

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Самарский государственный университет путей сообщения»

На правах рукописи



Максимов Илья Сергеевич

УДК 621.923

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

2.5.5 - «Технология и оборудование
механической и физико-технической обработки»

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор В.Г. Рахчеев

Самара - 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
Глава 1. ФОРМИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕЛЬСОВ В ПРОЦЕССЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ.....	15
1.1 Процессы формирования дефектов и износов рельсов в зависимости от условий эксплуатации.....	15
1.2 Технология шлифования рельсов на перегонах направленная на восстановление и продление прочностных свойств рельсов.....	21
1.3 Влияние рецептурно-технологических параметров при проектировании и создании шлифовальных кругов на керамическом связующем.....	26
1.4 Особенности формирования поверхностного слоя рабочей поверхности головок рельсов в процессе механической обработки.....	32
1.5 Выводы и задачи исследований.....	40
Глава 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ШЛИФОВАНИЯ РЕЛЬСОВ КОМПОЗИЦИОННЫМИ АБРАЗИВНЫМИ КРУГАМИ.....	42
2.1 Исследование кинематики движения абразивных зерен по обрабатываемой поверхности дорожки качения рельсов.....	42
2.2 Математическое моделирование формы рабочей поверхности композитных абразивных кругов.....	48
2.3 Теоретическое исследование формирования точности формы профиля головки рельсов.....	53
2.4 Оптимизация формы рабочей поверхности композиционных кругов для шлифования рельсов.....	56
2.5 Теоретические основы распространения тепла в рельсе в процессе шлифования.....	64
2.6. Выводы по главе.....	67
ГЛАВА 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ КОМПОЗИЦИОННЫХ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ.....	69

3.1	Методология определения параметров композиционных шлифовальных кругов в процессе шлифования рабочей поверхности головок железнодорожных рельсов.....	70
3.2	Модификация структуры абразивного инструмента с использованием микро-наполнителей.....	75
3.2.1	Разработка эффективного способа диспергирования наномодификатора МУНТ «Таунит».....	78
3.2.2	Влияние наномодификатора на прочностные свойства керамического сегмента шлифовального круга.....	84
3.3	Методика планирования и оценки результатов исследований работы шлифовальных композиционных кругов.....	89
3.3.1	Влияние эксплуатационных параметров и режимов работы композиционных шлифовальных кругов на величину снимаемого припуска....	90
3.3.2	Стойкость композиционных шлифовальных кругов с учетом их структурных характеристик и режимов обработки поверхности катания головок железнодорожных рельсов.....	95
3.4	Выводы по главе.....	101
ГЛАВА 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ И ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ РЕЛЬСОВ В ПРОЦЕССЕ ШЛИФОВАНИЯ.....		104
4.1.	Последовательность компьютерного моделирования температурного процесса в программном комплексе Ansys/Workbench создание геометрической модели.....	105
4.1.1	Последовательность компьютерного моделирования температурного процесса в программном комплексе Ansys/Workbench создание конечно-элементной модели.....	110
4.1.2	Последовательность компьютерного моделирования температурного процесса в программном комплексе Ansys/Workbench и формирование граничных условий.....	112

4.1.3 Формирование и анализ полученных результатов процесса шлифования поверхности катания железнодорожных рельсов.....	114
4.2 Исследование и моделирование термодинамического состояния композиционных шлифовальных кругов и обработанной поверхности катания головок рельсов.....	116
4.2.1 Исследование и моделирование термодинамического состояния рабочих поверхностей (цельнолитого и композиционного) АИ.....	127
4.3 Оценка влияния характеристик композиционных шлифовальных кругов и режимов обработки на формируемый поверхностный слой верхней части поверхности катания головок железнодорожных рельсов.....	134
4.3.1 Методика планирования и оценки результатов экспериментов.....	137
4.4 Выводы по главе.....	142
ГЛАВА 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ РАЗМЕРОВ СЕГМЕНТОВ КОМПОЗИЦИОННОГО ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА. РАЗРАБОТКА ПРАКТИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОВЫШЕНИЮ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ГОЛОВКИ РЕЛЬСОВ.....	144
5.1 Реализация методики расчёта режимов механической обработки железнодорожных рельсов на операциях профильного шлифования рельсов.....	144
5.2 Разработка практических рекомендации по повышению производительности процесса шлифования поверхности катания головки рельса.....	163
5.3 Выводы по главе.....	167
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	169
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	172
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	195

ВВЕДЕНИЕ

Железнодорожный транспорт в Российской Федерации является локомотивом для экономики всей страны, ввиду своего стратегического положения, осуществляя перевозку грузов и пассажиров на значительные расстояния. Статистические данные за 6 месяцев 2021 года опубликованные холдингом ОАО РЖД свидетельствуют об увеличении темпов погрузки различных грузов до показателей 632,7 млн тонн – что на 4,6 % больше показателя аналогичного периода прошлого года. Не смотря на тяжелую санитарно - эпидемиологическую ситуацию не только в нашей стране, железнодорожный транспорт бесперебойно и эффективно осуществляет задачи и проекты, возложенные на отрасль руководством страны.

В складывающихся условиях положительной динамики развития отрасли и принятых стратегий развития на долгосрочную перспективу, перед различными структурными подразделениями компании возникают весьма актуальные и востребованные задачи. Так в подразделениях службы пути приоритетным направлением становится разработка методик и технологических процессов, обеспечивающих продления жизненного цикла конструкции железнодорожного пути.

Рельсы и рельсовые плети бесстыкового железнодорожного пути являются основными элементами в конструкции железнодорожного пути. При таких обстоятельствах перед учеными транспортниками возникает и требует решения проблема восстановления и увеличения эксплуатационных показателей рельсов. На сегодняшний день существуют ряд технологических приемов и операций направленных на восстановления служебных свойств рельсов и рельсовых плетей.

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

благодаря использованию специализированных комплексов и мобильных средств, на полигоне нашей страны производят шлифование рельсошлифовальные поезда типа РШП - 48 ("Ремпутьмаш") и RR-48 ("Speno") обработку поверхности катания осуществляют шлифкругами, которые фиксируют под определенными углами к головке рельса. Процесс обработки поверхности реализуется по схеме плоского шлифования торцом круга.

В структурных подразделениях службы пути процесс шлифования как правило носит взрывной характер, его назначают при значительном увеличении выхода дефектных и остродефектных рельсов при незначительном пропущенном тоннаже, вследствие такого события операции шлифования необходимо уделять большего внимания, так как при обработке рабочей поверхности головок рельсов происходит изменения поверхностного слоя влияющего на качество поверхности и эксплуатационные показатели рельса в целом.

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

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.

Развитие данного направления продиктовано главным образом тем, что традиционные методы и технологии создания абразивных инструментов влекут значительные трудо - и финансовые затраты.

На текущий момент накоплен и систематизирован значительный объем исследований, рассматривающих процессы абразивной обработки, проектированию и модернизации новых абразивных инструментов. Существенный вклад в развитие данного направления внесли ученые и сотрудники ВНИИАШ и его филиалов, наряду с ними определенных успехов добились опорные столичные и региональные высшие учебные заведения: МГТУ, НГТУ, КНИТУ, КГУ, СамГТУ, СГТУ, СевГУ, УлГТУ, НГТУ, ОГУ и др.

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, А. В. Королев, А. И. Коротков, С. Н. Корчак, В. И. Курдюков, Г. Б. Лурье, Е. Н. Маслов, О. Н. Машкович, Ю. К. Новоселов, В. А. Носенко, В. И. Островский, С. Г. Редько, А. Н. Резников, В. А. Шаламов, Л. Н. Филимонов, Л. В. Худобин, В. М. Шумячер, П. И. Ящерицын и др.

Вопросами, связанными с повышением эффективности процесса шлифования за рубежом, занимались ученые из разных стран: США, Китая, Японии. Определенных успехов в области абразивной обработки добились ученые D.R. Blurtsyan, R.H. Brown, J.D. Kim, M. H. Miller, К. Ватанабэ, К. Июкогава, С. Мацуи, Ву Насирпур, К. Танако и др.

Благодаря исследованиям зарубежных ученых расширены теоретические представления процессов абразивной обработки, выявлены и обоснованы параметры АИ с обработанными поверхностями деталей, изготовленных из разнообразных материалов, созданы и внедрены технологические приемы по созданию абразивных материалов, инструмента с различными рабочими поверхностями, твердости, структуре, зернистости.

Дополнены модели регулирования процессов механической обработки, образования качественного поверхностного слоя после операции шлифований в обработанных изделиях.

Формирование поверхностного слоя обработанной поверхности катания головок рельса в результате шлифования приводит к изменению физико-механических показателей рельсов, тем самым этот слой влияет на эксплуатационные свойства рельсов. По этой причине целесообразно выявить причинно-следственную связь технологических факторов процесса обработки с качеством обработанной поверхностью и продлением эксплуатационного ресурса рельсов.

В предшествующих работах, направленных на восстановление и продление эксплуатационного ресурса рельсов, результаты исследований заключались в разработки методик и технологических процессов профильного шлифования с учетом следующих факторов: периодичности выполнения работ и производительности обработки.

Преобладающими факторами в процессе профильного шлифования влияющими на ресурс и жизненный цикл рельсов являются параметры абразивного инструмента его твердость, структура, зернистость и собственно режимы механической обработки.

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.

В настоящей работе автор предлагает существенно новый способ обработки рабочей поверхности головки рельса модифицированным абразивным инструментом, с обеспечением повышенных показателей качества обработанной поверхности, направленных на увеличение эксплуатационного ресурса рельсов и рельсовых плетей.

Целью данной работы является: повышение производительности и качества финишной обработки железнодорожных рельсов, путем разработки

методики расчета высокопроизводительных циклов шлифования с применением композиционных модифицированных абразивных кругов.

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

Объектом исследования процесс шлифования железнодорожных рельсов модифицированными композиционными шлифовальными кругами на керамических нанокремниевых связках.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- 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 бакелитовых участков и керамических вставок композиционного шлифовального круга для качественного шлифования рельсов;

- определить критерий качественного шлифования поверхности катания головок рельса, обеспечивающий равномерный съём металла и износ абразивного инструмента (АИ);

- 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;

- определить влияние физико-механических характеристик сегментов композиционных шлифовальных кругов и их режимных параметров, на величину съёма 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:

- разработана методика проектирования рабочей поверхности абразивного инструмента, определены геометрические размеры абразивных участков и керамических вставок композиционного шлифовального круга для шлифования рельсов;

- 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;

- 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;

- 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 $T=7,4$ ч; шероховатость обработанной поверхности $R_{z.p.c}=65$ мкм.

Таким образом выполнение указанных задач позволит решить сформулированную научную проблему и достичь практического результата на предприятиях службы пути компании ОАО РЖД.

Научная новизна принятых в диссертационном исследовании решений обоснована и засвидетельствована федеральной службой по интеллектуальной собственности в виде патента (№ RU 2697542 C1).

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

Теоретическая значимость работы: Разработана методика расчета режимов обработки для операций профильного шлифования железнодорожных рельсов, реализующих максимальную производительность шлифования с заданными показателями качества рельсов. Разработаны математические модели: движения абразивного зерна при вращении шлифкруга и поступательного движения шлифовального поезда, геометрических размеров бакелитовых участков и нанокерамических вставок на рабочей поверхности композиционного шлифовального круга.

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.

По результатам моделирования и анализа формируемого теплового потока на рабочей поверхности композиционных шлифовальных кругов и обработанной поверхности катания головок рельсов определены пути и направления к повышению производительности процесса профильного шлифования головок рельсов в пути.

Разработана и дополнена теория формирования точности формы профиля головки рабочей поверхности рельсов, композиционными

шлифовальными кругами, благодаря чему происходит повышению точности изделий.

Разработан способ внедрения нано-наполнителя в формовочную смесь с последующим созданием абразивного композиционного инструмента как для профильного шлифования рельсов, так и при реализации других видов механической обработки деталей и узлов.

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, 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.

Практическая значимость работы заключается в разработанных и предложенных производству:

- разработанного композиционного шлифовального круга для шлифования верхней части рабочей поверхности головок железнодорожных рельсов и рельсовых плетей (Патент РФ № 2697542 С1);

- 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.

На защиту выносятся теоретические, экспериментальные, методические и проектные положения в разработке композиционных шлифовальных кругов, используемых на операциях профильного шлифования рабочей поверхности железнодорожных рельсов и рельсовых плетей, а именно:

- кинематическая модель процесса шлифования рельсов в пути на основе применения композиционных кругов;
- результаты теоретического исследования шлифования рельсов композиционными шлифовальными кругами;
- способ упрочнения структуры абразивных инструментов за счет использования нано-наполнителей в формовочных композициях АИ;
- научно обоснованные результаты комплексных экспериментальных исследований взаимосвязей показателей композиционных шлифовальных кругов с режимами и параметрами обработки поверхностей рельсов;
- методика компьютерного моделирования температурного состояния композиционных шлифовальных кругов и поверхности катания рельсов, в процессе механической обработки.

Степень достоверности результатов диссертационного исследования гарантирована и обеспечена актуальными методами измерений и обработкой полученных результатов. Экспериментально-лабораторные и производственные изыскания проводились на аттестованном оборудовании лабораториях: центра коллективного пользования Самарского государственного технического университета «Исследование физико-химических свойств веществ и материалов», научно-производственного центра информационных и транспортных систем (АО НПЦ ИНФОТРАНС), учебном полигоне Самарского государственного университета путей сообщения. Применяемые в работе контрольно-измерительные системы и

специализированные приборы перед проведением экспериментальных и практических исследований подвергались поверке и калибровке.

Достоверность и аргументированность в ходе исследования результатов и решений подтверждается сходимостью теоретических и экспериментальных данных полученными другими учеными, применением современной программной системы конечно-элементного анализа ANSYS, сходимостью экспериментальных и практических результатов.

Достоверность разработанного нового абразивного инструмента подтверждается апробацией с внедрением модифицированного абразивного инструмента на предприятие.

Апробация результатов работы. 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. Общий объем диссертационной работы 205 страниц машинописного текста, в том числе 80 рисунков, 15 таблиц, 4 приложения, структура диссертации классическая включает в себя введение, 5 центральных глав, заключения и списка литературы состоящего из 203 наименований источников.

ГЛАВА 1. ФОРМИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕЛЬСОВ В ПРОЦЕССЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

1.1 Процессы формирования дефектов и износов рельсов в зависимости от условий эксплуатации

В процессе взаимодействия колес подвижного состава и рельсов практически всегда используются ряд терминов и определений, износоустойчивость-способность материала проявлять сопротивление к изнашиванию, износостойкость и др.

Износ - изменение геометрических параметров, формы, массы, состояния поверхностного слоя рельсов и бандажей в результате трения. Износ (старение) — это механический процесс, который сопровождается усугубляющими физико-химическими факторами, в зависимости от характера внешних воздействий на изделие различают следующие виды износа: абразивный, кавитационный, адгезионный, окислительный, тепловой.

В результате динамического взаимодействия между рельсом и колесом проявляются упомянутые выше виды износов, оказывающие в разной степени влияние на поверхности катания рельсов и бандажи колесных пар подвижного состава [114].

Формирование вертикального и бокового износов рельсов происходит за счет потери материала, в прямых участках железнодорожного пути формируется вертикальный износ, в кривых участках на наружной рельсовой нити - боковой, или в следствии смятия (пластической деформации рельса).

Зарождение волнообразного износа связано, с качеством металла и технологией производства рельсов, классификация данного вида износа в соответствии с нормативно техническими документами ОАО РЖД, рифли проявляются на прямом участке, волны скольжения гребней колес в кривом.

