

На правах рукописи



Максимов Илья Сергеевич

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ ФОРМЫ РЕЛЬСОВ И ПОВЫШЕНИЕ
ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОПЕРАЦИИ ИХ ШЛИФОВАНИЯ
КОМПОЗИЦИОННЫМИ МОДИФИЦИРОВАННЫМИ
АБРАЗИВНЫМИ КРУГАМИ**

Специальность 2.5.5 - Технология и оборудование
механической и физико-технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Севастополь - 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Самарский государственный университет путей сообщения» ФГБОУ ВО «СамГУПС» на кафедре «Железнодорожный путь и строительство».

Научный руководитель: **Рахчеев Валерий Геннадьевич,**
доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры «Железнодорожный путь и
строительство» ФГБОУ ВО «Самарский
государственный университет путей
сообщения»

Официальные оппоненты: **Лобанов Дмитрий Владимирович,**
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО
«Чувашский государственный университет
имени И. Н. Ульянова», заведующий кафедрой
«Технология машиностроения»
(г. Чебоксары)

Стадник Татьяна Валерьевна,
кандидат технических наук, специалист I
категории, ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет», кафедра
«Технология машиностроения»
(г. Севастополь)

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный
технический университет»
(г. Волгоград)

Защита состоится «5» октября 2023 года в «13.00» часов на заседании диссертационного совета 24.2.393.01, при ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», по адресу: 299053, г. Севастополь, ул. Гоголя д.14, актовый зал.

С диссертацией можно ознакомиться ФГАОУ ВО «СевГУ» и на сайте www.sevsu.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2023 г.

Отзывы на автореферат (в 2-х экземплярах, заверенные печатью организации), просьба высылать по адресу: 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.393.01 Новикову Павлу Анатольевичу.

E-mail: RANovikov@sevsu.ru.

Тел.: 8(8692) 41-77-41 (доб. 1150).

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н., доцент

Новиков Павел Анатольевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертационного исследования.

Технологическая операция по шлифованию рельсов по своему характеру относится к работам профилактического плана и как правило входит в состав работ текущего содержания железнодорожного пути. Применение профильного шлифования на сети дорог главным образом направленно на уменьшение выходов дефектных рельсов по поверхностным дефектам, в результате использования такого технологического приема удастся значительно продлить жизненный цикл рельсов и сократить расходы по капитальным вложениям.

По мимо удаления поверхностных дефектов не мало важным является взаимодействие в системе колесо-рельс, за счет более оптимального контакта профилей рельсов и бандажей колес подвижного состава.

В мировой и отечественной практике наиболее востребованной технологией по восстановлению эксплуатационных параметров рельсов является механическая обработка рабочей поверхности катания головок рельсов непосредственно в пути.

Технологическое развитие секторов машиностроительной, станкостроительной, авиационной, автомобильной, железнодорожных и других промышленности в первую очередь ориентируются на достижения металлообрабатывающих подразделений. Прогрессирующий спрос компаний и предприятий на изделия с высокими показателями точности и качества предъявляет высокие требования к операциям и абразивным инструментам выполняющими ими.

В связи с наложенными санкциями в условиях экономического кризиса, фиксированных финансово-экономических ресурсов предприятий, особое место занимает направление по модернизации созданных и эксплуатируемых абразивных инструментов (АИ) с улучшенными физико-механическими параметрами.

Степень разработанности темы исследования. На текущий момент накоплен и систематизирован значительный объем исследований рассматривающих процессы абразивной обработки, проектирования и модернизации новых абразивных инструментов. Существенный вклад в развитие данного направления внесли ученые и сотрудники ВНИИАШ и его филиалах. Огромная роль в развитие этого вектора научно-технического направления связано с работами и исследованиями отечественных ученых таких как: В.А. Аксенов, А.П. Бабичев, Г.В. Бокучава, Д.Б. Ваксер, К.Ф. Гулев, П.Е. Дьяченко, Г.М. Ипполитов, А.С. Ильиных, С.А. Крюков, Ю.К. Новоселов, В.А. Носенко, Л.Н. Филимонов, Л.В. Худобин, В.М. Шумячер, П.И. Ящерицын и др.

Проведение комплексных и системных исследований, направленных на создание эффективного технологического процесса шлифования рельсов в пути с использованием модифицированных абразивных инструментов, позволяющих повысить качество обработанной поверхности, увеличить долговечность рельсов и рельсовых плетей, является актуальной и значимой научной проблемой, преследующей цель повышения эксплуатационного ресурса рельсов.

Отдельные этапы диссертации осуществлялись при выполнении НИР по Договору (Соглашению) о предоставлении гранта № 3163ГУ1/2014 от 12.08.2014 г.

Цель диссертационной работы: повышение производительности и качества финишной обработки железнодорожных рельсов, путем разработки методики расчета высокопроизводительных циклов шлифования с применением композиционных модифицированных абразивных кругов.

Задачи исследования:

1. Используя результаты теоретических и экспериментальных изысканий разработать композиционный абразивный инструмент для эффективного технологического процесса профильного шлифования рабочей поверхности железнодорожных рельсов. Разработать методику проектирования рабочей поверхности абразивного инструмента, определить геометрические размеры абразивных участков и керамических вставок композиционного шлифовального круга для качественного шлифования рельсов.

2. Определить критерий качественного шлифования поверхности катания головок рельса, обеспечивающий равномерный съем металла и износ абразивного инструмента (АИ).

3. Обосновать и разработать оптимальную концентрацию наномодификатора в керамическом сегменте композиционного шлифовального круга. Разработать технологию доставки наномодификатора в формовочную композицию абразивного инструмента. Определить необходимые физико-механические свойства модифицированной части абразивного инструмента.

4. Определить влияние физико-механических характеристик сегментов композиционных шлифовальных кругов и их режимных параметров, на величину съема припуска, стойкость абразивного круга и качество обработки верхней части поверхности катания железнодорожных рельсов. Разработать кинематическую модель процесса шлифования рельсов в пути на основе применения композиционных кругов. Определить термодинамическое состояние композиционных шлифовальных кругов и обработанной поверхности рельсов.

Научная новизна работы:

1. Определен критерий качественного шлифования поверхности катания головок рельса, позволяющий сравнивать конструкции абразивного

инструмента с позиций основных параметров шлифования рельсов: съема металла, точности обработанной поверхности, стойкости шлифовального инструмента.

2. Разработана методика проектирования рабочей поверхности абразивного инструмента, определены геометрические размеры абразивных участков и керамических вставок композиционного шлифовального круга для шлифования рельсов.

3. Разработана модель усовершенствованной структуры абразивного инструмента с помощью модифицирования связки в сегментах круга путем введения в формовочную массу наноструктурного наполнителя. Определены технологические параметры процесса создания композиции абразива.

4. Выявлены взаимосвязи структурных и конструктивных характеристик композиционных шлифовальных кругов с режимами обработки железнодорожных рельсов. Определены физико-механические характеристики сегментов композиционного шлифовального круга (зернистостью - F14, плотной структуры - S_t3, твердостью - Z_h) и режимные параметры обработки поверхности катания рельсов со скоростью 7 км/ч, окружной скоростью круга 58 м/с, силе резания 40Н при которых достигается величина съема припуска рельсовой стали марки Э76ХФ 24 мкм, при этом стойкость составляет T=7,4ч; шероховатость обработанной поверхности R_{z.p.c}=65мкм.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработана методика расчета режимов обработки для операций профильного шлифования железнодорожных рельсов, реализующих максимальную производительность шлифования с заданными показателями качества рельсов.

2. Разработан композиционный шлифовальный круг для шлифования верхней части рабочей поверхности головок железнодорожных рельсов и рельсовых плетей (Патент РФ № 2697542 С1).

3. Предложенная конструкция композиционных кругов, позволяет сократить продолжительность обработки рабочей поверхности головки железнодорожных рельсов. В результате удастся повысить производительность технологического процесса шлифования железнодорожных рельсов в 1,35 раза.

Объект исследования - процесс шлифования железнодорожных рельсов модифицированными композиционными шлифовальными кругами на керамических наноуглеродных связках.

Предмет исследования – закономерности влияния технологических факторов и внешних воздействий на параметры качества и производительности поверхности рельсов при шлифовании с помощью рельсошлифовальной техники.

