев В.И; заявитель и патентообладатель Овсянников В.Е. – Оpubл. 16.10.2020. Бюл. № 2.
3. Патент RU № 186172. Устройство для диффузионного легирования // Овсянников В.Е., Васильев В.И; заявитель и патентообладатель Курганский государственный университет. – Оpubл. 11.01.2019. Бюл. № 2.
4. Патент RU № 182687. Тормозная лента // Овсянников В.Е., Васильев В.И; заявитель и патентообладатель Курганский государственный университет. – Оpubл. 28.08.2018. Бюл. № 25.
5. Патент RU № 2493289. Способ диффузионного титанирования изделий из чугуна // Гуревич Ю.Г., Овсянников В.Е., Фролов В.А., Суханов П.А; заявитель и патентообладатель Курганский государственный университет. – Оpubл. 20.09.2013. Бюл. № 26.
6. Патент RU № 143324. Устройство для оценки погрешностей формы тел вращения в поперечном сечении // Остапчук А.К., Рогов Е.Ю., Овсянников В.Е.; заявитель и патентообладатель Уральский государственный университет путей и сообщения. – Оpubл. 20.07.2014. Бюл. № 20.
7. Патент RU № 166356. Устройство автоматического обеспечения параметров погрешности формы в поперечном сечении // Овсянников В.Е., Рогов Е.Ю; заявитель и патентообладатель Уральский государственный университет путей и сообщения. – Оpubл. 20.11.2016. Бюл. № 32.

## Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

1. Определение корреляционной размерности фазового пространства / Овсянников В.Е., Рогов Е.Ю., Некрасов Р.Ю., Темпель Ю.А.; заявитель и патентообладатель Тюменский индустриальный университет. – №2018611606; дата рег. 02.02.2018.
2. Расчет информационной энтропии процесса / Овсянников В.Е., Рогов Е.Ю., Некрасов Р.Ю., Путилова У.С.; заявитель и патентообладатель Тюменский индустриальный университет. – №2018611608; дата рег. 02.02.2018.
3. Расчет показателя Херста по данным временного ряда / Овсянников В.Е., Рогов Е.Ю., Некрасов Р.Ю., Путилова У.С.; заявитель и патентообладатель Тюменский индустриальный университет. – №2018613869; дата рег. 26.03.2018.
4. Анализ коррелограмм профилей поверхностей, обрабатываемых резанием : свид. о государственной регистрации программы для ЭВМ / Остапчук А.К., Овсянников В.Е., Рогов Е.Ю.; заявитель и патентообладатель

Уральский государственный университет путей и сообщения. – №2012611805; дата рег. 17.02.2012.

5. Расчет параметров корреляционной модели профиля поверхностей, обрабатываемых резанием / Остапчук А.К., Овсянников В.Е., Рогов Е.Ю.; заявитель и патентообладатель Уральский государственный университет путей и сообщения. – №2012611804; дата рег. 17.02.2012.

### **Публикации в других изданиях**

1. Овсянников, В.Е. Обеспечение герметичности при ремонте деталей гидравлического привода строительно-дорожных машин / В.Е. Овсянников, П.А. Корчагин, В.И. Васильев // В сборнике: Образование. Транспорт. Инновации. Строительство. Сборник материалов IV Национальной научно-практической конференции. Омск, 2021. С. 121-126.

2. Овсянников, В.Е. Концепция повышения послеремонтной надежности узлов трения строительно-дорожных машин / В.Е. Овсянников, В.И. Васильев // Материалы международной научно-технической конференции «Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе». – Пермь: Изд-во Пермского национального политехнического университета, 2019. – С. 94-98.

3. Овсянников, Е.М. Разработка методики определения остаточного ресурса металлических конструкций мостовых кранов / Е.М. Овсянников, В.Е. Овсянников // Инновационные технологии в автоматизированном машиностроении и арматуростроении: Материалы Международной научно-технической конференции.- Курган: Изд-во КГУ, 2010. – С. 218-221

4. Овсянников, Е.М. К вопросу расчета остаточного ресурса мостовых кранов / Е.М. Овсянников, В.Е. Овсянников // Вестник Курганского государственного университета. – 2010. – №17. – С. 122-124.

5. Гуревич, Ю.Г. Основы технологии модификации поверхностного слоя чугуновых деталей / Ю.Г. Гуревич, В.Е. Овсянников, В.А. Фролов // Сборник трудов III Международной научно-технической конференции «Теплофизические и технологические аспекты повышения эффективности машиностроительного производства». - Тольятти, изд-во ТГУ, 2011. – С. 268-269.

6. Овсянников, В.Е. Методика определения вероятности появления усталостных трещин в подкрановых балках / В.Е. Овсянников, Е.М. Овсянников // Актуальные проблемы современной науки и практики: Материалы международной научно-практической конференции, посвященной 85-летию транспортного образования в Зауралье и 55-летию УрГУПС. – Курган, Изд-во КГУ, 2011. – С. 91-93.

7. Овсянников, В.Е. К вопросу определения остаточного ресурса мостовых кранов решетчатого сечения / В.Е. Овсянников, Е.М. Овсянников // Вестник МАНЭБ. – Курган, Изд-во КГУ, 2011. – С. 53-57.

8. Овсянников, В.Е. Инновационная технология сварки деталей из серого чугуна / В.Е. Овсянников, В.А. Фролов // Сборник трудов II Международной

научно-практической конференции «Инновационные технологии и экономика в машиностроении». - Юрга, 2011. – С. 100-101.

9. Овсянников, В.Е. Применение метода конечных элементов для анализа прочности упрочненных диффузионными методами деталей машин / В.Е. Овсянников, П.А. Суханов // Сборник научных трудов Международной научно-технической конференции «Инновационные технологии в машиностроении: проблемы, задачи, решения» - Орск, 2012. – С. 184-186.

10. Сниткин, В.М. Оценка остаточного ресурса мостовых кранов решетчатого сечения / В.М. Сниткин, И.П. Фролов, Е.М. Овсянников, В.Е. Овсянников // «Инженерный вестник Дона», 2015, №3 – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3128> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. Рус.

11. Овсянников, В.Е. Разработка элементов технологии повышения долговечности деталей тракторов из серого чугуна / В.Е. Овсянников, В.И. Васильев, А.С. Терехов // Тракторы и сельхозмашины. – 2018. – №2. – С. 73-77.

12. Овсянников, В.Е. Методологические основы численного анализа устойчивости систем / В.Е. Овсянников, В.Ю. Терещенко // Вестник Курганского государственного университета. – 2011. – №20. – С. 94-97.

13. Овсянников, В.Е. Расчет содержания легирующего элемента в диффузионном слое детали из серого чугуна после поверхностного окисления / В.Е. Овсянников, Ю.Г. Гуревич, П.А. Суханов // Вестник Курганского государственного университета. Серия: Технические науки. 2013. № 29. С. 70-72.

Подписано в печать	Формат 60×84 1/16	Бумага 65 г/м <sup>3</sup>
Печать цифровая	Усл.печ.л. 2,0	Уч.-изд.л. 1,25
Заказ	Тираж 100	Не для продажи

---

БИЦ Курганского государственного университета.  
640020, г. Курган, ул. Советская, 63/4.  
Курганский государственный университет