В свою очередь формирование таких износов проявляется за счет внешних факторов, к которым относятся план и профиль участков железной

дороги, режимы вождения подвижного состава имеются ввиду ускорение, торможение, допустимые скорости на перегоне.

Не мало важную роль в процессе формирования данного вида износа оказывают параметры поезда его вес, тяга, колесная база тележек, комплекс технических элементов подвешивания и демпфирования ходовых частей подвижного состава. В результате функционирования железнодорожного пути с подвижным составом в элементах верхнего строения пути, возникают неисправности в виде нарушения геометрии рельсовой колеи и как следствие появляются различные повреждения и дефекты на поверхностях рельсах.

В соответствии с нормативно-техническими документами холдинга ОАО РЖД дефекты рельсов классифицируются на 9 групп [138]. По представленным данным Самарского регионального центра диагностики и мониторинга устройств инфраструктуры Куйбышевской дирекции инфраструктуры в период с 2018-2020 годы наблюдается значительный рост дефектов I и IV групп (рисунок 1.1).

На поврежденных поверхностях рельсов увеличиваются контактные напряжения вследствие не оптимального контакта в зоне колесо-рельс. Своевременное обнаружение опасных дефектов является главной задачей подразделений неразрушающего контроля.

В случае неблагоприятного развития ситуации с обнаружением дефектного рельса происходят изломы рельсов под поездом влекущие за собой огромные материальные и человеческие потери. В целом воздействовать на динамику износообразования рельсов возможно различными способами [64].

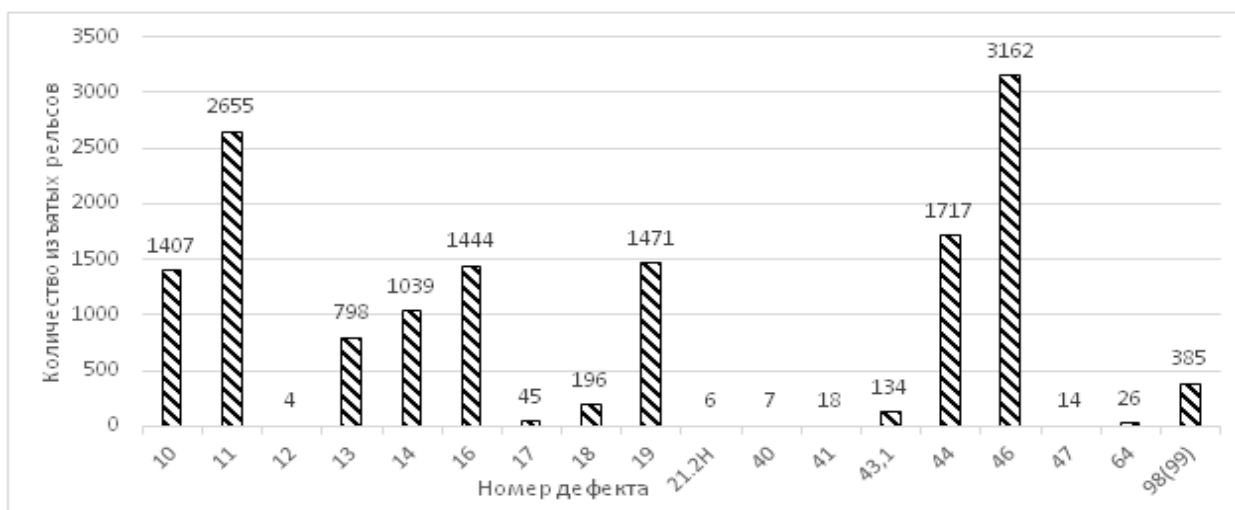


Рис. 1.1. - Динамика изъятых из пути дефектных рельсов в период с 2018-2020 годы:

10 - отслоение и выкрашивание из-за волосовин и др; 11 - трещины и выкрашивания металла на боковой рабочей выкружке или на средней части головки, возникшие изнутри; 12 - трещины и выкрашивания металла на боковой рабочей выкружке или на средней части головки, возникшие от наружной поверхности рельса из-за недостаточной контактно-усталостной прочности рельсового металла; 13 - выкрашивание металла на поверхности катания из-за повышенного динамического воздействия в болтовых стыках; 14 - пробоксовка в виде местного износа и выкрашивания металла; 16 - выкрашивание металла на поверхности катания головки; 17 - выкрашивание металла на поверхности катания головки в зоне сварного стыка; 18 - выкрашивание наплавленного слоя металла в местах наплавки; 19 - контроленепригодность из-за наличия выкрашиваний, трещин на поверхности катания; 21.2Н - поперечные усталостные трещины в головке в виде светлого или темного пятна; 40 - волнообразный износ и смятие головки рельса; 41 - смятие и вертикальный износ головки рельса из-за недостаточной прочности металла; 43.1 - смятие головки в виде седловины в зоне болтового стыка; 44 - боковой износ головки рельса сверх допустимых норм; 46 - смятие и износ головки в зоне сварного стыка; 47 - смятие и износ головки в зоне сварного стыка из-за местного снижения механических свойств металла; 64 - местные выработки или местная коррозия подошвы рельса; 98(99) - Другие, кроме перечисленных выше, дефекты и повреждения рельсов, оставленных в пути, опасность эксплуатации которых может быть оценена по ближайшему типоразмеру дефекта.

В рамках данной работы мы остановимся на дефектах I группы, которая включает в себя следующие виды повреждений рельсов: 10 - отслоение и выкрашивание из-за волосовин и др; 11 - трещины и выкрашивания металла на боковой рабочей выкружке или на средней части головки, возникшие изнутри; 12 - трещины и выкрашивания металла на боковой рабочей выкружке или на средней части головки, возникшие от наружной поверхности рельса из-за недостаточной контактно-усталостной

прочности рельсового металла; 13 - выкрашивание металла на поверхности катания из-за повышенного динамического воздействия в болтовых стыках; 14 - пробоксовка в виде местного износа и выкрашивания металла; 16 - выкрашивание металла на поверхности катания головки; 17 - выкрашивание металла на поверхности катания головки в зоне сварного стыка; 18 - выкрашивание наплавленного слоя металла в местах наплавки; 19 - контроленепригодность из-за наличия выкрашиваний, трещин на поверхности катания.

Анализируя данные Самарского регионального центра диагностики и мониторинга устройств инфраструктуры по изъятым дефектным рельсам из пути в период с 2018 - 2020 год, мы можем сделать вывод о том, что в условиях эксплуатации, свойственных Куйбышевской железной дороге, изъятие дефектных рельсов по дефектам I группы производится, главным образом, по 11 рисунку (рисунок 1.2).

Таблица 1.1. Изъятие дефектных рельсов по дефектам I группы

Рисунок	Количество изъятых рельсов		
	2018 год	2019 год	2020 год
10	850	558	365
11	859	982	814
12	2	1	1
13	255	246	297
14	464	286	289
16	571	461	412
17	6	20	19
18	69	67	60
19	244	701	531

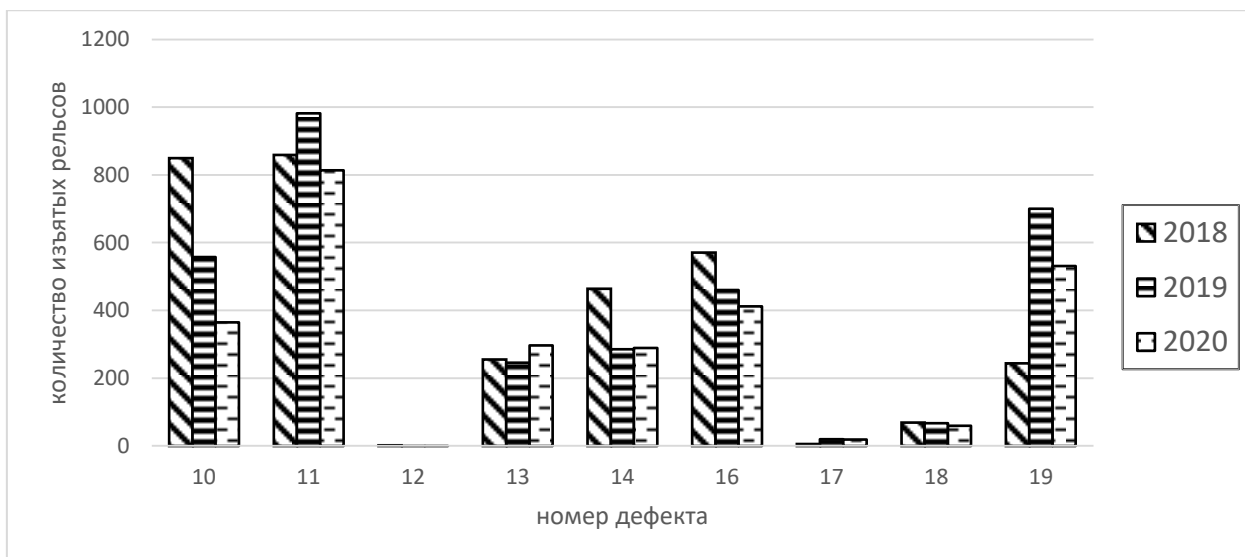


Рис. 1.2. - Динамика изъятых из пути дефектных рельсов I группы в период с 2018 - 2020 годы для условий Куйбышевской ДИ

Рабочая поверхность головки рельса кардинально отличается по форме в зависимости от характера расположения рельсовых нитей, находятся ли они на прямом участке железнодорожного пути, либо располагаются в кривых участках различных радиусов. Не мало важным является фактор расположения рельсов на внутренней или наружной рельсовой нити. В результате наблюдается неравномерная динамика изменения геометрии боковой поверхности рельсов. На рисунках 1.3, 1.4 показаны зависимости вертикального и бокового износов рельсов типа Р65 от пропущенного по ним тоннажа в контрольных кривых различных радиусов.

Анализируя полученные зависимости приходим к следующим заключениям: на прямом участке железнодорожного пути интенсивность вертикального износа поверхности катания головки рельса, не значительно меньше, чем в контрольных кривых, однако боковой износ практически отсутствует. В процессе измерений бокового износа на рабочей поверхности головки рельсов образовывались наплывы металла, тем самым значения бокового износа приобретали отрицательные значения.

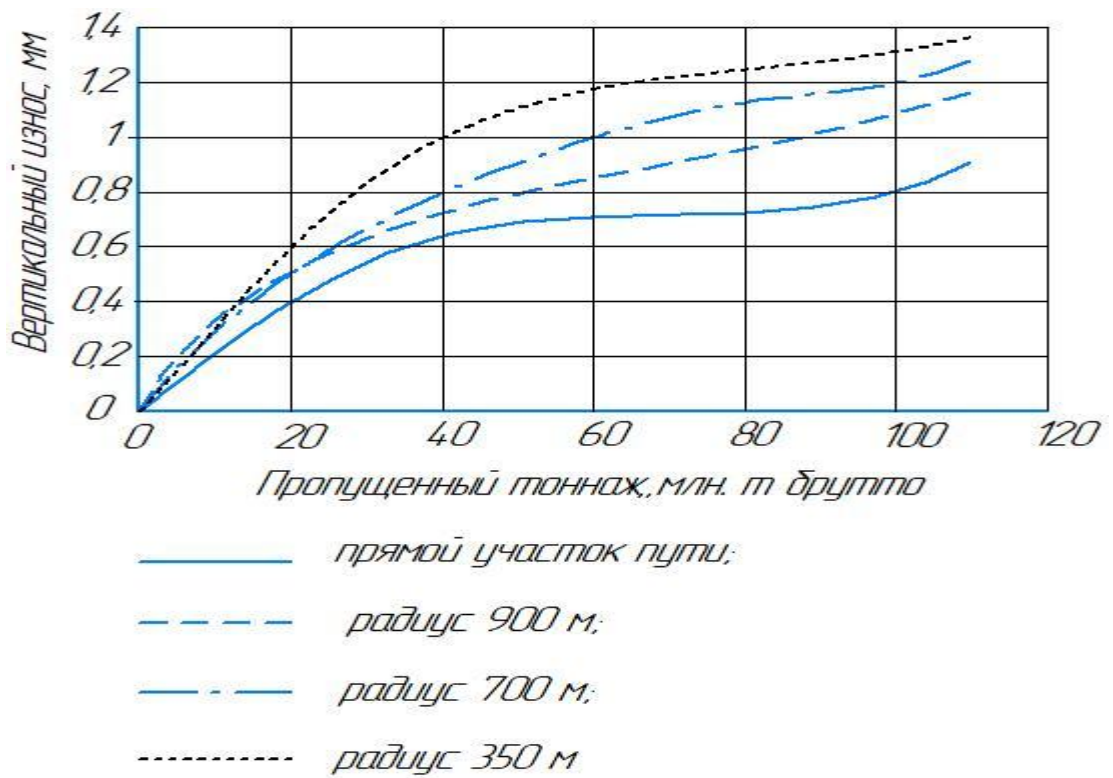


Рис. 1.3 - Зависимость износа рельсов от пропущенного тоннажа прямого и контрольных кривых различного радиуса участков железнодорожного пути

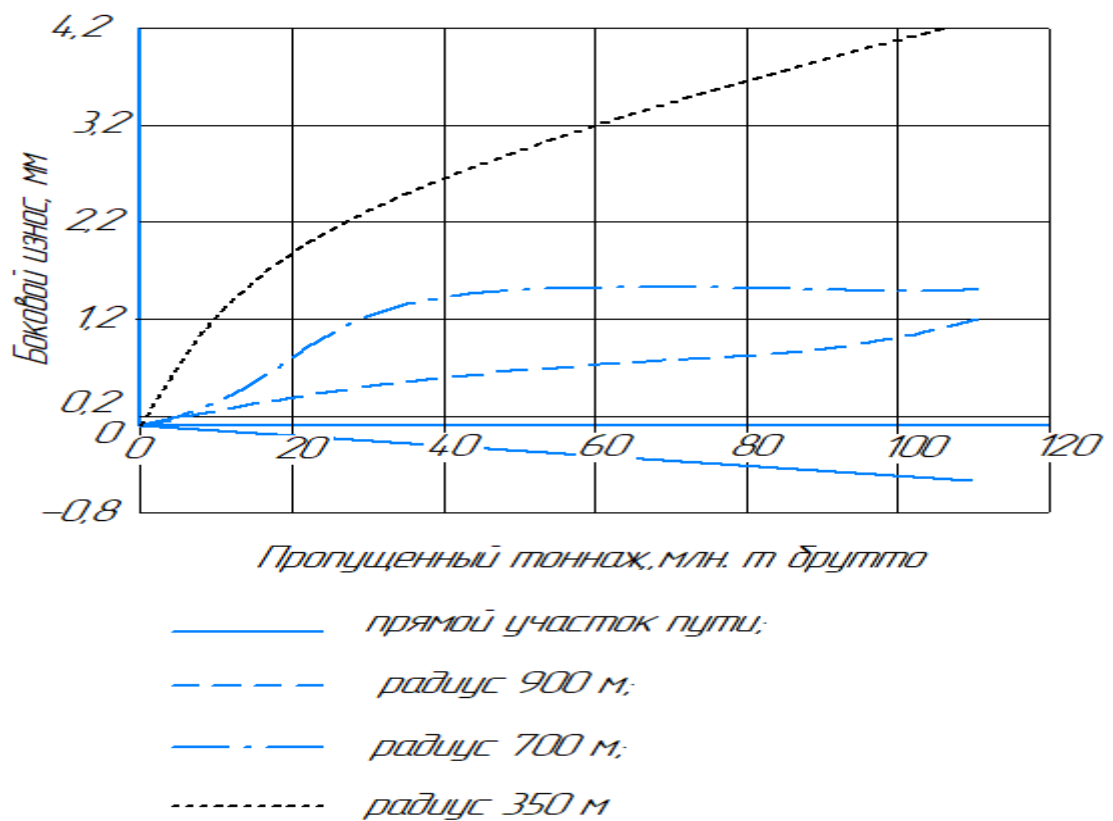


Рис. 1.4 - Зависимость бокового износа от пропущенного тоннажа прямого и контрольных кривых различного радиуса участков железнодорожного пути

1.2 Технология шлифования рельсов на перегонах направленная на восстановление и продление прочностных свойств рельсов

Восстановление и продление эксплуатационных свойств самого ответственного элемента в конструкции железнодорожного пути является актуальной задачей для холдинга РЖД. В настоящее время на сети дорог в больших объемах и с высокой интенсивностью эксплуатируются грузовые составы тяжеловесных, длинносоставных поездов, увеличивается и скорость пассажирских перевозок с открытием участков высокоскоростного движения. Все эти факторы требуют повышенного внимания к элементам верхнего строения пути и в частности к рельсам. Одним из направлений позволяющее снизить износ рельсов является технология шлифования рельсов на перегонах специализированными рельсошлифовальными поездами и мобильными средствами производящих обработку поверхности катания рельсов на станционных и подъездных путях.