Методология и методы исследования. В диссертационном исследовании в качестве методологической основы использовался системный

анализ. Теоретические изыскания проводились на основе положений теории абразивной обработки материалов, режущего инструмента, трудов и работ по технологии композиционных материалов и модификации абразивных инструментов, теории упрочнения и спекания порошковых материалов, моделирования в среде конечных элементов, теории формообразования рабочей поверхности АИ.

Для планирования и интерпретации полученных результатов в работе применялись теория планирования многофакторных экспериментов и математико-статические методы исследований.

В научном исследовании использованы ряд программных продуктов и специализированных приборов и установок (сертифицированных и поверенных), Statistika, ANSYS, растровый электронный микроскоп (РЭМ) в комплекте с рентгеновским спектрометром, JSM-6390A JEOL, профилограф рельсовый (ПР-03), бесконтактный термометр Testo, металлографический микроскоп Альтами МЕТ П.

Личный вклад автора. Результаты полученные в ходе выполнения диссертационного исследования получены автором лично или при непосредственном его участии. В статьях, опубликованных в соавторстве, личный вклад автора следующий: в публикациях [1, 2, 3, 7, 8, 9, 14-18] автором определены направления, цели и задачи научных исследований, предложены теоретические особенности формирования поверхности катания головок рельсов, приведен механизм износа абразивных кругов при шлифовании рельсов, спrogramмировано объектно-ориентированное проектирование процесса шлифования рельсов в пути; в работах [5, 6] определена модель термодинамического состояния композиционных шлифовальных кругов и обработанной поверхности рельсов в процессе шлифования, приведены результаты экспериментальных исследований по износостойкости композиционных шлифовальных кругов; работа [4] выполнена без соавторства; в работе [10] разработан композиционный шлифовальный круг для шлифования верхней части рабочей поверхности головок железнодорожных рельсов и рельсовых плетей; в публикациях [11–13] предложены пути повышения качества шлифования рельсов железнодорожного пути; в работах [19–21] приведены методики разработки модернизированных абразивных инструментов для шлифования рельсов в пути.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Кинематическая модель процесса шлифования рельсов в пути на основе применения композиционных кругов.
2. Результаты теоретического исследования шлифования рельсов композиционными шлифовальными кругами.
3. Способ упрочнения структуры абразивных инструментов за счет использования нано-наполнителей в формовочных композициях АИ.

4. Научно обоснованные результаты комплексных экспериментальных исследований взаимосвязей показателей композиционных шлифовальных кругов с режимами и параметрами обработки поверхностей рельсов.

5. Методика компьютерного моделирования температурного состояния композиционных шлифовальных кругов и поверхности катания рельсов, в процессе механической обработки.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертационное исследование представляет собой инновационное решение актуальной научно-технической задачи – повышение производительности и качества финишной обработки железнодорожных рельсов, путем разработки методики расчета высокопроизводительных циклов шлифования с применением композиционных модифицированных абразивных кругов. Полнота и содержание диссертационной работы соответствует специальности 2.5.5 - Технология и оборудование механической и физико-технической обработки. Области исследования: п.2 паспорта специальности 2.5.5: (теоретические основы, моделирование и методы экспериментального исследования процессов механической и физико-технической обработки...) п.4 паспорта специальности 2.5.5: (создание, включая проектирование, расчеты и оптимизацию, параметров инструмента и других компонентов оборудования, обеспечивающих технически и экономически эффективные процессы обработки).

Степень достоверности и апробация результатов: подтверждается достаточной сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований, полученных с использованием апробированных современных методов исследований, поверенных контрольно-измерительных приборов. Достоверность разработанного нового абразивного инструмента подтверждается апробацией с внедрением модифицированного абразивного инструмента на предприятие.

Результаты диссертационной работы приняты к внедрению в ООО «ПКФ» «СИМС» (г. Самара) с ожидаемым годовым экономическим эффектом от внедрения композиционных шлифовальных кругов 485600 руб., а также внедрены в учебный процесс кафедры «Железнодорожный путь и строительство» ФГБОУ ВО «Самарский государственный университет путей сообщения» (г. Самара); переданы для внедрения в службу пути Куйбышевской дирекции инфраструктуры.

Основные положения и результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на XI, XII, XIV международных научно-практических конференциях «Наука и образование транспорту» (Самара 2018 - 2020 г.); XXII международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации» (Пенза 2019 г.); всероссийской научно-

исследовательской конференции «Молодежная наука в XXI веке: традиции, инновации, векторы развития» (Оренбург 2019 г.); международной научно-практической конференции «Научные исследования высшей школы» (Пенза 2019 г.); XII международной научно-практической конференции «Проблемы безопасности на транспорте» (Гомель 2022 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 21 научная работа, в том числе 6 статей в издательствах, рекомендованных ВАКом, 3 статьи в журналах, включенных в библиографическую и реферативную базу данных Scopus, 1 патент РФ, 11 публикаций в материалах разнообразных научно-технических конференций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, общих выводов и заключения, списка использованных источников и приложения. Объем работы: основной текст изложен на 205 страницах, включает 80 рисунков, 15 таблиц, 4 приложений и списка литературы, состоящего из 203 наименований источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационного исследования, формулируются цель и задачи исследования, научная новизна, практическая значимость, положения выносимые на защиту. Представляется структура и объем выполненного диссертационного исследования.

В первой главе рассмотрены и проанализированы работы по теме диссертационного исследования, направленные и посвященные следующим векторам и процессам эффективного технологического процесса шлифования железнодорожных рельсов, находящихся в пути:

а) выявление процессов формирования дефектов и износов рельсов на рабочей поверхности катания в зависимости от условий эксплуатации;

б) вопросам восстановления и продления прочностных свойств рельсов за счет использования технологии шлифования рельсов на перегонах, станционных и путях специального назначения;

в) установление влияния рецептурно-технологических параметров при проектировании и создании абразивных инструментов на качество и производительность процесса шлифования;

г) рассмотрены и проанализированы работы связанные с особенностями формирования поверхностного слоя рабочей поверхности головок рельсов в процессе их механической обработки.

Практическая реализация и внедрение полученных результатов в виде оптимизированных технологических процессов, новых абразивных инструментов, автоматизированных программных средств позволяют достичь железнодорожной промышленностью определенных положительных результатов. Однако производя оценку по объемам работ осуществляемых

рельсошлифовальными поездами (рисунок 1а) и количества изъятых остродефектных рельсов (рисунок 1б), заставляет снова сфокусировать внимание на исследовании и модернизации технологического процесса профильного шлифования поверхностей головок рельсов в пути.

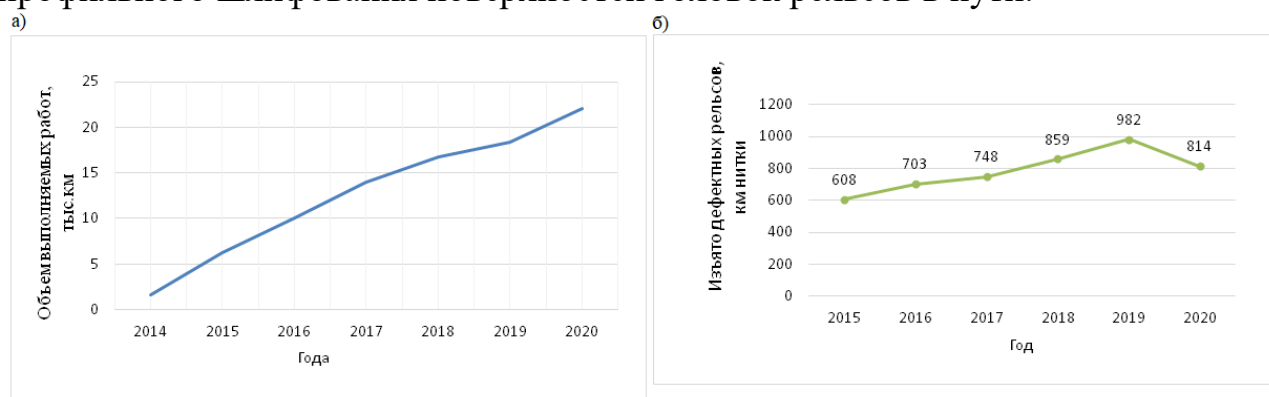


Рисунок 1.а - объем выполняемых работ рельсошлифовальными поездами по годам;

б - количество изъятых дефектных рельсов по годам

Эффективными направлениями по проектированию АИ с повышенными эксплуатационными характеристиками приходится на разработку и модификацию рецептурно-технологических приемов направленных на оптимизацию составов АИ, структурных характеристик, с оптимальным содержанием абразивных зерен, связующего и пор.