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

Задачи и цели, которые достигаются за счет использования технологического приема профильного шлифования можно разделить на три стадии:

1. Удаление обезуглероженного слоя и заводских дефектов с новых рельсов, на этом этапе производят обработку поверхности катания и рабочей грани головки рельса;

2. Формирование ремонтного профиля рельсов при наработке тоннажа до 150 млн.т брутто, с целью устранения коротких и длинных продольных неровностей;

3. Восстановление геометрии в зоне рабочей выкружки головки рельса при пропущенном тоннаже 150-300 млн.т брутто, с ликвидацией продольных неровностей и предупреждение развития дефектов контактно-усталостного характера [1].

Наибольший эффект от применения профильной обработки головок рельсов возможно достичь в транспортных системах замкнутого типа, в таких системах эксплуатируется подвижной состав с профилями колес одного типа.

В зависимости от плана железнодорожного пути на прямых и кривых участках эксплуатируются рельсы различных профилей. Так для кривых участков, рельсы подвергают механической обработке под ассиметричный профиль, за счет такого исполнения рельсы в наружной нити приобретают одноточечный контакт с колесами подвижного состава. Благодаря такому профилю происходит равномерное вписывание тележек подвижного состава за счет разности радиусов колес, вписывающихся по наружной и внутренней рельсовым нитям. Для прямого участка железнодорожного пути профиль поверхности катания головки рельса шлифуют под многоточечный контакт, так как при ассиметричном профиле происходит влияние подвижного состава, которое выявляется в наибольшей мере.

Эксплуатация ремонтных профилей рельсов на полигонах замкнутых транспортных систем способствует значительному продлению эксплуатационного ресурса не только рельсов, но и колес подвижного состава [135].

Определение износа рельсов в кривых участках железнодорожного пути с учетом применения технологического шлифования определялось в контрольных кривых по наружной рельсовой нити. В виду того, что рабочие органы специализированных рельсошлифовальных поездов, мобильных и ручных средств не обхватывают рабочей грани головок наружных рельсов, износ металла этой поверхности происходит в следствии естественного контакта гребней колес с рельсами, шлифование рельсов оказывает второстепенное воздействие путем изменений контактов в системе колесо-рельс.

В результате выявлено незначительное влияние на изменение естественного бокового износа рельсов от технологического шлифования рельсов в кривых большого и среднего радиусов, однако использование такого приема влечет за собой увеличение суммарных потерь металла во всех кривых.

В тоже самое время возникающие затраты, связанные с использованием операций шлифовки рельсов, носят незначительный характер с учетом положительных эффектов, от процесса профильной обработки рельсов, исключая зарождение и развитие поверхностных дефектов, ликвидации волнообразного износа, улучшение выявляемости и работоспособности средств неразрушающего контроля благодаря снятию поверхностного дефектного слоя.

Неоспоримым преимуществом технологического приема профильного шлифования поверхностей рельсов является то, что удастся продлить жизненный цикл изделий, за счет предотвращения критических темпов развития поверхностных дефектов, а также уменьшить интенсивность износа. Использование механической обработки на рабочих поверхностях рельсов не удастся ликвидировать все факторы присущие процессу зарождению и развитию трещин, однако удастся снизить динамическое воздействие колес подвижного состава на элементы железнодорожного пути,

тем самым удастся оптимизировать взаимодействие в системе колесо-рельс [136,137].

Измененный ремонтный профиль головки рельса, полученный в результате шлифования поверхности катания обеспечивает равномерное перераспределение сил в местах контакта колеса и рельса, в результате такого перераспределения ликвидируются или уменьшаются вертикальные неровности на поверхности катания рельсов. Для достижения таких показателей рельсошлифовальным комплексам необходимо произвести несколько проходов по обрабатываемому участку перегона.

В виду такой сложной технологической операции по профильному шлифованию поверхностей рельсов в пути, процесс обработки накладывает ряд трудностей и особенностей, абразивный инструмент должен соответствовать параметрам и режимам работы обеспечивающих наиболее высокие темпы производительности рельсошлифовальных комплексов с обеспечением необходимых свойств поверхности катания после проведенных работ [107, 175].

На сегодняшний день прения, связанные с профильным шлифованием поверхностей рельсов, продолжают, отсутствует единое мнение о том на какую величину производить съем металла по головке рельса, какой должна быть периодичность и интенсивность шлифования. Однако вопрос шлифования приобретает многополярную позицию, он рассматривается не только как инструмент по продлению эксплуатационных ресурсов рельсов, но и как средство, направленное на улучшения взаимодействия колес подвижного состава и рельсов.

Систематизируя и проводя детальный анализ предыдущих работ в области оптимизации технологического процесса профильного шлифования рельсов можно акцентировать внимание на следующих направлениях: уменьшения влияния от температурных напряжений в процессе резания влекущая за собой повышение эффективности процесса шлифования рельсов в пути [76]; повышение производительности, осуществляемой на совокупном

исследовании процесса механической обработки с учетом основных параметров рассматриваемого процесса [180]; улучшение процесса обработки поверхности рельсов благодаря рациональному подбору режимов и условий шлифования [181, 186]; формирование и регулировании остаточных напряжений [44]; качество и шероховатость обработанной поверхности катания рельса с учетом влияния наклепа в поверхностном слое головки рельса [53].

Практическая реализация и внедрение полученных результатов в виде оптимизированных технологических процессов, новых абразивных инструментов, автоматизированных программных средств безусловно обеспечивают железнодорожную промышленность положительными показателями. Однако производя оценку по объемам работ осуществляемых рельсошлифовальными поездами (рисунок 1.5.) и количества изъятых остродефектных рельсов (рисунок 1.6.), заставляет снова сфокусировать внимание на исследовании и модернизации технологического процесса профильного шлифования поверхностей головок рельсов в пути.

Предпочтительнее, по нашему мнению, акцентировать внимание на повышении производительности шлифования рельсов в пути за счет спроектированного и созданного абразивного инструмента с повышенными физико-механическими показателями.

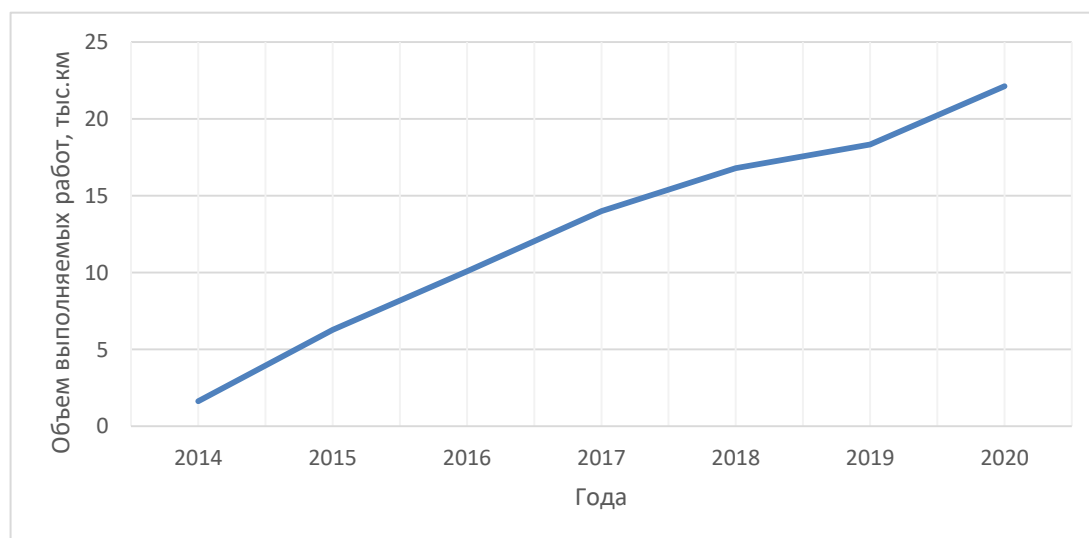


Рис. 1.5 - Объем выполняемых работ рельсошлифовальными поездами по годам

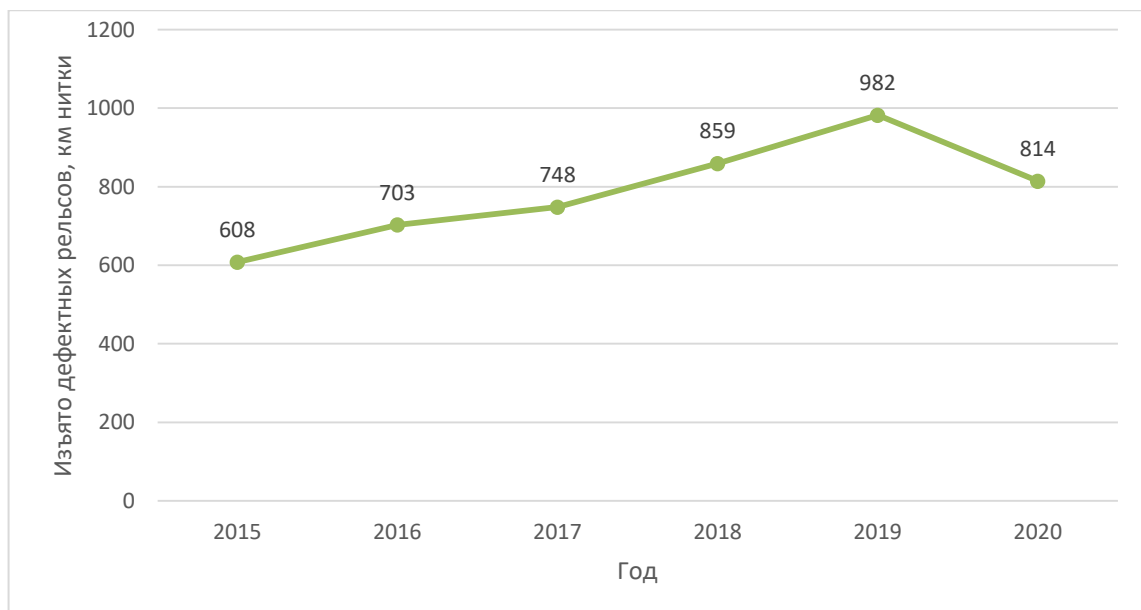


Рис. 1.6 - Статистические данные по изъятым дефектным рельсам по Куйбышевской железной дороге

Для повышения эффективности работы рельсошлифовальных комплексов в настоящее время наиболее актуальными направлениями для исследования являются: увеличение производительности механической обработки рабочей поверхности рельсов в пути; достижение качественной поверхности дорожек качения после завершения профильного шлифования; модернизация и создание абразивных шлифовальных кругов с повышенными эксплуатационными характеристиками.

1.3 Влияние рецептурно-технологических параметров при проектировании и создании шлифовальных кругов на керамическом связующем

Проектирование и создание абразивного инструмента (АИ) с повышенными эксплуатационными характеристиками на сегодняшний день сосредоточено на определенных моментах, в первую очередь обусловлено усиливающим спросом со стороны потребителей, не мало важным является второе направление заключающиеся в том, что внедряются новые технологические процессы механической обработки различных материалов, учет представленных подходов необходим для создания инструментов

разнообразного применения с повышенными показателями качества и эффективности.

Самыми 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 [17, 22, 28, 31, 33, 49, 183, 193, 194]; проектирование и создание новых видов композиционного, высокопористого инструмента применяемого на операциях скоростного шлифования и др. [2, 52, 59, 84, 109, 154, 161, 190]; использование различных режимов термообработки и импрегнирование новыми перспективными составами [30, 39, 45, 57, 60, 61, 65, 112]; оптимизация рецептур [32, 47, 110, 194] и т.д.

Теоретические и экспериментальные данные, полученные отечественными и зарубежными учеными по модернизации АИ раскрывают инновационные пути решения в создании инструмента с повышенными показателями, однако вопросы регулирования характеристик еще не в полной мере изучены. Необходимо решить вопрос процесса трещинообразования в теле инструмента за счет внедрения упрочнителей структуры. Не в полном объеме изучены механизмы изменения параметров и характеристик абразивного инструмента из-за воздействия внешней среды, которая однозначно оказывает влияние на конечный результат в процессе механической обработки поверхностей деталей [73, 80, 179, 187, 193].

Обоснование и выбор зернового состава абразивных частиц является наиболее практичным способом при создании эффективного абразивного инструмента, стоит заметить, что вопросу влияния гранулометрического состава не уделяется должного внимания.

Гранулометрический состав и взаимосвязь между абразивными частицами в большей мере оказывают влияние на структуру и физико-механические параметры инструмента, а также оказывают воздействие на

технологический процесс шлифования, варьируя такими параметрами как съём металла, качество обработанной поверхности, износ и стойкость абразивного инструмента.

Адресное внесение изменений в состав абразивного инструмента с учетом гранулометрических показателей, соотношением отдельных фракций формовочной композиции, оптимальным выбором геометрических форм шлифматериалов, прокладывают пути и возможности для совершенствования и реализации новых инструментов присущих конкретным технологическим процессам по шлифованию материалов.

Внутренняя структура и зерновой состав абразивного инструмента определяют структурно-механические свойства инструмента. Рассматривать эти два параметра при проектировании новых инструментов необходимо параллельно. Принципиальная взаимосвязь между указанными параметрами, оказывающая воздействие на эффективность абразивного инструмента отображена в следующих научных работах [17, 19, 27, 31, 132, 194, 196].

Главными факторами оказывающие влияние на структуру и физико-механические свойства проектируемых абразивных инструментов являются дисперсность частиц шлифматериала и их соотношение в зерновом составе. По мнению авторов [17, 79, 190, 195], с уменьшением дисперсности и оптимизации зернового состава абразивных частиц, инструмент приобретает улучшенные эксплуатационные показатели.

При увеличении эксплуатационных показателей абразивного инструмента требуется решение ряда задач, таких как корректный подбор шлифматериала, зерновой состав, твердость, структура абразивных частиц и связующий компонент.

В практике создания и проектирования инструмента необходимым условием при регулировании эксплуатационных показателей является тот факт, что за счет использования оптимального сочетания конкретных видов абразива и связующих компонентов удастся воздействовать на следующие параметры твердость и структуру инструмента. Возможность регулировать

зернистость инструмента позволяет в больших пределах изменять структурно-механические свойства и параметры рабочей поверхности проектируемого инструмента [131]. Повешение номера зернистости и структуры, уменьшение твердости при существующих рецептурно-технологических линиях как правило влечет к снижению эксплуатационных свойств инструмента.

Пути модификации АИ направленные на повышение эффективности за счет изменения структурно-механических свойств заключаются в использовании в рецептурах различных сложных многокомплексных добавок наполнителей (модификаторов структуры), влияние на структуру черепка инструмента которых возможно классифицировать по их функциональному назначению: порообразующие, упрочняющие структуру, импрегнирующие и многокомплексного воздействия.

Использование рецептурно-технологического приема по внедрению в структуру черепка АИ модификаторов оптимального количества, позволяет регулировать процессы структурообразования и упрочнять структуру новых инструментов, тем самым удастся повысить показатели технологической обработки материалов.

На сегодняшний день в виду продолжающегося экономического кризиса и связанными с ними программами импортозамещения перед предприятиями машиностроительного и абразивного комплексов, особенно остро стоит вопрос в создании новых и повышения эффективности уже существующих абразивных инструментов, наиболее прогрессивным путем в сложившийся ситуации является внедрение модификаторов в структуру черепка инструмента.

Ниже проведем анализ существующих и рекомендованных специализированных абразивных смесей, гранулометрических составов абразивных частиц, специальных технологических приемов, благодаря которым возможно спроектировать абразивные инструменты с повышенными эксплуатационными параметрами, с целью выполнения

различных видов операций по механической обработке деталей в различных отраслях промышленности.

Так авторами в работе [195] показывается абразивная масса, в состав которой входят абразивные частицы разной зернистости и вяжущий компонент. Частицы крупной фракции выполняют базовый процесс резания, мелкая фракция частиц используется как заполнитель пространства между крупными зернами шлифматериала, в результате повышается качество обрабатываемой поверхности, значительно увеличивается показатель прочности самого инструмента.

При создании шлифовальных кругов по традиционной технологии с повышенным содержанием связующего компонента необходимого для повышенных показателей прочности круга, установлено что с увеличением связки происходит процесс вытекание связующего из заготовки с деформацией черепка инструмента. С целью минимизации данного изъяна автор в своей работе [52] предлагает ввести в формовочную смесь абразивные частицы мелкой фракции, роль которых заключалась в заполнении пустот между зернами основной фракции. Использование такого приема приводит к существенным изменениям структуры материала в следствии значительного количества контактов и армирования между зернами крупной и мелкой фракции, в конечном итоге происходит повышение механических свойств шлифовального круга. По результатам экспериментальных исследований шлифкруги изготовленные по предлагаемой технологии показали следующие эксплуатационные параметры: произошло увеличение твердости инструмента на одну - две ступени, повысилось сопротивление на изгиб с 5 - 60 %, увеличилась стойкость на 30 - 33 % шлифовального круга до состояния полного износа, в сравнении с шлифовальными кругами изготовленными по традиционной рецептуре. В тоже время, автор работы утверждает, что качество обрабатываемой поверхности не уступает, а в ряде случаев превышает качество поверхности, обработанной традиционным шлифовальным кругом.

Развитие направления связанного с оптимизацией рецептур формовочных смесей и гранулометрических составов достаточно широко отображены в отечественных и зарубежных научных трудах [12 - 15, 21, 51, 68, 69, 79, 103, 115, 157, 196 и др.].

Особое направление в проектировании высокопористых абразивных инструментов приобретают исследования ученых использующих порообразующие добавки в рецептурах, для изготовления такого класса инструментов. Достаточно фундаментальные и подробные исследования методов с образованием пористых структур абразивных инструментов, использующих добавки рассматриваемого типа представлены в труде Курдюкова В. И [81].

Использование в качестве добавок наполнителей, сплошных цельных частиц по геометрической форме и свойствам близким к параметрам основного шлифматериала абразивного инструмента, исключают дефекты в черепке инструмента, чем при использовании полых сферических элементов.

Так при формовании и обжиге инструмента с использованием наполнителей из температурноустойчивых частиц с размерами сопоставимыми с размерами основного зерна не происходит образование дополнительных пор, в отличии от введения в формовочную смесь добавок в виде полых сферических, выгорающих наполнителей. Улучшенная структура черепка инструмента за счет такого метода повышает в конечном итоге и эксплуатационные характеристики абразивного инструмента, в отличии от инструмента модифицированного выгорающими и полыми сферическими наполнителями [115, 125].

При рассмотрении направления связанного с модификацией структуры АИ с повышенными эксплуатационными показателями, информация имеющаяся в патентной базе и научно-производственных источниках предлагает многовариантность подходов в получении абразивного инструмента, за счет оптимизации рецептуры и гранулометрического состава формовочной смеси [13, 14, 16, 21, 68, 69, 79, 103, 115, 157, 196 и др.].

Стоит заметить, что в основном, подходы авторов заключаются в изобретательской направленности. Разница в соотношении между зернами основного шлифматериала и наполнителей достаточно сильно разнятся, так ряд ученых рекомендуют добавлять в формовочную смесь от 4 - 6 % наполнителей [103, 157], другие значительно увеличивают объемное содержание добавок и предлагают внедрять от 28 % и более [51, 81]. 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. Влияние рецептурных факторов, на эксплуатационные параметры абразивного инструмента и процессы шлифования в научных сообществах и школах не обрело должного внимания.

Ввиду такого положения целесообразно рассмотреть возможность регулирования и оптимизации рецептурных составов формовочных смесей с целью проектирования и создания абразивных инструментов с повышенными эксплуатационными показателями для определенных операций шлифования.

1.4 Особенности формирования поверхностного слоя рабочей поверхности головок рельсов в процессе механической обработки

Формирование поверхностного слоя изделия возникает в процессе взаимодействия абразивных частиц с обрабатываемой поверхностью с одной стороны характерных для процесса резания и пластических деформаций, сопутствующих механической обработки с другой стороны.

При исследовании вопроса формирования и получения поверхностного слоя необходимо акцентировать внимание на процессе образования шероховатости обработанной поверхности изделия. Процесс возникновения шероховатости на поверхности изделия обусловлен повторяющимися

движениями абразивных зерен инструмента по шлифованной поверхности. [191].

Возникающий макро- и микрорельефы шлифованной поверхности, полученные в результате взаимодействия АИ с поверхностью, значительно изменяются за счет пластических деформаций сопровождающие процесс механической обработки.

В процессе механической обработки в поверхностном слое наблюдается внедрение абразивных зерен со снятием мелкодисперсных стружек, в этой связи показатели качества обрабатываемой поверхности будут зависеть в первую очередь от условий и режимов шлифования, влияющих на работу абразивных зерен режущего инструмента, а также от физико-механических свойств обрабатываемого изделия.

С практической точки зрения повысить показатели качества поверхностного слоя рабочей поверхности головок рельса возможно с исследованием фактора окружной скорости шлифовального круга. Результаты исследований, полученные учеными в своих трудах [84, 99, 100] о влиянии окружной скорости шлифовального АИ на точность обработанной поверхности позволяют сделать следующие выводы:

1. Увеличение окружной скорости шлифовального круга оставляет на обработанной поверхности траекторию абразивных зерен с более короткими следами, чем при шлифовании на низких окружных скоростях;

2. Шлифование происходящие с большой окружной скоростью формирует большое количество следов-траекторий абразивных зерен на единицу обрабатываемой поверхности, чем обработка с меньшей окружной скоростью шлифовального круга.

С увеличением окружной скорости шлифкруга происходят изменения в работе абразивных зерен уменьшается величина съема металла, убираемого одним зерном, в следствии этого на микрорельефе обработанной поверхности будут наблюдаться канавки глубиной значительно меньше, чем канавки, полученные в результате обработки на незначительных окружных

скоростях шлифовального круга. [98-100,189]. В независимости от обрабатываемых материалов отмеченные выше выводы обоснованы и аргументированы.

В качестве примера исследовалась поверхность образцов, изготовленных из бронзы, обработка поверхностей происходила при окружной скорости шлифовального круга 30 м/сек и 9,1 м/сек. В результате микрорельеф поверхности, полученной при высокой скорости круга, имел более короткие и частые следы траекторий абразивных зерен, чем рельеф поверхности, полученный в результате проходов на низкой скорости шлифовального круга. В результате убедительным становится заключение о том, что увеличение окружной скорости шлифовального круга АИ влияет на качество обработанной поверхности.

Е. Н. Маслов в своих научных исследованиях [98, 99] определил уравнение толщины слоя, снимаемого единичным абразивным зерном шлифовального круга, с целью создания качественной обработанной поверхности и допустил следующее:

- изменение режимов (продольного и поперечного) подач абразивного инструмента с постоянным числом оборотов шлифкруга и необходимой жесткости приводит к увеличению глубины канавок, т.е. изменяется микрорельеф и качество обработанной поверхности;

- повышение диаметрального размера шлифкруга с постоянным числом оборотов способствует к формированию микрорельефа с поверхностью соответствующей меньшей шероховатости.

Интерпретация допущений предложенных Е.Н. Масловым связано с величиной снимаемого слоя совершаемых единичным абразивным зерном шлифовального круга. С изменением величины убираемого слоя происходит изменение нагрузок и напряженности, передаваемых на абразивные зерна, в результате проникновение шлифматериала в поверхность обрабатываемого изделия, увеличивается интенсивность остаточных напряжений и наклепа. Формирование равномерного микрорельефа обработанной поверхности

возможно достичь следующими технологическими приемами: повышением скорости абразивного инструмента, изменением зернистости шлифовального круга и более длительной абразивной обработкой поверхности изделия.

Абразивные инструменты с крупнозернистой структурой при обработке поверхности на больших скоростях или на малой окружной скорости в сочетании с неинтенсивной продольной подачи инструмента, способствуют формированию чистой поверхности, как и в операциях с использованием АИ с мелкозернистой структурой.

Эффективность использования абразивных инструментов с крупнозернистой структурой обусловлена следующим фактом, расположение абразивных зерен на рабочей поверхности инструмента находится на расстоянии, позволяющем стружке в процессе обработки беспрепятственно покидать рабочую зону резания, тем самым обеспечивается не засаливание поверхности абразивного инструмента.

При выборе зернистости шлифовального круга необходимо учитывать тот факт, что на равномерный микрорельеф обработанной поверхности оказывает влияние количество абразивных зерен участвующих в операциях резания. В свою очередь применение шлифовальных инструментов с мелкозернистой структурой приводит к повышенному тепловыделению в процессе обработки [77, 78, 98-100, 189].

Рассмотренный механизм формирования поверхностного слоя обработанной поверхности включает в себя целый комплекс факторов, влияющих на микрорельеф(шероховатость) поверхности, однако такое представление позволяет раскрыть ряд особенностей при скоростной обработки материалов и изделий.

Технологический процесс скоростного шлифования наиболее эффективен в том случае, когда с увеличением окружной скорости шлифовального круга происходит увеличение глубины снимаемого слоя и продольной подачи инструмента, одновременно с этими изменениями микрорельеф обработанной поверхности остается в определенных границах

присущих данной операции, благодаря такому способу обработки изделий значительно увеличивается производительность процесса.

Повышая режущую мощность рабочей поверхности абразивного инструмента за счет интенсивных нагрузок на абразивные зерна, позволит оптимизировать режимы и условия выполнения существующих технологических процессов профильной обработки рабочей поверхности железнодорожных рельсов. Проведение профильной обработки поверхности головок рельсов крупнозернистыми шлифовальными кругами за счет увеличения окружной скорости позволит получить режущий контур способный сформировать микрорельеф заданной шероховатости. Благодаря оптимизации гранулометрического состава шлифматериала, режущая мощность шлифовального круга будет значительно выше, абразивные зерна участвующие в процессе резания будут оставлять более равномерные канавки на обработанной поверхности, способствующие формированию качественной поверхности.

Подводя предварительный итог в вопросе формирования качественной поверхности в процессе механической обработки рабочей поверхности головок рельсов автор приходит к выводу что, изменяя микрорельеф(шероховатость) обработанной поверхности возможно продлить жизненный цикл эксплуатирующихся рельсов.

На сегодняшний день на сети железных дорог РФ эксплуатируются рельсы, прошедшие объемную закалку на предприятиях изготовителях обусловлено это прежде всего тем, что благодаря такому приему происходит увеличение предела текучести рельсовой стали [38].

Формирование качественной поверхности изделий, прошедших операции по механической обработке, зависят не только от макро и микрорельефа (шероховатости), но и от свойств поверхностного слоя металла, зависящих в значительной степени от температурных градиентов присущих технологическому процессу шлифования.

Возникновение значительных температурных градиентов в процессе шлифования изделий связано с технологическими и кинематическими особенностями обработки металла. Решающими факторами в формировании тепловой напряженности процесса резания являются совокупность следующих технологических параметров: повышенная скорость обработки, отрицательный центральный угол, характер внедрения абразивных частиц в поверхность изделий. Тепловая напряженность характеризуется возникновением локальных краткосрочных температурных полей с предельными температурными градиентами значения которых сопоставимы с температурой структурно-фазовых превращений металла, в отдельных случаях при тяжелых повышенных режимах шлифования происходит плавление обработанного слоя материала. Наличие высоких температурных значений в зоне резания на обрабатываемой поверхности проявляются в виде дефектов таких как прижоги, коробление, изменение структурно-фазового состава в поверхностном слое, трещины, протекание химических реакций и т.д.

Возможность продления эксплуатационного ресурса железнодорожных рельсов, за счет профильного шлифования рабочей поверхности головок железнодорожных рельсов имеет неоднозначное скептическое понимание.

Так ряд ученых в своих исследованиях [25, 29, 42, 100, 129, 189], акцентируют внимание на формировании в поверхностном слое металла при шлифовании растягивающих остаточных напряжений, влияние которых на сопротивление усталости кардинальное.

Механизм возникновения растягивающих остаточных напряжений в металле обусловлен наличием или присутствием следующих явлений: пластической деформацией, нагревом поверхностного слоя.

В процессе механической обработки изделий при шлифовании главными факторами формирующие остаточные напряжения являются температурные градиенты в зоне резания. Количество теплоты, получаемое в результате работы абразивных зерен, вносит изменения в физико-

механические свойства обрабатываемого изделия. При воздействии локальных температурных полей с пиковыми значениями в поверхностном слое обрабатываемой поверхности происходит уменьшение предела текучести, а пластичность, наоборот, доходит до максимальных. Нижние пласты основного холодного металла, препятствуют распространению тепла в глубь, в результате поверхностный слой получаемый тепло в процессе обработки начинает распространяться в своих границах увеличиваясь по объему. В итоге в возбужденном слое развиваются временные термические напряжения, ввиду своей высокой пластичности в поверхностном слое протекают пластические деформации, позволяющие уменьшить внутренние сжимающие напряжения. При выравнивании температуры поверхностного слоя его объем уменьшается, при этом сжатию мешают более холодные пласты основного металла изделия.

В следствии протекания рассмотренных выше физических процессов в верхнем поверхностном слое формируются остаточные напряжения растяжения, а в нижних пластах основного металла-напряжения сжатия. В процессе выравнивания температур между рассматриваемыми слоями напряжения не пропадают, ввиду того что пластичность металла при комнатной температуре не допускает пластической деформации поверхностного слоя, устраняющего внутренние напряжения, как в случае с нагревом металла. Причиной возникновения и формирования остаточных напряжений в поверхностных слоях обработанных материалов и изделий, прошедших операции шлифования, развито и дополнено в научных работах отечественных ученых [35, 106].