Разница в соотношении между зернами основного шлифматериала и наполнителей достаточно сильно разнятся, так ряд ученых рекомендуют добавлять в формовочную смесь от 4 - 6 % наполнителей, другие значительно увеличивают объемное содержание добавок и предлагают внедрять от 28 % и более. Однако все авторы подтверждают свои предложения и рекомендации проведенными исследованиями по оптимизации процентного содержания основной фракции и добавок в формовочных смесях.

Стоит заметить, что при механической обработке поверхностей деталей, факторы, влияющие на характеристики абразивного инструмента, не учитываются в полном объеме.

Систематизируя различные источники информации, результаты исследований отечественных и зарубежных ученых автор приходит к мнению, что на эксплуатационный ресурс железнодорожных рельсов, прошедших операции шлифования огромное влияние оказывают: параметры абразивного инструмента, режимы и условия обработки, качество поверхностного слоя.

В результате проведенного аналитического анализа сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе проведено теоретическое исследование шлифования рельсов композиционными абразивными кругами, с оптимизацией геометрических размеров абразивных участков и керамических вставок рабочей поверхности шлифовального круга с целью эффективного и

качественного шлифования рельсов исключаящем появления прижогов на обрабатываемой поверхности катания железнодорожных рельсов.

Определена кинематическая схема движения абразивного зерна при вращении шлифовального круга и поступательного движения шлифовального поезда, позволяющая фиксировать мощность тепловыделения абразивной частицы, находящейся на расстоянии r от центра шлифовального круга.

В диссертационной работе в результате теоретического исследования и разработанной кинематической модели определена длина дуги контакта абразивного зерна с обрабатываемой поверхностью катания железнодорожного рельса L_T , позволяющая оптимизировать геометрические размеры бакелитовых участков и керамических вставок на рабочей поверхности шлифовального круга с целью обеспечения качественного шлифования рельсов и исключением появления прижогов. Длина дуги определяется по формуле предложенной д.т.н. профессором Рахчеевым В.Г.:

$$L_T = R\alpha \sqrt{1 + \left(\frac{v_d}{60v_{кр}}\right)^2}, \quad (1)$$

где v_d - скорость рельсошлифовального поезда, м/мин; $v_{кр}$ - скорость абразивной частицы на шлифовальном круге м/с; R - радиус шлифовального круга, мм; α - центральный угол, рад.

С целью обеспечения качественного шлифования рельсов и исключением появления прижогов проведено математическое моделирование формы рабочей поверхности композитного абразивного круга, определено условие, при котором длина дуги контакта шлифовального круга с рельсом не зависит от его радиуса:

$$R'\alpha = R'_1\alpha_1 = R'_i\alpha_i = const. \quad (2)$$

где R - расстояние от центра шлифовального круга до точки контакта, м; α - центральный угол образующей пятна контакта, рад.

Впервые предложено в качестве оценочного условия необходимого для равномерного съема металла и износа абразивного инструмента использовать критерий качественного шлифования поверхности катания головок рельса, позволяющего сравнивать конструкции АИ с позиций основных параметров шлифования рельсов: съема металла, точности обработанной поверхности, стойкости шлифовального инструмента.

$$\frac{L_{Tin}}{B_{in}} = \frac{L_{Ti}}{B_i} = \frac{L_{Tout}}{B_{out}}, \quad (3)$$

где L_{Tin} - длина дуги шлифования на внутреннем радиусе шлифовального круга, мм; L_{Ti} - длина дуги шлифования на произвольном радиусе шлифовального круга, мм; L_{Tout} - длина дуги шлифования на наружном радиусе, мм; B_{in} - ширина дорожки шлифования на внутреннем радиусе, мм;

B_i - ширина дорожки шлифования на произвольном радиусе, мм; B_{out} - ширина дорожки шлифования на наружном радиусе, мм.

Определен критерий качественного шлифования поверхности катания головок рельса, позволяющий сравнивать конструкции абразивного инструмента с позиций основных параметров шлифования рельсов: съема металла, точности обработанной поверхности, стойкости шлифовального инструмента, который определен при помощи метода экспертных оценок в общем виде:

$$K = k_1 \cdot t_{p.c} + k_2 \cdot T + k_3 \cdot R_{z.p.c} \quad (4)$$

где k_1, k_2, k_3 - коэффициенты значимости; $t_{p.c}$ - припуск на обработку, мкм; T - период стойкости, ч; $R_{z.p.c}$ - качество обработанной поверхности, мкм.

В результате анализа экспериментальных данных определены коэффициенты значимости для каждого выходного параметра:

$$K = 0,55t_{p.c} + 0,3T + 0,15R_{z.p.c} \quad (5)$$

Получено уравнение по определению величины снимаемого металла $a_{z,cp}$ единичным зерном, при котором обеспечивается его равномерный съем:

$$a_{z,cp} = \frac{a_{cp}}{z} = 7.5 \frac{(D^2 - d^2)t_\phi}{DBv_{np}R\alpha\sqrt{1 + \left(\frac{v_{np}}{60}\right)^2}} \lambda_\phi, \quad (6)$$

где D - наружный диаметр шлифовального круга, мм; d - внутренний диаметр шлифовального круга, мм; t_ϕ - глубина фактически снимаемого слоя металла, мм; v_{np} - относительная приведенная скорость обработки поверхности головки рельса, $v_{np} = \frac{v_\phi}{v_{kp}}$, λ_ϕ - фактическое среднее расстояние между абразивными зернами $\lambda_\phi \in (d_x; 1,4d_x)$, мм (где d_x - линейный размер абразивной частицы, мм).

Разработаны основные положения теории формирования точности формы профиля головки рельса с учетом основных параметров характеризующих рабочую поверхность исследуемого композиционного шлифовального круга. Обеспечивается отсутствие удара при переходе от основной бакелитовой части к керамической вставке и наоборот композиционного шлифовального круга, благодаря чему происходит повышение точности обработанной поверхности. Данное условие представлено выражением:

$$\varphi = \frac{r - r_{min}}{(r_{max} - r_{min})} (\varphi_2 + \varphi') \pm \frac{L_{T1}}{2r} \quad (7)$$

где r - радиус шлифовального круга, мм; r_{min} - внутренний радиус, мм; r_{max} - наружный радиус шлифовального круга, мм; φ_2 - центральный угол сегмента с керамическими вставками, рад; φ' - угол, соответствующий длине зоны перекрытия на наружном радиусе круга, рад; L_{T1} - длина дуги шлифования на бакелитовом участке, мм.

В третьей главе диссертации приведены результаты исследования разработанной технологии ультразвуковой доставки диспергированных исходных глобул наномодификатора в формовочную композицию абразивных инструментов, а также исследования взаимосвязей эксплуатационных параметров композиционных шлифовальных кругов при различных режимах обработки рабочей поверхности головок железнодорожных рельсов.

Установлены эффективные технологические режимы ультразвуковой диспергации многослойных углеродных нанотрубок (МУНТ), позволяющие оптимизировать фракционный объемный состав полученной суспензии наномодификатора МУНТ «Таунит» в сторону наноразмерного диапазона (таблица 1).

Таблица 1. Влияние продолжительности обработки на геометрические параметры МУНТ «Таунит»

Продолжительность обработки, минуты	Средний размер частиц, мкм МУНТ «Таунит»	
	вода	спирт
1	5,5	2,25
3	4,85	1,65
5	3,76	1,38
7	2,24	0,7
10	2,88	0,67

Экспериментально доказано, что использование технологии ультразвуковой диспергации МУНТ «Таунит» происходящей по следующей технологической схеме: среда(носитель) - изопропиловый спирт, частота ультразвукового воздействия 40 кГц, продолжительность обработки 7 минут, последующие выпаривание спирта, способствует размельчению исходных глобул рассматриваемого наномодификатора до показателей 0,7 мкм, что в 432 раза меньше относительно чистых не прошедших обработку глобул наночастиц (Рисунок 2 а, б).