Опираясь на вышеизложенные механизмы формирования растягивающих остаточных напряжений в поверхностном слое, возможно допустить, что в процессе обработки рабочей поверхности головки железнодорожных рельсов абразивными инструментами будет прослеживаться такая же тенденция. Снизить величину остаточных напряжений в поверхностном слое головки рельса по мнению автора

возможно за счет эффективных режимов и условий процесса резания с одной стороны, а с другой стороны использованием новой конструкции шлифовального круга с повышенными эксплуатационными параметрами, позволяющего достичь требуемого результата обработки поверхности катания головок рельсов.

Перспективным направлением в области обработки рабочей поверхности головок рельсов эксплуатирующихся на перегонах, станционных и подъездных путях является технология высокоскоростного шлифования специализированными комплексами и рельсошлифовальными единицами. Применение технологии высокоскоростного шлифования связано с повышенными рабочими скоростями специализированных комплексов проводящих обработку рельсов, благодаря чему происходит значительно меньшие по продолжительности кратковременные локальные тепловые нагрузки в зоне резания, в следствии этого в поверхностном слое головки рельса увеличивается уровень пластической деформации, с формированием и развитием зон остаточных напряжений сжатия.

Таким образом увеличенная рабочая скорость специализированных комплексов способствует к снижению растягивающих остаточных напряжений и концентрации остаточных напряжений сжатия формируемых в поверхностном слое головок рельсов [100].

По мнению авторов [4 - 7, 166] применение технологии скоростного шлифования рельсов на полигоне страны может быть осуществлено без снижения качества проводимых ремонтно-восстановительных работ. Повышение скорости обработки до 30 км/ч с 6 - 7 км/ч сегодняшних, чистотой обработанной поверхности до 20 мкм, снижение температурных градиентов в зоне резания на 100 °С, позволяют решить ряд комплексных проблем возникающих перед технологическим процессом профильной обработки рабочих поверхностей головок железнодорожных рельсов. Во-первых, удастся повысить производительность операции шлифования без нанесения тяжелого вреда окружающей среды, во-вторых, улучшить

качество обрабатываемой поверхности, продлить ресурс абразивного инструмента.

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.

1.5 Выводы и задачи исследований

Подводя итог и анализируя научно-техническую информацию, экспериментальных и теоретических изысканий отечественных и зарубежных ученых по совершенствованию технологического процесса шлифования рельсов в пути показал, что в них отсутствуют рецептурно-технологические и конструктивные факторы проектирования абразивных шлифовальных кругов, обеспечивающих эффективный процесс профильной обработки рабочей поверхности головок рельсов.

Отсутствуют пути усовершенствования шлифовальных кругов, за счет изменений структуры и рабочей поверхности абразивного инструмента, применяемых на операциях профильного шлифования рельсов.

В связи с этим сформулированная научно-техническая задача по повышению производительности шлифования рельсов, заключающаяся в 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, преследующей цель повышения эксплуатационного ресурса рельсов.

Целью диссертационного исследования является: повышение производительности и качества финишной обработки железнодорожных

рельсов, путем разработки методики расчета высокопроизводительных циклов шлифования с применением композиционных модифицированных абразивных кругов.

В этой связи для достижения поставленной в работе цели определялись и решались следующие задачи диссертационного исследования:

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

2. 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 бакелитовых участков и керамических вставок композиционного шлифовального круга для качественного шлифования рельсов;

3. Обосновать и разработать оптимальную концентрацию наномодификатора в керамическом сегменте композиционного шлифовального круга. Разработать технологию ультразвуковой доставки и диспергирования исходных глобул наномодификатора в формовочную композицию 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.

ГЛАВА 2. ТЕОРИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ШЛИФОВАНИЯ РЕЛЬСОВ КОМПОЗИЦИОННЫМИ АБРАЗИВНЫМИ КРУГАМИ

2.1 Исследование кинематики движения абразивных зерен по обрабатываемой поверхности дорожки качения рельсов

Качество шлифования поверхности головки рельсов зависит от многих факторов: скорости рельсошлифовального поезда, скорости вращения шлифовальных кругов, размера зерен шлифовального круга и т.д. Выход любого из этих параметров за нормативные значения может привести к прижогам, повреждающим поверхности катания рельса.

В процессе шлифования часть металла с рельса уносится во вне, а часть остается между зернами абразивного круга. Это приводит к засаливанию абразивной поверхности и снижению качества шлифования.

Для предотвращения засаливания абразивного круга можно использовать керамические вставки между абразивными элементами, которые будут поглощать металлические частицы, удаляемые из рельса. Генерация тепла на абразивных участках и керамических вставках разная и как следует из практики в некоторых случаях возникают прижоги на поверхностях рельса, что является нарушением процесса шлифования, поскольку приводит к повреждению рельса и снижению его прочности. Исходя из этого, можно сформулировать следующую цель исследования

Цель исследования: оптимизация геометрических размеров бакелитовых участков и керамических вставок для качественного шлифования рельсов и исключения появления прижогов.

Первичным условием отсутствия прижогов является равенство температуры во всех точках участка шлифования. Температура в свою очередь связана с мощностью тепловыделения, а выделяемая тепловая мощность связана с работой сил резания. Работа силы представляет собой скалярное произведение вектора перемещения точки приложения силы и самого вектора силы.

Абсолютное перемещение точки относительно рельса складывается из перемещения шлифовального круга и перемещения вместе со шлифовальным поездом. При условии, что скорость поезда составляет 5 км/ч или 1.4 м/с, а скорость точки, лежащей на периферийной окружности шлифовального круга, составляет

$$V_{кр} = \frac{\pi D n}{1000 \cdot 60} = \frac{\pi \cdot 320 \cdot 5000}{1000 \cdot 60} = 84 \text{ м/с, что в 60 раз больше скорости от}$$

движения шлифовального поезда. Учет поступательного движения шлифовального круга при вычислении мощности тепловыделения не целесообразен.

Вычислим мощность тепловыделения для абразивной частицы, находящейся на расстоянии r от центра шлифовального круга.

Для этого сначала определим путь, который проходит частица при взаимодействии с рельсом. На рисунке. 2.1 показана схема взаимодействия шлифовального круга с дорожкой шлифования на рельсе.

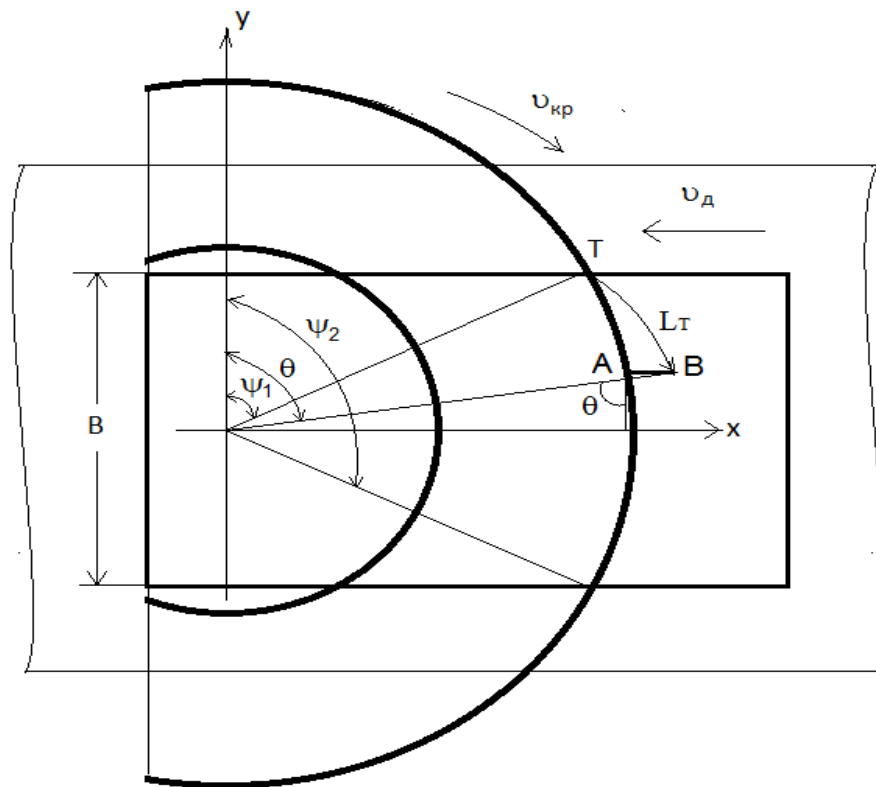


Рис. 2.1. - Схема к определению кинематики движения абразивного зерна при вращении круга и поступательным движением шлифовального поезда

В этом случае уравнения движения абразивной частицы будут иметь вид:

$$\begin{cases} x = R \sin \theta \pm AB, \\ y = R \cos \theta, \end{cases} \quad (2.1)$$

где отрезок AB — это расстояние, пройденное абразивной частицей за счет движения шлифовального колеса. Это расстояние связано с окружным путем частицы вместе со шлифовальным кругом соотношением:

$$\frac{AB}{R\theta} = \frac{v_d}{60v_{кр}},$$

где: v_d — скорость подачи детали $\left(\frac{\text{м}}{\text{мин}}\right)$,

$v_{кр}$ — скорость точки вместе со шлифовальным кругом (м/с).

или

$$AB = \frac{v_d R \theta}{60 v_{кр}} \quad (2.2)$$

Полученное соотношение (2.2) поставим в выражение (2.1), тогда получим

$$\begin{cases} x = R \sin \theta \pm \frac{v_d R \theta}{60 v_{кр}}, \\ y = R \cos \theta \end{cases} \quad (2.3)$$

Рассмотрим малый временной интервал Δt за это время абразивное зерно переместится вдоль элементарной дуги длиной L_T . Вычислим длину этой дуги.

$$dL_T = \sqrt{dx^2 + dy^2}$$

В соответствии с (2.3):

$$\begin{cases} dx = R \left(\cos \theta \pm \frac{v_d}{60 v_{кр}} \right) d\theta, \\ dy = R \sin \theta d\theta, \end{cases}$$

тогда

$$\begin{aligned}
 dL_T &= R \sqrt{\cos^2 \theta \pm 2 \frac{v_d}{60v_{кр}} \cos \theta + \left(\frac{v_d}{60v_{кр}} \right)^2 + \sin^2 \theta} d\theta = \\
 &= R \sqrt{1 + \left(\frac{v_d}{60v_{кр}} \right)^2 \pm 2 \frac{v_d}{60v_{кр}} \cos \theta} d\theta = \\
 &= R \sqrt{1 + \left(\frac{v_d}{60v_{кр}} \right)^2} \sqrt{1 \pm \frac{2 \frac{v_d}{60v_{кр}}}{1 + \left(\frac{v_d}{60v_{кр}} \right)^2} \cos \theta} d\theta =
 \end{aligned}$$

Для того, чтобы найти полную длину дуги проинтегрируем полученное выражение по θ от начального до конечного угла контакта абразивного зерна с поверхностью железнодорожного рельса.

$$L_T = R \sqrt{1 + \left(\frac{v_d}{60v_{кр}} \right)^2} \int_{\psi_1}^{\psi_2} \sqrt{1 \pm \frac{2 \frac{v_d}{60v_{кр}}}{1 + \left(\frac{v_d}{60v_{кр}} \right)^2} \cos \theta} d\theta \quad (2.4)$$

Полученный в (2.4) интеграл является эллиптическим. Обозначим множитель перед косинусом за А, тогда получим

$$\int_{\psi_1}^{\psi_2} \sqrt{1 \pm \frac{2 \frac{v_d}{60v_{кр}}}{1 + \left(\frac{v_d}{60v_{кр}} \right)^2} \cos \theta} d\theta = \int_{\psi_1}^{\psi_2} \sqrt{1 \pm A \cos \theta} d\theta$$

Для решения эллиптических интегралов можно воспользоваться разложением в ряд Ньютона подинтегральной функции.

Ряд Ньютона представляет собой обобщение бинома Ньютона для случая действительного показателя степени. Бином Ньютона представляет собой разложение выражения $(a \pm b)^n$ на множители. Для случая $n = 2$ Бином Ньютона представляет собой известное выражение $(a \pm b)^2 = a^2 \pm 2ab + b^2$, в более общем случае с натуральным показателем степени Бином вычисляется по следующей формуле (отрицательному b соответствуют отрицательные коэффициент содержащие b в нечетной степени).

$$(a + b)^n = C_n^0 a^n + C_n^1 a^{n-1} b + C_n^2 a^{n-2} b^2 + \dots + C_n^{n-1} a b^{n-1} + C_n^n b^n$$

В случае действительного показателя степени и переменного значения b , далее обозначенного как x конечная сумма представляет собой бесконечный ряд вида:

$$(x + a)^\alpha = a^\alpha + \alpha a^{\alpha-1} x + \frac{\alpha(\alpha-1)}{1 \cdot 2} a^{\alpha-2} x^2 + \dots + \frac{\alpha(\alpha-1) \dots (\alpha-k+1)}{1 \cdot 2 \dots k} a^{\alpha-k} x^k + \dots$$

Этот ряд сходится при $|x| < a$. В нашем случае $a = 1$. Получим условие на соотношение скоростей поезда и шлифовального круга, а также ширины дорожки шлифования, обеспечивающее сходимость ряда.

Обозначим $\frac{v_d}{60v_{кр}} = \gamma^*$, тогда условие сходимости принимает вид:

$$\frac{2\gamma^*}{1 + (\gamma^*)^2} \cos \theta < 1$$

Поскольку максимальное значение косинуса не превосходит 1, то полученное неравенство можно упростить:

$$\frac{2\gamma^*}{1 + (\gamma^*)^2} < 1.$$

Разрешая это неравенство относительно γ^* получаем:

$$2\gamma^* < 1 + (\gamma^*)^2$$

$$0 < 1 + (\gamma^*)^2 - 2\gamma^*$$

или

$$0 < (\gamma^* - 1)^2$$

Квадрат любого действительного числа является положительным, поэтому сходимость ряда Ньютона для данного случая абсолютная.

Разложим подинтегральное выражение в ряд Ньютона, пренебрегая величинами 2-го порядка малости.

$$(1 \pm A \cos \theta)^{1/2} = 1 \pm 0,5A \cos \theta$$

В процессе шлифования шлифовальный круг идет по центру дорожки шлифования, поэтому начальный и конечный углы, которые образует абразивное зерно в начальной и конечной точке контакта с рельсом с центральной линией шлифования равны по модулю и $\psi_2 = \pi - \psi_1$

$$\int_{\psi_1}^{\psi_2} \sqrt{1 \pm A \cos \theta} d\theta \approx \int_{\psi_1}^{\psi_2} (1 \pm 0,5A \cos \theta) d\theta = \int_{\psi_1}^{\pi - \psi_1} d\theta + \int_{\psi_1}^{\pi - \psi_1} (0,5A \cos \theta) d\theta$$

Первый интеграл равен $\alpha = \pi - 2\psi_1 = \psi_2 - \psi_1$, второй интеграл равен:

$$\int_{\psi_1}^{\pi - \psi_1} (0,5A \cos \theta) d\theta = -0,5A \sin \theta \Big|_{\psi_1}^{\pi - \psi_1} = -0,5A [\sin(\pi - \psi_1) - \sin(\psi_1)] = 0$$

В силу симметричности синуса относительно угла $\frac{\pi}{2}$.

Таким образом, окончательно получаем выражение для определения длины дуги контакта абразивного зерна с обрабатываемой дорожкой качения рельса. Длина дуги определяется по формуле предложенной д.т.н. профессором Рахчеевым В.Г.:

$$L_T = R\alpha \sqrt{1 + \left(\frac{v_d}{60v_{кр}} \right)^2} \quad (2.5)$$

Полученное выражение позволяет оптимизировать геометрические размеры бакелитовых участков и керамических вставок кругов для качественного шлифования рельсов и исключения появления прижогов.

2.2 Математическое моделирование формы рабочей поверхности композитных абразивных кругов

Необходимым условием является, чтобы длина дуги контакта круга с рельсом не зависела от его радиуса тогда, должно быть постоянным произведение:

$$R'\alpha = R'_1\alpha_1 = R'_i\alpha_i = const. \quad (2.6)$$

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

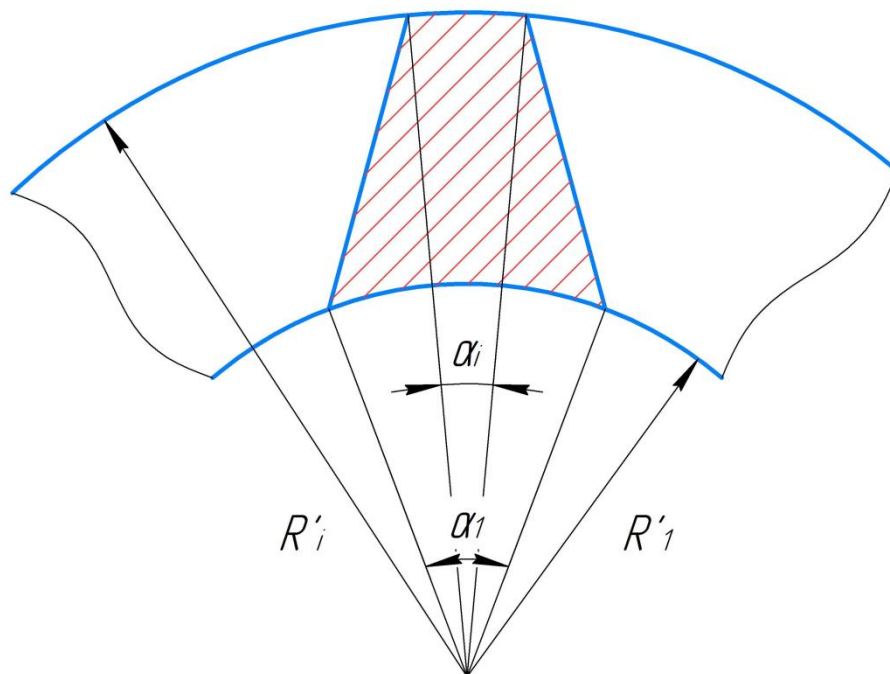


Рис 2.2 - Схема к определению формы бакелитовых вставок

Текущее значение радиуса изменяется от $R_{\min}$ до $R_{\max}$ и значение центрального угла будет соответственно меняться от $\alpha_{\max}$ до $\alpha_{\min}$ по гиперболическому закону.

Пример: $R_{\min}=0,09\text{м}$ $L_T=0,01\text{м}$. Поскольку точка вместе с кругом совершает вращательное движение, то ее скорость $v_{\text{кр}} = \omega R$, где ω - угловая скорость шлифовального круга.

Обозначим $f(R) = R \sqrt{1 + \left(\frac{v_d}{60\omega R} \right)^2}$, тогда получим:

$$\alpha(R) = \frac{L_T}{f(R)} = \frac{L_T}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{v_d}{60\omega} \right)^2}}$$

Для расчетного случая $\omega = 5000 \frac{\pi}{180} = 87.3\text{с}^{-1}$ $v_d = 84$ м/мин таким образом, уравнение для центрального угла $\alpha(R)$ бакелитового участка имеет вид:

$$\alpha(R) = \frac{0.01}{\sqrt{R^2 + 2.6 \cdot 10^{-4}}}.$$

Минимальное значение радиуса 0.09 м, если эту величину возвести в квадрат получим $8,1 \cdot 10^{-3}$ м. Второе слагаемое под корнем в 20 раз меньше, поэтому им можно пренебречь. Таким образом, получаем:

$$\alpha_{\max} = \frac{L_T}{R_{\min}} = \frac{0.01}{0.09} = 0.11 \text{ радиан};$$

$$\alpha_{\min} = \frac{L_T}{R_{\max}} = \frac{0.01}{0.16} = 0.065 \text{ радиан}.$$

Уравнение образующей бакелитового участка в координатах R, α , имеет следующий вид:

$$R\alpha(R) = 0,01.$$

Откуда находим, что $\alpha(R) = 0,01/R$, $R_{\min} \leq R \leq R_{\max}$

Выполнение данного условия позволит обеспечить процесс качественного шлифования деталей и изделий.

$$\frac{L_{Tin}}{B_{in}} = \frac{L_{Ti}}{B_i} = \frac{L_{Tout}}{B_{out}},$$

где:

L_{Tin} - длина дуги шлифования на внутреннем радиусе шлифовального круга, мм;

L_{Tout} - длина дуги шлифования на наружном радиусе, мм;

L_{Ti} - длина дуги шлифования на произвольном радиусе шлифовального круга, мм;

B_{in} - ширина дорожки шлифования на внутреннем радиусе, мм;

B_i - ширина дорожки шлифования на произвольном радиусе, мм;

B_{tout} - 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:

$$K = k_1 \cdot t_{p.c} + k_2 \cdot T + k_3 \cdot R_{z.p.c} \quad (2.7)$$

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:

$$K = 0,55t_{p.c} + 0,3T + 0,15R_{z.p.c} \quad (2.8)$$

Вычислим координаты точек, образующей бакелитового участка. Пусть линия $\alpha = 0$ делит этот участок симметрично в радиальном направлении (рисунок 2.2), тогда координаты точек, образующей определяются из соотношений:

$$x = \pm R \cos\left(\frac{L_T}{2R}\right), y = R \sin\left(\frac{L_T}{2R}\right).$$

Для определения геометрических размеров форм бакелитовых вставок разработана программа макроса в Excel.

Координаты правой образующей бакелитового участка представлены в табл.2.1.

Таблица 2.1 Координаты точек правой образующей бакелитового участка

Номер точки	Координата X, м	Координата Y, м	Номер точки	Координата X, м	Координата Y, м
1	4,99743*10 ⁻³	0,089861	19	4,99869*10 ⁻³	0,125901
2	4,99754*10 ⁻³	0,091864	20	4,99873*10 ⁻³	0,127902
3	4,99764*10 ⁻³	0,093867	21	4,99877*10 ⁻³	0,129904
4	4,99774*10 ⁻³	0,09587	22	4,99880*10 ⁻³	0,131905
5	4,99783*10 ⁻³	0,097872	23	4,99884*10 ⁻³	0,133907
6	4,99792*10 ⁻³	0,099875	24	4,99887*10 ⁻³	0,135908
7	4,99800*10 ⁻³	0,101877	25	4,99891*10 ⁻³	0,137909
8	4,99807*10 ⁻³	0,10388	26	4,99894*10 ⁻³	0,139911
9	4,99815*10 ⁻³	0,105882	27	4,99897*10 ⁻³	0,141912
10	4,99821*10 ⁻³	0,107884	28	4,99900*10 ⁻³	0,143913
11	4,99828*10 ⁻³	0,109886	29	4,99902*10 ⁻³	0,145914
12	4,99834*10 ⁻³	0,111888	30	4,99905*10 ⁻³	0,147916
13	4,99840*10 ⁻³	0,11389	31	4,99907*10 ⁻³	0,149917
14	4,99845*10 ⁻³	0,115892	32	4,99910*10 ⁻³	0,151918
15	4,99850*10 ⁻³	0,117894	33	4,99912*10 ⁻³	0,153919
16	4,99855*10 ⁻³	0,119896	34	4,99914*10 ⁻³	0,15592
17	4,99860*10 ⁻³	0,121898	35	4,99917*10 ⁻³	0,157921
18	4,99865*10 ⁻³	0,123899	36	4,99919*10 ⁻³	0,159922

График правой образующей бакелитового участка приведен на рисунке. 2.3



Рис. 2.3 - График правой образующей бакелитового участка с постоянной длиной дорожки шлифования

Координаты левой образующей бакелитового участка представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2. Координаты точек левой образующей бакелитового участка

Номер точки	Координата X, м	Координата Y, м	Номер точки	Координата X, м	Координата Y, м
1	$-4,99743 \cdot 10^{-3}$	0,089861	19	$-4,99869 \cdot 10^{-3}$	0,125901
2	$-4,99754 \cdot 10^{-3}$	0,091864	20	$-4,99873 \cdot 10^{-3}$	0,127902
3	$-4,99764 \cdot 10^{-3}$	0,093867	21	$-4,99877 \cdot 10^{-3}$	0,129904
4	$-4,99774 \cdot 10^{-3}$	0,09587	22	$-4,99880 \cdot 10^{-3}$	0,131905
5	$-4,99783 \cdot 10^{-3}$	0,097872	23	$-4,99884 \cdot 10^{-3}$	0,133907
6	$-4,99792 \cdot 10^{-3}$	0,099875	24	$-4,99887 \cdot 10^{-3}$	0,135908
7	$-4,99800 \cdot 10^{-3}$	0,101877	25	$-4,99891 \cdot 10^{-3}$	0,137909
8	$-4,99807 \cdot 10^{-3}$	0,10388	26	$-4,99894 \cdot 10^{-3}$	0,139911
9	$-4,99815 \cdot 10^{-3}$	0,105882	27	$-4,99897 \cdot 10^{-3}$	0,141912
10	$-4,99821 \cdot 10^{-3}$	0,107884	28	$-4,99900 \cdot 10^{-3}$	0,143913
11	$-4,99828 \cdot 10^{-3}$	0,109886	29	$-4,99902 \cdot 10^{-3}$	0,145914
12	$-4,99834 \cdot 10^{-3}$	0,111888	30	$-4,99905 \cdot 10^{-3}$	0,147916
13	$-4,99840 \cdot 10^{-3}$	0,11389	31	$-4,99907 \cdot 10^{-3}$	0,149917
14	$-4,99845 \cdot 10^{-3}$	0,115892	32	$-4,99910 \cdot 10^{-3}$	0,151918

продолжение таблицы 2.2

15	$-4,99850 \cdot 10^{-3}$	0,117894	33	$-4,99912 \cdot 10^{-3}$	0,153919
16	$-4,99855 \cdot 10^{-3}$	0,119896	34	$-4,99914 \cdot 10^{-3}$	0,15592
17	$-4,99860 \cdot 10^{-3}$	0,121898	35	$-4,99917 \cdot 10^{-3}$	0,157921
18	$-4,99865 \cdot 10^{-3}$	0,123899	36	$-4,99919 \cdot 10^{-3}$	0,159922

График левой образующей бакелитового участка приведен на рисунке 2.4

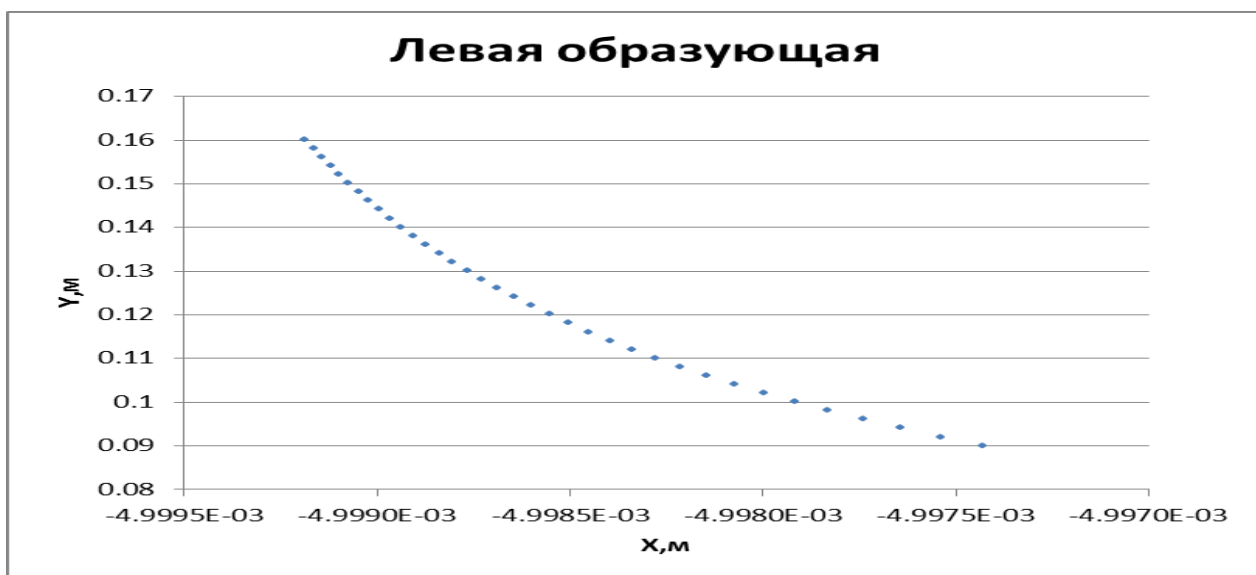


Рис. 2.4 - График левой образующей бакелитового участка с постоянной длиной дорожки шлифования

Таким образом, полученное выражение и программа расчета формы абразивных вставок кругов позволяют моделировать различные конструкции шлифовальных кругов.

2.3 Теоретическое исследование формирования точности формы профиля головки рельсов

Определим условия, при которых объем снимаемого металла абразивными зернами, находящимися на разных радиусах, будет одинаков.

Пусть в пределах дуги контакта L_T шлифовальный круг и рельс взаимодействует z зернами

$$z = \frac{L}{\lambda_\phi},$$

где ℓ_ϕ - фактическое среднее расстояние между абразивными зернами.

Тогда число одновременно взаимодействующих зерен определяется

$$z_T = \frac{1}{\ell_\phi} R \alpha \sqrt{1 + \left(\frac{v_\phi}{60v_{кр}} \right)^2}. \quad (2.9)$$

В этом случае объем металла, снимаемого за 1 мин, определится в соответствии с выражением:

$$V = F \cdot t_\phi,$$

где: F - площадь взаимодействия шлифовального круга и дорожки качения показанная на рисунке 2.5;

t_ϕ - глубина фактически снимаемого слоя металла.

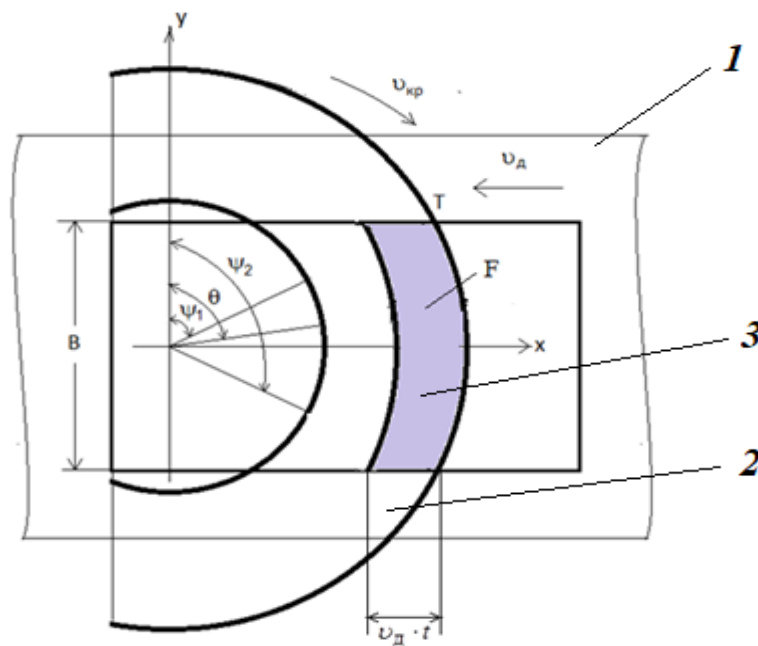


Рис. 2.5 - Схема к определению фактической площади шлифования за время t :
1 - Рельс; 2 - Абразивный круг; 3 - Фактическая площадь шлифования

Площадь шлифуемой поверхности (рисунке 2.6) за единицу времени состоит из прямоугольника площадью $B \cdot v_d$, обозначенным цифрой 2 а также из двух криволинейных площадей, одна из которых отрицательна (обозначена цифрой 1), а вторая положительна (обозначены цифрой 3).