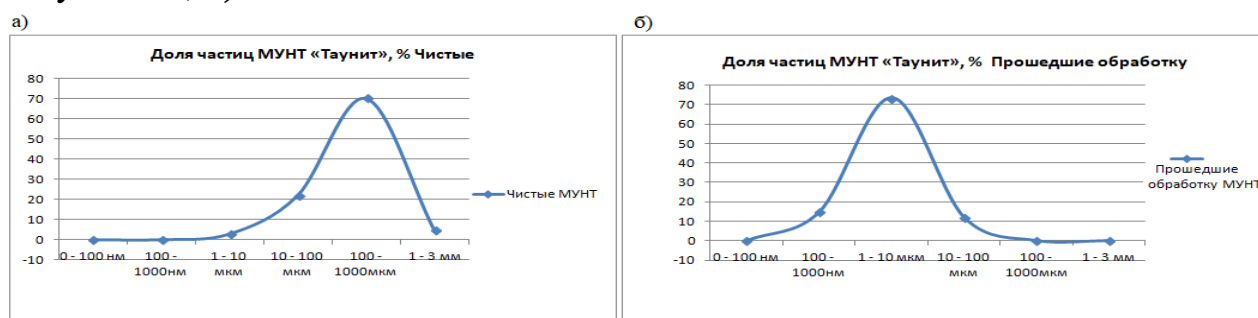


Рисунок 2.а - распределение частиц МУНТ по геометрическим размерам исходных(чистых);
б - прошедшие 7 минутную обработку частицы МУНТ в среде изопропилового спирта

Оптимизирован фракционный объемный состав полученной суспензии наномодификатора МУНТ «Таунит» в сторону наноразмерного диапазона в течении 7 минутной ультразвуковой обработки, при этом объемная доля чистых частиц находится в интервале от 10 - 1000 мкм, объемная доля наночастиц прошедшие обработку смещается в область от 100 нм до 10 мкм.

Таким образом суспензия, полученная по предлагаемой технологии в своем объеме, содержит 15 % частиц нанометрового диапазона и 80 % частиц размеров от 1 - 10 мкм, 5 % частиц размеров от 10 - 100 мкм.

Определена наиболее эффективная концентрация наномодификатора типа МУНТ «Таунит» при которой значительно возрастают физико-механические свойства наномодифицированного керамического сегмента шлифовального круга (Рисунок 3, 4).



Рисунок 3 - Распределение прочности при растяжении керамического сегмента в зависимости от концентрации наномодификатора МУНТ «Таунит», %

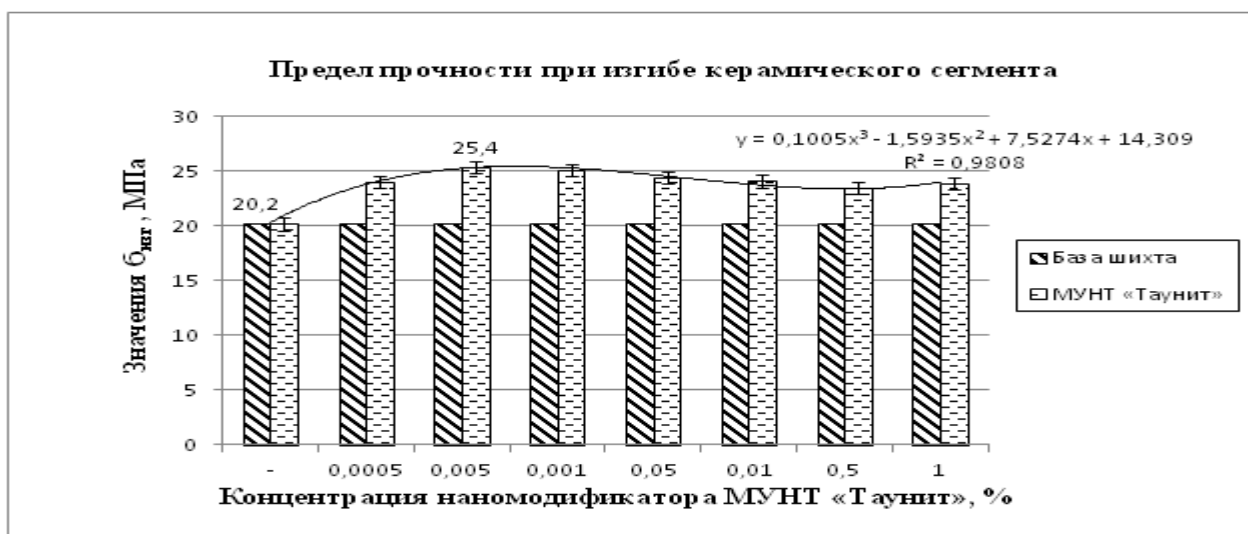


Рисунок 4 - Распределение прочности при изгибе керамического сегмента в зависимости от концентрации наномодификатора МУНТ «Таунит», %

Установлено, оптимальной концентрацией наномодификатора в составе керамического сегмента шлифовального круга является 0,005 - 0,001 мас. % от расхода натриевого стекла. Таким образом наномодификатор в количестве 0,005 % в составе керамической шихты, способствует увеличению предела прочности при растяжении в 1,62 раза (12,7 МПа) по сравнению с базовым составом (7,85 МПа).

При испытании контрольных образцов керамического сегмента шлифовального круга на изгиб происходит увеличение на 25,6 % (25,4 МПа) по сравнению с базовой (20,2 МПа) композицией керамической шихты.

Эффектом от такого технологического приема является возможность наноармирования слабых мест «мостиков» в черепке абразивных инструментов, рецептуру которых предлагается дополнять премиксом в виде наноструктурированных многослойных трубок.

Модель модифицированного мостика наноструктурированной связки абразивного инструмента представлена на (Рисунке 5).



Рисунок 5 - Модель мостика связки модифицированного АИ

Микроструктура наноструктурированного керамического сегмента композиционного шлифовального круга представлена на (Рисунке 6).

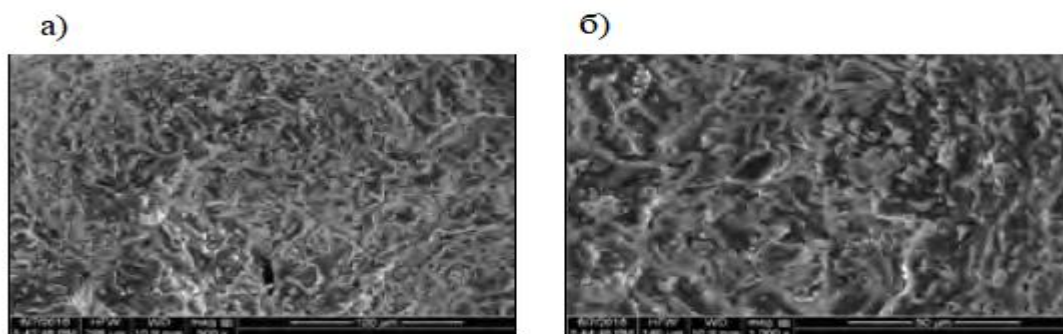


Рисунок 6 - Микроструктура модифицированного керамического сегмента 0,005% наномодификатора МУНТ «Таунит»: а - 600х; б - 1200х

В результате проведенного анализа микроструктуры модифицированного керамического сегмента 0,005% наномодификатора МУНТ «Таунит», выявлено: структура однородная, поры равномерны распределены по всей керамической матрице, количество глубоких связанных между собой пор незначительно.

Определены структурные характеристики композиционных шлифовальных кругов осуществляющих обработку верхней части поверхности катания головок железнодорожных рельсов и рельсовых плетей рельсошлифовальными поездами типа РШП, мобильными рельсошлифовальными установками с позиций уменьшения технологического «окна» т.е (повышение производительности шлифования).



Рисунок 7 - Геометрические модели композиционных шлифовальных кругов используемых на мобильных рельсошлифовальных установках: а - для ручного станка; б - для рельсошлифовального поезда



Рисунок 8 - Экспериментальные образцы композиционных шлифовальных кругов а - для ручного станка; б - для рельсошлифовального поезда

С целью определения влияния физико-механических характеристик и технологических режимов композиционного шлифовального круга, на процесс механической обработки поверхности катания железнодорожных рельсов, проведено математическое планирование эксперимента.

Оптимизация структурных характеристик и технологических режимов процесса шлифования шлифовального круга проводилась путем реализацией трехфакторного эксперимента.

В качестве исходных независимых переменных определены такие факторы как зернистость $F(600-1400 \text{ мкм})$, структура $S_r(\% \text{ абразива } 40-60\%)$, твердость круга $Z_H(1,1-1,7 \text{ мм})$, сила резания $P_z(36-46 \text{ Н})$, продольная подача $V_{\text{лаб}}$ (скорость лабораторной установки $5-7 \text{ км/ч}$), скорость шлифовального круга $V_{\text{кр}}(44-58 \text{ м/с})$.

Откликом поверхности являлись следующие параметры: величина съема припуска $t_{p.c}(\text{мкм})$, стойкость(работоспособность) композиционного шлифовального круга $T(\text{ч})$, шероховатость обработанной поверхности рельсов $R_{z.p.c.}(\text{мкм})$.

На основании полученных результатов рассчитаны уравнения регрессий которые представлены в раскодированном виде. Проверены однородности дисперсий, статистическая значимость коэффициентов регрессии и адекватность полученных моделей.

Величина съема припуска $t_{p.c}$ (мкм) в зависимости от физико-механических характеристик композиционного шлифовального круга определяется уравнением:

$$t_{p.c} = -3,13 + 0,007F + 0,15S_t + 3,8Z_h \quad (8)$$

где: F - зернистость мкм; S_t - структура, % абразива; Z_h - твердость круга; мм.

Величина съема припуска $t_{p.c}$ (мкм) в зависимости от технологических режимов определяется следующим уравнением:

$$t_{p.c} = -24,233 + 0,172P_z + 1,35V_{\text{лаб}} + 0,46V_{\text{кр}} \quad (9)$$

где: P_z - сила резания Н; $V_{\text{лаб}}$ - скорость лабораторной установки, км/ч; $V_{\text{кр}}$ - скорость шлифовального круга, м/с.

Определение стойкости T (ч), в зависимости от физико-механических характеристик композиционного шлифовального круга выражается:

$$T = 6,4 - 0,003F + 0,06S_t + 2,7Z_h \quad (10)$$

Определение стойкости T_c (ч), композиционного шлифовального круга в зависимости от технологических режимов выражается:

$$T = 10,7 - 0,038P_z - 0,37V_{\text{лаб}} + 0,019V_{\text{кр}} \quad (11)$$

Математическое планирование экспериментов физико-механических характеристик композиционного шлифовального круга проводилось путем выделения факторов влияющих на процесс шлифования поверхности железнодорожных рельсов.

В результате обработки экспериментальных данных получены следующие зависимости выходных параметров от физико-механических характеристик композиционного шлифовального круга:

$$t_{p.c} = 106,011 - 0,928S_t - 103,821Z_h + 0,023S_t^2 - 0,804S_tZ_h + 50Z_h^2 \quad (12)$$

$$T = 20,107 - 0,933S_t + 22,037Z_h + 0,009S_t^2 + 0,05S_tZ_h - 9,815Z_h^2 \quad (13)$$

На рисунках 9, 10 представлены графические интерпретации результатов обработки математических моделей 10, 11 и 12, 13 соответственно.

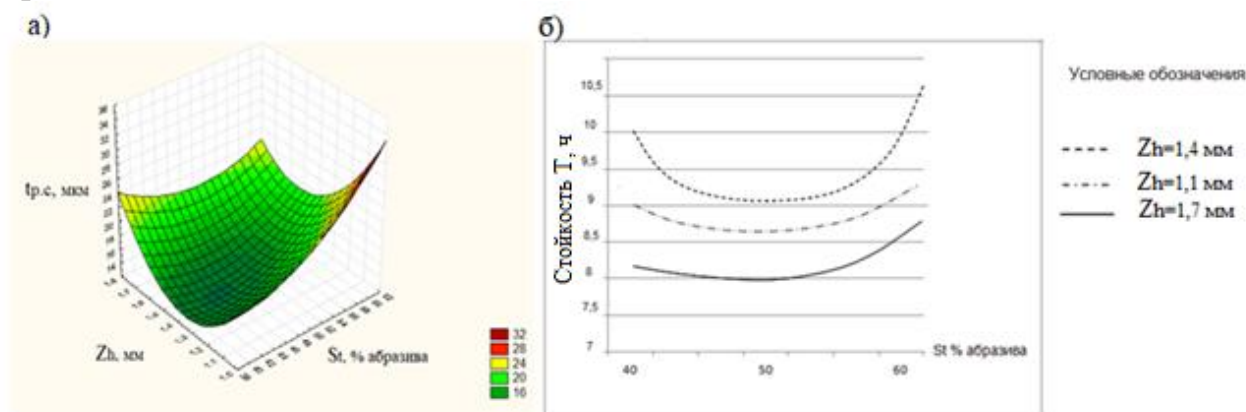


Рисунок 9 - Влияние физико-механических характеристик композиционного шлифовального круга на параметры процесса шлифования поверхности железнодорожных рельсов: величина съема припуска - а; стойкость(работоспособность) - б

Из полученных уравнений регрессии 10, 11 следует, что при твердости композиционного шлифовального круга 1,1мм (Z_h) и плотной структуре S_t3 (60% абразива), достигается максимальное снятие припуска $t_{p.c}=28$ мкм; стойкость(работоспособность) шлифовального круга при этом составляет $T=9,4$ ч; в свою очередь при твердости шлифовального круга Z_h номера структуры S_t3 шероховатость обработанной поверхности составит $R_{z.p.c}=50,5$ мкм.

В результате наиболее эффективным абразивным инструментом оказался шлифовальный композиционный круг со следующими характеристиками вставки: зернистостью - F14, плотной структуры (S_t3 - 60% абразивных частиц), твердостью - Z_h .

Математическое планирование экспериментов от технологических факторов проводились аналогично физико-механическим характеристикам композиционного шлифовального круга влияющим на процесс шлифования поверхности железнодорожных рельсов.

Обработка результатов математического планирования, позволила получить следующие зависимости (второго порядка) выходных параметров от технологических режимов обработки:

$$t_{p.c} = -216,743 + 7,307P_z + 2,709V_{кр} - 0,063P_z^2 - 0,041 P_z V_{кр} - 0,005V_{кр}^2 \quad (14)$$

$$T = 17,642 - 0,935P_z + 0,373V_{кр} + 0,008P_z^2 + 0,004P_z V_{кр} - 0,005V_{кр}^2 \quad (15)$$

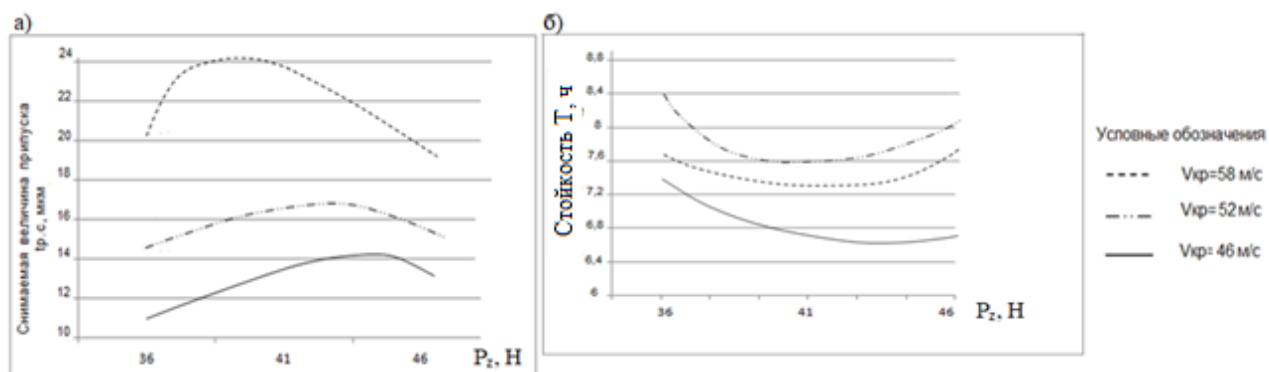


Рисунок 10 - Влияние технологических факторов процесса шлифования поверхности железнодорожных рельсов на параметры процесса: величина съема припуска - а; стойкость(работоспособность) - б

Из полученных уравнений регрессии 12, 13 следует, что при скорости шлифовального круга 58м/с и силе резания 40Н, достигается максимальная величина съема припуска $t_{p.c}=24$ мкм; стойкость(работоспособность) шлифовального круга при этом составит $T=7,4$ ч; в свою очередь при скорости шлифовального круга 58м/с шероховатость обработанной поверхности составит $R_{z.p.c}=65$ мкм.

Определены коэффициенты шлифования ($K_{ш}$ для цельнолитого и композиционных шлифовальных кругов с модифицированными абразивными наноструктурированными керамическими связками(МАНКС) при разных технологических режимах обработки.