Величина v_d измеряется м/мин и при скорости поезда 5 км/ч $v_d=83$ м/мин. Величина радиуса шлифовального круга равна 0,16м при том, что ширина дорожки шлифования порядка 0,01м, соответственно размером криволинейных площадей можно пренебречь.

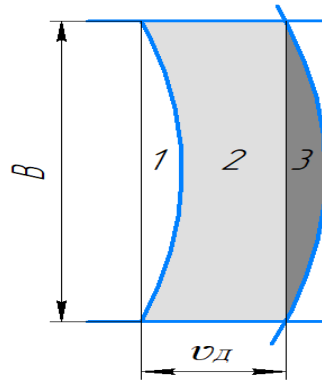


Рис. 2.6 - Форма площади шлифования рельсов

Тогда окончательно получаем:

$$F = B * v_d.$$

Объем снимаемого металла при шлифовании торцом круга равен площади части шлифовального круга, которая взаимодействует с дорожкой шлифования за единицу времени, умноженную на величину глубины шлифования и определяется по формуле:

$$V = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) n_k t_{\phi} = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \frac{v_k}{D} \frac{30}{\pi} t_{\phi} = 7.5 \frac{(D^2 - d^2)}{D} v_k t_{\phi}.$$

где: D - наружный диаметр круга;

d - внутренний диаметр круга;

n_k - частота вращения круга.

Средняя величина снимаемого слоя определится согласно выражению:

$$a_{cp} = \frac{V}{F} = \frac{7.5 \frac{(D^2 - d^2)}{D} v_k t_{\phi}}{B v_d}.$$

Для вычисления объема металла, снимаемого одним зерном, получим, разделив средний объем снимаемого металла на площадь шлифуемой поверхности:

$$a_{z,cp} = \frac{a_{cp}}{z} = 7.5 \frac{(D^2 - d^2)t_{\phi}}{DBv_{np}R\alpha\sqrt{1 + \left(\frac{v_{np}}{60}\right)^2}} \lambda_{\phi} \quad (2.10)$$

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, $v_{np} = \frac{v_{\phi}}{v_{кр}}$, 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).

Наилучшее качество шлифования достигается, когда величина снимаемого металла не зависит от радиального расстояния от центра шлифовального круга.

В выражение (2.10) все величины, за исключением R, α являются постоянными при стационарном движении шлифовального поезда и равномерном вращении шлифовального круга. В знаменатель выражения (2.10) входит длина дуги шлифования, которая при определенном сочетании R, α (2.8) является константой.

Таким образом, при выполнении соотношения (2.8) величина $a_{z,cp}$ в (2.10) будет постоянной величиной.

Уравнение 2.10 определяет условие, при котором объем снимаемого металла с головки рельсов удаляется равномерно и тем самым происходит её формирование с высокой точностью формы.

2.4 Оптимизация формы рабочей поверхности композиционных кругов для шлифования рельсов

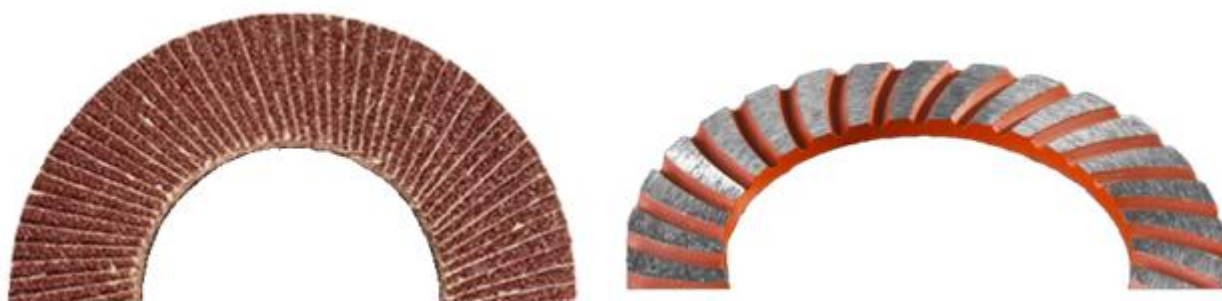
Важной особенностью работы композиционного шлифовального круга является отсутствие удара при переходе от бакелитовой части к керамической вставке и наоборот. Бакелитовая и керамическая вставка в

общем случае могут изнашиваться по-разному и, следовательно, иметь разную высоту.

Проход границы бакелитовой и керамической части через дорожку шлифования в этом случае будет вызывать удар, оказывающий негативное влияние на процесс шлифования.

Во избежания ударного воздействия шлифовального круга о дорожку шлифования применяют абразивные секции с нелинейными образующими. Условием отсутствия удара будет одновременный контакт двух соседних абразивных секций на большом и малом радиусах шлифовального круга.

Это достигается разворотом наружного радиуса круга так, чтобы окончание контакта текущей бакелитовой секции на наружном радиусе соответствовало началу контакта следующей керамической секции на внутреннем радиусе. При этом можно использовать как прямолинейные границы абразивных участков (рисунке 2.7а) так и криволинейные границы (рисунке 2.7б).



а) Рабочая поверхность шлифовального круга с прямолинейной границей абразивных участков вид с торца

б) Рабочая поверхность шлифовального круга с криволинейной границей абразивных участков вид с торца

Рис. 2.7 - Рабочие поверхности шлифовальных кругов с различными (а, б) границами абразивных участков

Преимуществом прямолинейных границ абразивных участков является простота исполнения. Преимуществом криволинейных направляющих абразивных участков является качественное шлифование.

При вращении шлифовального круга с криволинейными образующими точка контакта границы абразивного участка с дорожкой шлифования

перемещается от малого радиуса шлифовального круга к наружному. Потребуем, чтобы скорость этого перемещения была постоянной. Этим обеспечивается равномерное снятие металла для любого значения радиуса на шлифовальном круге.

С математической точки зрения уравнение образующей представляет собой набор точек, координаты которых связаны некоторой зависимостью. Поскольку шлифовальный круг имеет цилиндрическую форму естественно будет использовать полярную систему координат r, φ . Тогда уравнение образующей будет представлять собой некоторую функцию $r = r(\varphi)$.

Скорость в радиальном направлении будет равна производной от радиуса точки по времени:

$$v_r = \frac{dr}{dt} = \frac{dr}{d\varphi} \frac{d\varphi}{dt} = \frac{dr}{d\varphi} \omega_k = Const.$$

В процессе шлифования величину ω_k можно считать постоянной, поэтому получаем:

$$\frac{dr}{d\varphi} = \frac{C}{\omega_k}. \quad (2.11)$$

где: C - константа.

Интегрируя это выражение по φ приходим к следующему выражению:

$$r = \frac{C}{\omega_k} \varphi + r_{\min} \quad (2.12)$$

Аддитивная константа $r_{\min}$ имеет смысл радиуса, на котором находится точка контакта в начальный момент времени. Поскольку контакт начинается с малого радиуса при:

$$\varphi = 0, r = r_{\min}.$$

Константа C является пока не определенной, ее значение зависит от углового размера абразивного участка. Этот размер будет вычислен далее

исходя из условия равномерного тепловыделения бакелитовых участков и керамических вставок.

При трении шлифовального круга о дорожку шлифования вследствие работы сил трения генерируется тепло. Генерация тепла на бакелитовых участках и керамических вставках происходит с разной интенсивностью.

Для оптимальной работы шлифовального круга необходимо, что бы общее количество тепла, генерируемое на абразивных участках и на керамических вставках было одинаковым. Если генерация тепла на бакелитовых участках будет больше, чем на керамических вставках, это будет означать, что размер керамических вставок мал, и как следствие шлифовальный круг будет более быстро загрязняться продуктами шлифования.

При генерации тепла на керамических вставках больше, чем на бакелитовых участках будет происходить перегрев дорожки шлифования и как следствие снижение качества шлифования, либо шлифовальный круг должен работать в более мягком тепловом режиме, а это в свою очередь снова приводит к снижению эффективности процесса шлифования.

Вычислим количество тепла, генерируемого сектором шлифовального круга в процессе работы. Эта мощность равна производной от работы сил трения:

$$Q = A = F_{\tau} L_T = F_n \mu L_T,$$

где: Q - количество теплоты;

A - работа сил трения;

F_{τ} - сила трения;

F_n - нормальная сила;

μ - коэффициент трения.

Нормальная сила, действующая на бакелитовые участки и на керамические вставки одинаковая, следовательно, чтобы количество выделяемого тепла было одинаковым необходимо выполнение равенства

$$\mu_{абр} L_{T1} = \mu_{кер} L_{T2}, \quad (2.13)$$

где: $\mu_{абр}$ - коэффициент трения на бакелитовом участке;

$\mu_{кер}$ - коэффициент трения на керамическом участке;

L_{T1} - длина дуги шлифования на бакелитовом участке;

L_{T2} - длина дуги шлифования на керамической вставке.

В (2.11) указано, что соотношение нормальной и касательной силы для сплошного шлифовального круга равно 3. То есть коэффициент трения для абразивного участка можно принять $1/3=0,33$.

Коэффициент трения на керамической вставке примем равным 0,6.

Таким образом, соотношение дуг шлифования на бакелитовых участках и керамических вставках должно быть равным

$$\frac{\mu_{абр}}{\mu_{кер}} = \frac{L_{T2}}{L_{T1}} = \frac{0,33}{0,6} = 0,55$$

Полученное соотношение означает, что при проектировании шлифовального круга необходимо выбрать длину бакелитового участка таким образом, чтобы выполнялось соотношение:

$$\frac{2\pi r_{\min}}{1.55 L_{T1}} = n, \quad (2.14)$$

где: n - целое число равное числу пар бакелитовых участков + керамические вставки.

Длина бакелитового участка на малом радиусе в этом случае вычисляется по формуле:

$$L_{T1} = \frac{2\pi r_{\min}}{1.55n} \quad (2.15)$$

На рисунке 2.8 показано распределение тепловой нагрузки от бакелитового участка и керамической вставки в процентах на дорожку шлифования для случая $n = 1$.

Действие тепловой нагрузки определяется коэффициентами трения. Если число n не велико 2-4 участка, то керамические вставки будут иметь значительную протяженность (для $n = 1$ и внутреннем радиусе 90 мм длина дуги шлифования керамической вставки будет равна 198 мм). Они будут генерировать значительное количество тепла, одномоментно поглощаемого рельсом. В этом случае прижоги могут возникать даже при допустимой средней мощности.

Для недопущения такой ситуации шлифовальный круг необходимо делить на как можно большее количество участков, включающих в себя бакелитовый участок вместе с керамической вставкой.

Максимальное(пиковое) количество тепла, генерируемое одной керамической вставкой, будет уменьшаться обратно пропорционально количеству керамических участков и будет стремиться к средней мощности.

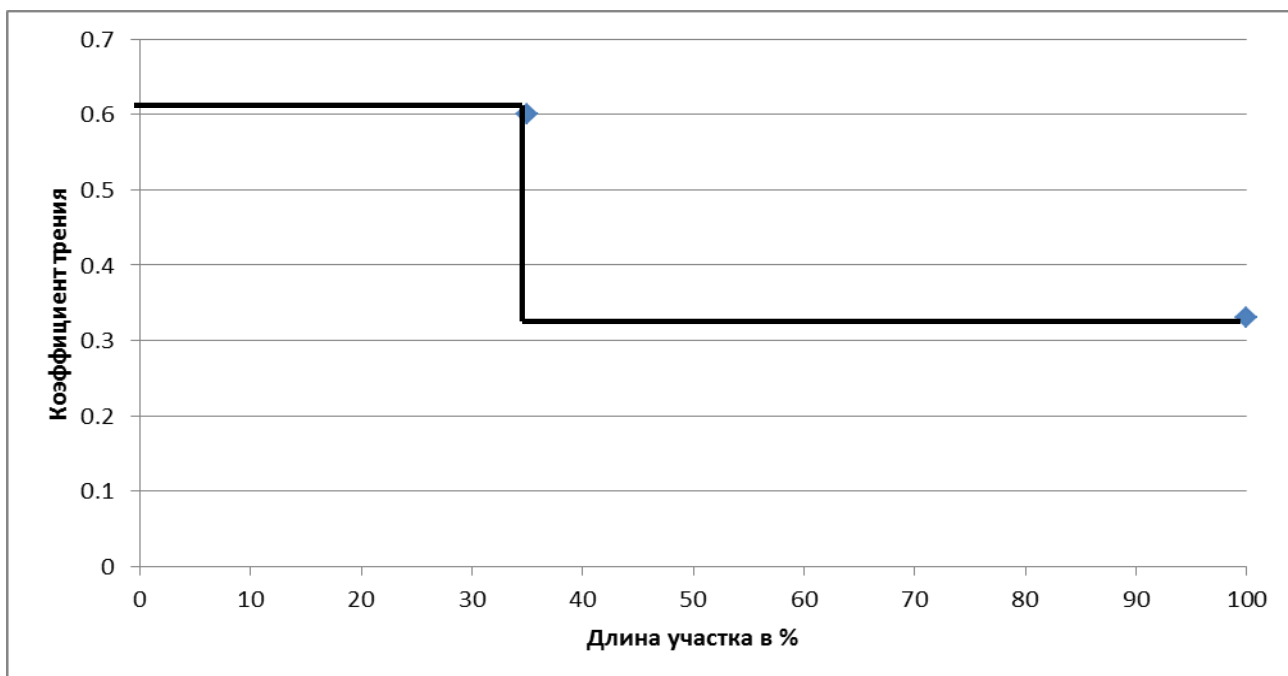


Рис. 2.8. - Распределение тепловой нагрузки от бакелитового участка и керамической вставки

Получим уравнение центральной линии бакелитового участка с условием перекрытия соседних абразивных участков на внутреннем и наружном радиусах.

Пусть шлифовальный круг разбит на n шлифующих участков, тогда длина одного бакелитового участка будет равна:

$$L_{T1} = 0,65 \frac{2\pi R}{n} \quad (2.16)$$

Длина участка керамической вставки соответственно равна:

$$L_{T2} = 0,35 \frac{2\pi R}{n} \quad (2.17)$$

На рисунке 2.9 схематично показана образующая бакелитового участка круга, обеспечивающая безударное взаимодействие с поверхностью головки катания железнодорожного рельса.