Так коэффициент шлифования при использовании исследуемого композиционного шлифовального круга на связке(МАНКС) и эффективном технологическом режиме составил 4,2. При использовании стандартного шлифовального круга и режимов обработки коэффициент составил $K_{ш}=2,5$. При обработке исследуемым композиционным шлифовальным кругом на стандартных режимах коэффициент шлифования составил 3,3.

В четвертой главе представлены результаты моделирования в среде конечно-элементного анализа Ansys процесса шлифования железнодорожных рельсов двумя видами шлифовальных кругов (цельнолитым, композиционным). Установлены особенности формирования температурного потока на поверхности обработанного слоя рельса и температурного состояния рабочих поверхностей абразивного инструмента.

При исследовании температурного состояния рабочих поверхностей абразивного инструмента создана геометрическая модель, заданы граничные условия, определяющие тепловой поток на рабочих поверхностях шлифовального круга и конвективный теплообмен на остальных поверхностях инструмента.

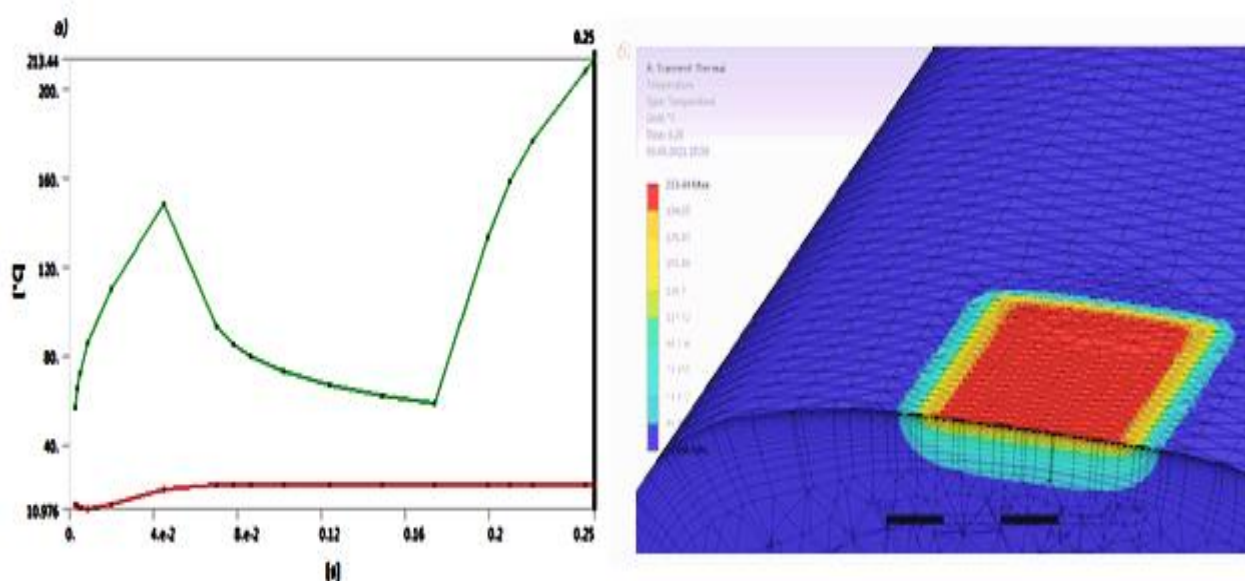


Рисунок 11 - Изменение максимальной и минимальной температур в рельсе в процессе шлифования для композиционного шлифовального круга (а);

Распределение температуры на верхней части поверхности катания головок рельса после прохождения композиционного шлифовального круга (б)

Теплообмен между модифицированными абразивными вставками на наноструктурированной керамической связке (МАНКС) и абразивными участками моделировался тепловым контактом с учетом свойств материалов, образующих соответствующие сегменты на рабочей поверхности композиционного круга. Состав бакелитовых и керамических сегментов (МАНКС) рабочей поверхности композиционного шлифовального круга принимался согласно таблицы 2.

Таблица 2. Объемное соотношение компонентов бакелитовых и керамических сегментов рабочей поверхности композиционного шлифовального круга

Объемное % соотношение компонентов АИ	Бакелитовый сегмент	Керамический сегмент (МАНКС)
Абразивные зерна	$V_{\text{зер.}} = 60\%$ нормальный электрокорунд	$V_{\text{зер.}} = 75\%$ белый электрокорунд
Связка	$V_{\text{связка}} = 29\%$ связка бакелитовая	$V_{\text{связка}} = 15\%$ связка керамическая наномодифицированная
Поры	$V_{\text{поры}} = 11\%$ поры	$V_{\text{поры}} = 10\%$ поры

Физические свойства компонентов бакелитового и керамического сегментов рабочей поверхности композиционного шлифовального круга, необходимые для выполнения температурного расчета, определялись в тесном сотрудничестве с сотрудниками центра пользования наукоемкого оборудования Самарского государственного технического университета «Исследование физико-химических свойств веществ и материалов» представлены в таблице 3.

Таблица 3 Физические свойства компонентов бакелитового и керамического сегментов рабочей поверхности композиционного шлифовального круга

Материалы	Коэффициент теплопроводности Вт/(м·°C)	Плотность кг/м ³
Нормальный электрокорунд	36,26	3045
Белый электрокорунд	37,18	3945
Бакелитовая связка	0,23	1300
Керамическая связка (МАНКС)	0,85	2500

В результате моделирования зафиксировано распределение температуры на рабочей поверхности и внутри композиционного шлифовального круга.

Так для композиционного шлифовального круга максимальная температура, возникающая на верхней части поверхности катания рельса в процессе шлифования в зависимости от температуры обрабатываемого рельса t_p составила: 213 °C при $t_p=22^\circ\text{C}$; 241 °C при $t_p=50^\circ\text{C}$; 191 °C при $t_p=0^\circ\text{C}$ (Рисунок 11).

Формирование равномерного температурного поля на поверхности круга в результате обработки верхней части поверхности катания железнодорожных рельсов и рельсовых плетей (изготовленных из стали марки Э76Ф) способствует равномерному съему припуска, а наличие модифицированных керамических сегментов способствуют более длительному периоду работоспособности (стойкости) абразивного инструмента.

Для определения эффективной конструкции композиционного шлифовального круга и разработки практических рекомендаций по повышению производительности технологического процесса шлифования верхней части рабочей поверхности головок железнодорожных рельсов использовали полученные в ходе выполнения диссертационного исследования экспериментальные зависимости формируемого поверхностного обработанного слоя (шероховатости - $R_{z.p.c}$).

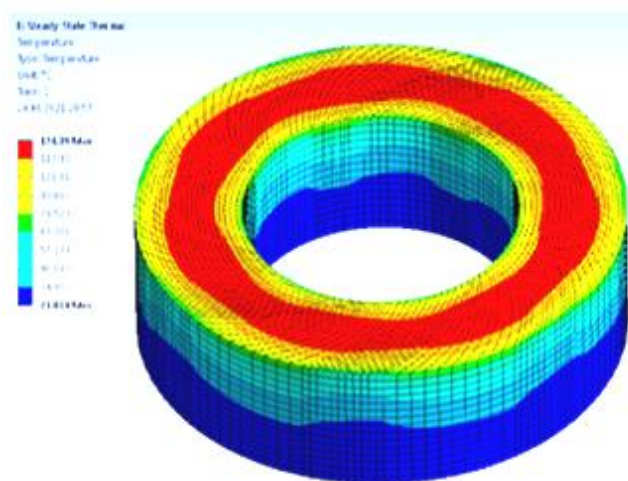


Рисунок 12 - Распределение температурного потока на рабочей поверхности композиционного шлифовального круга

На формирование поверхностного слоя верхней части поверхности катания железнодорожных рельсов оказывают влияние зернистость (F), количество абразивных частиц S_t (%) в структуре шлифовального круга, твердость (Z_h) композиционных шлифовальных кругов (КШК).

В результате обработки полученных экспериментальных данных определена следующая зависимость качества обрабатываемой поверхности от физико-механических характеристик композиционного шлифовального круга.

Получена следующая зависимость качества обрабатываемой поверхности от зернистости, структуры и твердости композиционного шлифовального круга:

$$R_{z.p.c} = 51,45 + 0,019F - 0,21S_t - 11,068Z_h \quad (16)$$

Параметр качества обрабатываемой поверхности $R_{z.p.c}$ (мкм) в зависимости от технологических режимов определяется следующим уравнением:

$$R_{z.p.c} = 30,823 + 0,41P_z + 2,4V_{\text{лаб}} - 0,0033V_{\text{кр}} \quad (17)$$

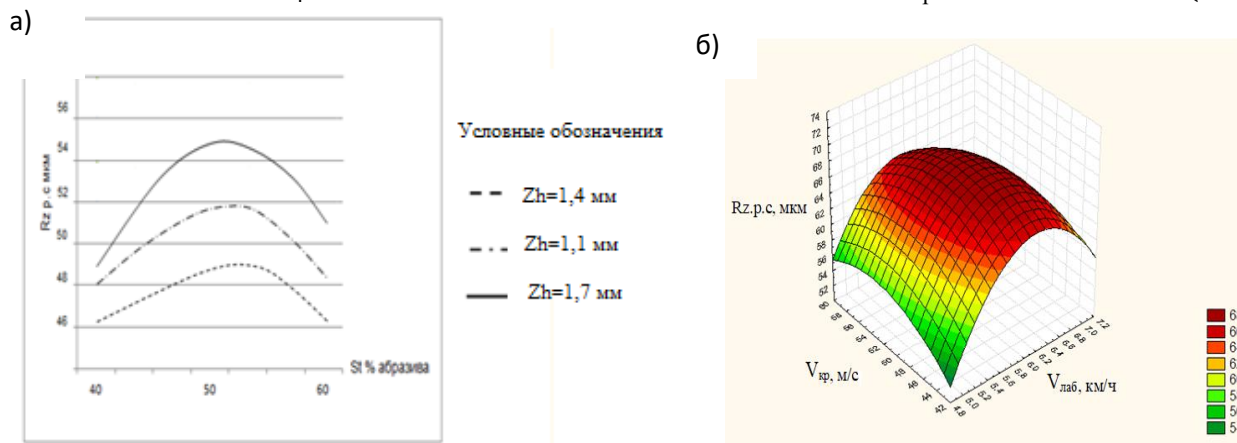


Рисунок 13 - Влияние структуры и твердости композиционного шлифовального круга на качество обработанной поверхности: а - физико-механические характеристики композиционного шлифовального круга; б - технологические режимы;

В результате обработки экспериментальных данных получена следующая зависимость выходных параметров от физико-механических характеристик композиционного шлифовального круга:

$$R_{z,p.c} = 8,26 + 2,74S_t - 35,824Z_h - 0,03S_t^2 + 0,06S_tZ_h + 12,41Z_h^2 \quad (18)$$

Качество обработанной поверхности $R_{z,p.c}$ (мкм) в зависимости от технологических режимов определяется следующим уравнением:

$$R_{z,p.c} = -358,083 + 94,606P_z + 5,537V_{кр} - 7,05P_z^2 - 0,182P_zV_{кр} - 0,044V_{кр}^2 \quad (19)$$

Графическая интерпретация результатов обработки математических моделей 16, 17 представлена на рисунке 13 а и б соответственно.

Определено влияние твердости элементов композиционных шлифовальных кругов (КШК) - Q, R, T на формируемый микрорельеф верхней части поверхности катания железнодорожных рельсов. Проводя анализ поверхности отклика (Рисунок 13а) определено, что при твердости модифицированной вставки композиционного шлифовального круга 1,1мм (Z_h) и плотной структуре S_t3 (60% абразива), шероховатость обработанной поверхности составит $R_{z,p.c}=51$ мкм.

В пятой главе по результатам диссертационного исследования разработана и реализована методика расчёта режимов механической обработки железнодорожных рельсов на операциях профильного шлифования рельсов. Расчет параметров для технологических этапов реализован, на основе уравнения баланса перемещений. Разработаны практические рекомендации по использованию композиционного шлифовального круга с чередующимися режущими элементами двух типов с отличающейся твердостью и зернистостью абразива, имеющими на боковой поверхности круга форму трапеции. Конструкция композиционного шлифовального круга защищена охранным документом (патентом РФ №2697542).

Прошедшие производственные испытания в ООО «ПКФ» «СИМС» г. Самара по шлифованию железнодорожных рельсов с использованием композиционных шлифовальных кругов, позволили сократить продолжительность обработки рабочей поверхности головок железнодорожных рельсов с 12 мин 48 с до 9 мин 48 с, в результате удалось повысить производительность технологического процесса шлифования верхней части рабочей поверхности головок железнодорожных рельсов в 1,35 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Решена актуальная научная задача повышения производительности технологического процесса шлифования железнодорожных объемнозакаленных рельсов за счет использования модифицированных композиционных шлифовальных кругов. Установлены корреляционные зависимости технологических режимов обработки, структурных характеристик абразивного

инструмента, стойкости шлифовальных кругов, качества сформированного обработанного поверхностного слоя рельсов и рельсовых плетей.

2. Определен критерий качественного шлифования поверхности катания головок рельса, обеспечивающий равномерный съем металла и износ абразивного инструмента (АИ).

3. Разработана кинематическая модель процесса шлифования рельсов в пути на основе применения композиционных кругов.

4. Разработана методика проектирования рабочей поверхности абразивного инструмента, определены геометрические размеры бакелитовых участков и керамических вставок композиционного шлифовального круга для качественного шлифования рельсов.

5. Разработана технология эффективного способа доставки и диспергирования исходных глобул наномодификатора в формовочную композицию абразивных инструментов, за счет использования ультразвуковой диспергации МУНТ «Таунит» осуществляющейся по следующему технологическому режиму: среда(носитель) - изопропиловый спирт, частота ультразвукового воздействия 40 кГц, продолжительность обработки 7 минут, последующее выпаривание спирта.

6. Оптимизирован фракционный объемный состав полученной суспензии наномодификатора МУНТ «Таунит» в сторону наноразмерного диапазона в течении 7 минутной ультразвуковой обработки. Таким образом суспензия, полученная по предлагаемой технологии в своем объеме, содержит 15 % частиц нанометрового диапазона и 80 % частиц размеров от 1 - 10 мкм, 5 % частиц размеров от 10 - 100 мкм.

7. Установлено, при модификации керамического сегмента шлифовального круга оптимальной концентрацией наномодификатора в составе является 0,005-0,001% от массы расхода натриевого стекла, увеличивается предел прочности при растяжении в 1,62 (12,7 МПа), при испытании контрольных образцов на изгиб в 1,26 раза (25,4 МПа), по сравнению с контрольным составом керамической шихты.

8. Определены взаимосвязи структурных характеристик композиционных шлифовальных кругов с режимами и параметрами обработки верхней части поверхности катания головок железнодорожных рельсов. Определены физико-механические характеристики сегментов композиционного шлифовального круга (зернистостью - F14, плотной структуры - S₃, твердостью - Z_h) и режимные параметры обработки поверхности катания рельсов со скоростью 7км/ч, окружной скоростью круга 58м/с, силе резания 40Н при которых достигается съем припуска 24мкм, стойкость круга при этом составляет T=7,4ч; шероховатость обработанной поверхности составит R_{z.p.c}=65мкм.

9. Определено температурное состояние композиционных шлифовальных кругов и обработанной поверхности рельсов. В результате моделирования в

среде конечно-элементного анализа Ansys процесса шлифования верхней части поверхности катания железнодорожных рельсов, двумя видами абразивного инструмента (цельнолитым, композиционным) шлифовальными кругами позволило установить особенности формирования температурного поверхностного обработанного слоя рельса.

По результатам произведенного расчета установлено что наличие модифицированных керамических вставок на рабочей поверхности композиционного шлифовального круга способствует формированию равномерного теплового потока на поверхности круга с максимальным значением 124 °С, что на 8% больше (116 °С) в сравнении с тепловым потоком цельнолитого бакелитового круга.

10. Прошедшие испытания в ООО «ПКФ» «СИМС» г. Самара по шлифованию железнодорожных рельсов с использованием композиционных шлифовальных кругов с чередующимися режущими элементами двух типов с отличающейся твердостью и зернистостью абразива, позволили сократить продолжительность обработки рабочей поверхности головки железнодорожных рельсов с 12 мин 48 с до 9 мин 48 с, в результате удалось повысить производительность технологического процесса шлифования верхней части рабочей поверхности головок железнодорожных рельсов в 1,35 раза. Ожидаемый экономический эффект от внедрения в производство композиционных шлифовальных кругов для торцевого шлифования рельсов составит 485600 руб. в год.

СПИСОК ПЕЧАТНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых журналах и изданиях, включенных в перечень ВАК РФ

1. **Максимов, И. С.** Теоретические особенности формирования поверхности катания головок рельсов при шлифовании / И. С. Максимов, В. Г. Рахчеев, С. А. Галанский, А.Г. Мустафин // Ученые записки КНАГТУ. 2021. - № 5 (53). - С. 65-70.

2. **Максимов, И. С.** Анализ механизма износа абразивных кругов при шлифовании рельсов / И. С. Максимов, В. Г. Рахчеев, С. А. Галанский, А.Г. Мустафин // Ученые записки КНАГТУ. 2022. - № 1 (57). - С. 68-75.

3. **Максимов, И. С.** Объектно-ориентированное проектирование процесса шлифования рельсов в пути с использованием композиционных абразивных инструментов / И. С. Максимов, С. А. Галанский, А.Г. Мустафин // Ученые записки КНАГТУ. 2022. - № 3 (59). - С. 99-109.

4. **Максимов, И. С.** Проектирование и создание композиционных шлифовальных кругов повышенной производительности для обработки рельсов / И. С. Максимов // Ученые записки КИПУ. 2023. – № 1 (79). – С. 233-241.

5. **Максимов, И. С.** Определение термодинамического состояния композиционных шлифовальных кругов и обработанной поверхности рельсов в

процессе шлифования / И. С. Максимов, В. Г. Рахчеев, С. А. Галанский, Т.С. Максимова. // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - 2023. - №2 (358). - С. 82-90.

6. **Максимов, И. С.** Износостойкость композиционных шлифовальных кругов / И. С. Максимов, М. Ш. Мигранов, Д. С. Репин // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2023. – № 5. – С. 217-222.

Публикации в изданиях, индексируемых в наукометрических базах Scopus и Web of Science

7. **Maksimov, I. S.** Theoretical features of the formation of the rolling surface of the rail heads during grinding / V. G. Rakhcheev, I. S. Maksimov, S. A. Galanskiy, A. G. Mustafin and A. L. Zolkin // AIP Conference Proceedings : 2, Krasnoyarsk, 29–31 июля 2021 года. – Krasnoyarsk, 2022. – P. 020001. – DOI 10.1063/5.0092498. – EDN SQUANA.

8. **Maksimov, I. S.** Features of rails treatment with composite grinding wheels / V. G. Rakhcheev, S. A. Galanskiy, I. S. Maksimov, A. G. Mustafin and A. L. Zolkin // AIP Conference Proceedings : PROCEEDINGS OF THE II INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE ON ADVANCES IN SCIENCE, ENGINEERING AND DIGITAL EDUCATION: (ASEDU-II 2021), Krasnoyarsk, 28 октября 2021 года. – Krasnoyarsk: AIP PUBLISHING, 2022. – P. 060038. – DOI 10.1063/5.0124338. – EDN SXFRWQ.

9. **Maksimov, I. S.** On the issue of wearing mechanism of abrasive wheels during rails grinding / V. G. Rakhcheev, S. A. Galanskiy, I. S. Maksimov, A. G. Mustafin and A. L. Zolkin // Journal of Physics: Conference Series : III International Scientific Conference on Metrological Support of Innovative Technologies (ICMSIT III 2022), Krasnoyarsk, 03–05 марта 2022 года. – Krasnoyarsk: IOP Publishing Ltd, 2022. – P. 022002. – DOI 10.1088/1742-6596/2373/2/022002. – EDN TOZVED.

Патент на изобретение

10. Пат. № 2697542 Российская Федерация, МПК В24Д 7/00 Композиционный шлифовальный круг для торцевого шлифования / В. Г. Рахчеев, **И. С. Максимов**, С. А. Галанский, А. Г. Мустафин, В. В Денисов, М. В. Прусов.; заявители и патентообладатели: В. Г. Рахчеев, И. С. Максимов, С. А. Галанский, А. Г. Мустафин, В. В Денисов, М. В. Прусов. - 2019104680/; заявл. 19.02.2019; опубл. 15.08.2019, Бюл. № 23.

Статьи и материалы конференций, опубликованные в других изданиях

11. **Максимов, И. С.** Технологическая наследственность элементов верхнего строения пути / И. С. Максимов, А. А. Бондаренко, Г. Р. Маёров, И. С. Максимов, Д. А. Зяблов // Путь и путевое хозяйство. 2013. - №9. - С. 2-4.

12. **Максимов, И. С.** Повышение эффективности шлифования рельсов на основе применения модернизированных композиционных и лепестковых кругов и оптимизации системы измерения рельсошлифовального поезда / И. С. Максимов, В. Г. Рахчеев, С. А. Галанский // Вестник транспорта Поволжья. 2018. - № 4 (70). - С. 52-58.

13. **Максимов, И. С.** Осциллирующие шлифование рельсов железнодорожного пути / И. С. Максимов, В. Г. Рахчеев, С. А. Галанский // Вестник транспорта Поволжья. 2019. - № 2 (74). - С. 46-50.

14. **Максимов, И. С.** Пути повышения качества шлифования рельсов железнодорожного пути / И. С. Максимов, В. Г. Рахчеев, С. А. Галанский // Наука и образование транспорту. 2018. - № 2. - С. 164-165.

15. **Максимов, И. С.** Технология одновременного шлифования рельсов / И. С. Максимов, Е. С. Ефремова, В. Г. Рахчеев // Наука и образование транспорту. 2019. - № 2. - С. 140-142.

16. **Максимов, И. С.** Шлифование рельсов модернизированными композиционными кругами / И. С. Максимов, С. А. Галанский, Е. Г. Сидоров, А. А. Рускин // В сборнике: Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации. Сб. статей XXII Международной научно-практической конференции. 2019. - С. 44-47.

17. **Максимов, И. С.** Повышение эффективности шлифования рельсов железнодорожного пути за счет применения новой конструкции шлифовальных кругов / И. С. Максимов, В. Г. Рахчеев, С. А. Галанский, Л. И. Матюшкова // В сборнике: Молодежная наука в XXI веке: традиции, инновации, векторы развития. Материалы Всероссийской научно-исследовательской конференции. 2019. - С. 38-39.

18. **Максимов, И. С.** Технология шлифования рельсов на высокоскоростных магистралях / И. С. Максимов, Е. С. Ефремова, В. Г. Рахчеев // В сборнике: Научные исследования высшей школы. сборник статей Международной научно-практической конференции. Отв. ред. Гуляев Герман Юрьевич. 2019. - С. 29-31.

19. **Максимов, И. С.** К методике разработки абразивного инструмента для шлифования рельсов в пути / И. С. Максимов, С. А. Галанский, В. Г. Рахчеев // Наука и образование транспорту. 2020. - № 2. - С. 105-107.

20. **Максимов, И. С.** Возможности электрохимического шлифования рельсов / И. С. Максимов, В. Г. Рахчеев, С. А. Галанский, Матюшкова Л.И., Маркушин М.Е // Наука и образование транспорту. 2021. - № 2. - С. 243-245.

21. **Максимов, И. С.** Перспектива повышения производительности шлифования рельсов железнодорожного пути / И. С. Максимов, В. Г. Рахчеев, С. А. Галанский, О. М. Васильева, А. В. Тарасов // Проблемы безопасности на транспорте: Материалы XII Международной научно-практической конференции, посвященной 160-летию Белорусской железной дороги. В 2-х

частях, Гомель, 24–25 ноября 2022 года / Под общей редакцией Ю.И. Кулаженко. Том Часть 1. – Гомель: Учреждение образования "Белорусский государственный университет транспорта", 2022. – С. 395-398. – EDN AMMZRC.

Максимов Илья Сергеевич

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ ФОРМЫ РЕЛЬСОВ И ПОВЫШЕНИЕ
ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОПЕРАЦИИ ИХ ШЛИФОВАНИЯ
КОМПОЗИЦИОННЫМИ МОДИФИЦИРОВАННЫМИ
АБРАЗИВНЫМИ КРУГАМИ**

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета 24.2.393.01

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» (протокол № 35 от 14.07.2023 г.)

Подписано в печать 17.07.2023 г. Формат 60х90^{1/16}

Усл. печ. л. 1,63. Тираж 100 экз. Заказ № 256

Отпечатано в Самарском государственном университете путей сообщения.

443022, Самара, Заводское шоссе, 18

Тел.: 8(846) 255-68-36.