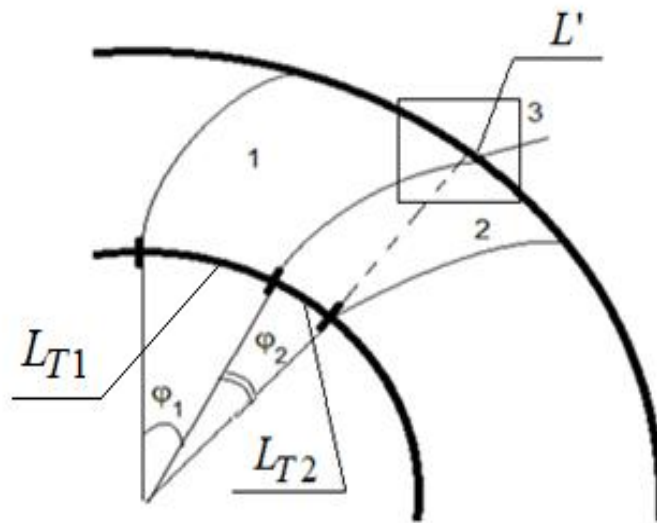


Рис 2.9 - Форма образующей бакелитового участка
1 - бакелитовая область, 2- керамическая область, 3 - зона перекрытия абразивных участков

Форма образующей абразивного участка должна удовлетворять уравнению (2.12) и пересекать окружность $r = R_{\max}$ при $\varphi = \varphi_2 + \varphi'$, где φ_2 показан на рисунке 2.9, а φ' - угол, соответствующий длине зоны перекрытия

на наружном радиусе круга. Подставляя данное условие в уравнение (2.12), получаем:

$$r_{\max} = \frac{C}{\omega_k}(\varphi_2 + \varphi') + r_{\min}$$

Откуда найдем:

$$r_{\max} - r_{\min} = \frac{C}{\omega_k}(\varphi_2 + \varphi'),$$

$$C = \frac{\omega_k(r_{\max} - r_{\min})}{(\varphi_2 + \varphi')},$$

При этом $\varphi_2 = \frac{L_{T2}}{r_{\min}}, \varphi' = \frac{L'}{r_{\max}},$

где: L' - длина дуги перекрытия бакелитового участка, назначается по условиям прочности и долговечности абразивного круга.

Подставляя найденное значение константы в (2.12), получаем:

$$\varphi = \frac{r - r_{\min}}{(r_{\max} - r_{\min})}(\varphi_2 + \varphi'). \quad (2.18)$$

Данное соотношение было получено без учета постоянства длины дуги шлифования и его можно рассматривать как уравнение центральной линии бакелитового участка. Полное уравнение образующей бакелитового участка будет комбинацией условий (2.8) и (2.12) и будет иметь вид:

$$\varphi = \frac{r - r_{\min}}{(r_{\max} - r_{\min})}(\varphi_2 + \varphi') \pm \frac{\alpha(r)}{2}$$

или

$$\varphi = \frac{r - r_{\min}}{(r_{\max} - r_{\min})}(\varphi_2 + \varphi') \pm \frac{L_{T1}}{2r} \quad (2.19)$$

2.5 Теоретические основы распространения тепла в рельсе в процессе шлифования

В основе описания процесса распространения тепла в твердом теле лежит закон теплопроводности Фурье [4]

$$q = -k \cdot \text{grad}T \quad (2.20)$$

где: q - вектор потока тепла;

T - температура;

k - коэффициент теплопроводности.

Знак минус перед коэффициентом означает, что вектор распространения тепла направлен в обратную сторону от градиента температуры, т.е. от участков с высокой температурой к участкам с низкой температурой.

Выделим в материале элементарный прямоугольный параллелепипед со сторонами Δx , Δy , Δz , объемом V , плотностью ρ и удельной теплоемкостью C .

Согласно закону сохранения температура материала может изменяться за счет притока/оттока тепла через границы параллелепипеда, либо за счет внутренних источников/стоков тепла. В нашем случае внутренними источниками тепла будем пренебрегать.

Рассмотрим процесс изменения температуры материала за счет притока тепла в направлении оси x . Увеличение тепла внутри материала определяется по формуле: $\Delta Q = C\rho V\Delta T$.

Пусть левая грань параллелепипеда имеет координату x , а правая $x + \Delta x$.

Согласно закону Фурье, количество тепла, переносимое через границы материала за время Δt равно:

для границы с координатой x :

$$Q_x = q_x A_x = -k A_x \frac{\partial}{\partial x} T(x) \Delta t \quad (2.21)$$

для границы с координатой $x + \Delta x$:

$$Q_{x+\Delta x} = -k A_x \frac{\partial}{\partial x} T(x + \Delta x) \Delta t \quad (2.22)$$

здесь $A_x = dydz$ - площадь параллельной грани параллелепипеда

В последнем выражении разложим производную в ряд Тейлора.

$$Q_{x+\Delta x} = -k A_x \frac{\partial}{\partial x} \left(T(x) + \frac{\partial}{\partial x} T(x) \Delta x + \dots \right) \Delta t \quad (2.23)$$

Третьим и последующими слагаемыми в разложении будем пренебрегать ввиду их малости.

Согласно закону сохранения тепла получаем:

$$\Delta Q_x = Q_{x+\Delta x} - Q_x \quad (2.24)$$

или

$$(C\rho V \Delta T)_x = -k A_x \frac{\partial}{\partial x} \left(T(x) + \frac{\partial}{\partial x} T(x) \Delta x \right) \Delta t + k A_x \frac{\partial}{\partial x} T(x) \Delta t \quad (2.25)$$

Первое и третье слагаемое в правой части сокращаются, тогда получаем:

$$(C\rho V \Delta T)_x = -k A_x \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial}{\partial x} T(x) \Delta x \right) \Delta t = -k A_x \frac{\partial^2}{\partial x^2} T(x) \Delta x \Delta t \quad (2.26)$$

Проводя аналогичные рассуждения для потоков тепла в направлениях y и z получим полную формулу для переноса тепла:

$$C\rho V \Delta T = -k \left(A_x \frac{\partial^2}{\partial x^2} T(x, y, z, t) \Delta x + A_y \frac{\partial^2}{\partial y^2} T(x, y, z, t) \Delta y + A_z \frac{\partial^2}{\partial z^2} T(x, y, z, t) \Delta z \right) \Delta t \quad (2.27)$$

Объем параллелепипеда равен $V = dx dy dz$. Подставляя это выражение в предыдущую формулу и сокращая на $dx dy dz$ получим:

$$C\rho\Delta T = -k\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2}T(x,y,z,t) + \frac{\partial^2}{\partial y^2}T(x,y,z,t) + \frac{\partial^2}{\partial z^2}T(x,y,z,t)\right)\Delta t \quad (2.28)$$

Разделим (2.28) на Δt и перейдем к пределу при $\Delta t \rightarrow 0$

$$C\rho \frac{\partial T}{\partial t} = -k\Delta T$$

или

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{k}{C\rho}\Delta T,$$

где: Δ - обозначает оператор Лапласа, примененный к температуре.

Обозначим $\frac{k}{C\rho} = a^2$ - коэффициент температуропроводности.

Окончательно получим:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -a^2\Delta T. \quad (2.29)$$

Уравнение (2.29) определяет распространение тепла в твердом теле.

Данное уравнение является уравнением в частных производных параболического типа и к нему должны быть поставлены начальные и граничные условия.

В качестве начальных условий принимают известное распределение температуры в теле в начальные момент времени:

$$T(x,y,z,0) = T_0(x,y,z)$$

В качестве граничных условий может задаваться температура на границе тела:

$$T(x,y,z,t)\big|_{f(x,y,z)=C} = T_1(x^*,y^*,z^*,t),$$

где: x^*, y^*, z^* - координаты точек на границе тела.

Так же в качестве граничных условий может использоваться известный тепловой поток на границе тела

$$\frac{\partial}{\partial n} T(x, y, z, t) \Big|_{f(x, y, z)=C} = T_2(x^*, y^*, z^*, t)$$

Последнее условие позволяет задавать тепловой поток, возникающий в процессе трения между шлифовальным кругом и дорожкой шлифования на рельсе.

Для определения распространения тепла в рельсе во время шлифования уравнение теплопроводности (2.29) должно быть решено в трехмерной постановке с учетом нелинейности границ области решения.

Это затрудняет получение аналитического решения. В тоже время существуют численные методы, позволяющие получить приближенное решение уравнения с достаточной точностью. Одним из таких методов является метод конечного элемента реализованный в вычислительном пакете Ansys.

С использованием данного пакета был проведен ряд расчетов для различных сочетаний размеров абразивных элементов и керамических вставок шлифовальных композиционных кругов. Методика расчетов и результаты моделирования приведена в 4 главе диссертационного исследования.

2.6. Выводы по главе

1. Определена схема кинематики 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;

2. Определена длина дуги контакта абразивного зерна с обрабатываемой дорожкой качения железнодорожного рельса L_T позволяющей оптимизировать геометрические размеры бакелитовых

участков и керамических вставок на рабочей поверхности шлифовального круга с целью обеспечения качественного шлифования рельсов и исключением появления прижогов;

3. Получена математическая модель и критерий качественного шлифования рабочей поверхности катания головок железнодорожных рельсов с помощью, которых можно определять и моделировать формы различных конструкций абразивных вставок шлифовальных композиционных кругов;

4. Определено условие, при котором объем снимаемого металла с головки рельсов удаляется, равномерно обеспечивая формирование новой поверхности катания головок рельсов с высокой точностью;

5. В процессе выполнения оптимизации форм рабочей поверхности композиционных шлифовальных кругов получено уравнение образующей, обеспечивающей отсутствие удара при переходе от абразивной бакелитовой части к керамической вставке и наоборот.

ГЛАВА 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ КОМПОЗИЦИОННЫХ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ

Результаты исследований, представленных в данной главе диссертационного исследования, отображают взаимосвязи физико-механических параметров и эксплуатационных режимов обработки рабочей поверхности головки рельсов с использованием композиционных шлифовальных кругов, осуществляемых на мобильной лабораторно-экспериментальной шлифовальной установке, представленной на рисунке 3.1.

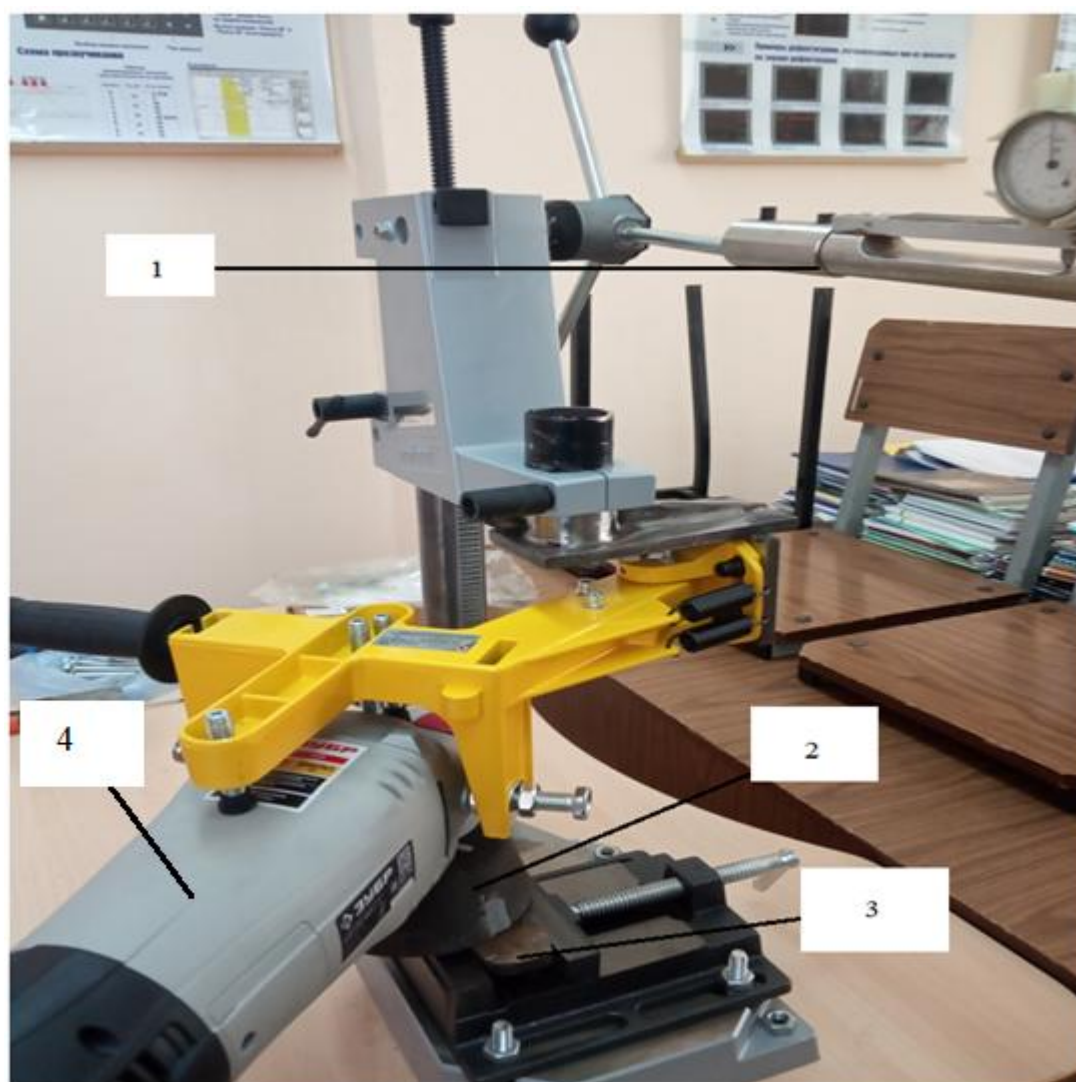


Рис.3.1 - лабораторно-экспериментальная шлифовальная установка
1 - механический индикатор часового типа; 2 - композиционный шлифовальный круг;
3 - фрагмент головки железнодорожного рельса; 4 - электродвигатель.

В ходе проведения экспериментальных изысканий, осуществляемых в лабораториях и на железнодорожных путях учебного полигона СамГУПС контролировались следующие параметры: абразивного инструмента (стойкость композиционных шлифовальных кругов); контрольных образцов рельсов (снимаемый линейный объем рельсовой стали, качество обрабатываемой поверхности).

3.1 Методология определения параметров композиционных шлифовальных кругов в процессе шлифования рабочей поверхности головок железнодорожных рельсов

Представленная методология необходима для определения рабочих параметров композиционных шлифовальных кругов производящих обработку рабочей поверхности железнодорожных рельсов специализированными рессоршлифовальными поездами, мобильными средствами (с абразивными кругами совершающие круговые движения).

Объектом исследований является композиционный шлифовальный круг, используемый в качестве абразивного инструмента для рельсошлифовальных специализированных единиц. В процессе проведения экспериментальных исследований подвергались испытаниям комплекты композиционных шлифовальных кругов на основе бакелитовой связки и модифицированных керамических сегментов со следующими характеристиками: зернистостью (F36, F22 и F14 по ГОСТ Р 52381-2005), твердостью шлифовальных кругов ГОСТ Р 52587-2006 - Q, R, T. Содержание частиц шлифматериала к единице объема абразивного инструмента варьировался в диапазоне 40 - 60 %.

Приготовление наномодификатора необходимого для модифицирования связки керамического сегмента композиционного шлифовального круга осуществлялась по инновационной технологии диспергирования исходных глобул наномодификатора «Таунит», в жидкой среде и под действием кавитационных сил.

Шлифовальные круги, спроектированные и изготовленные для натуральных испытаний соответствуют требованиям, указанных в действующих технических условиях ТУ 3982 - 001 - 00224774 - 2001.

В процессе выполнения экспериментальных работ с целью эффективного использования абразивного инструмента изменялись условия резания а именно: тангенциальная сила резания с 36 до 46 Н, скорость специализированной мобильной рельсошлифовальной лабораторной установки 4 - 8 км/ч, окружная скорость композиционных шлифовальных кругов с 40 до 60 м/с. Геометрические параметры шлифовального круга и обработанной поверхности головок железнодорожных рельсов определялись инструментами и приборами прошедшими поверку средств измерения.

На операциях шлифования использовались рельсы типа Р65 объемнозакаленные категории ДТ 350 марка рельсовой стали Э76ХФ с наработкой 450 млн. т. брутто, взятые с прямого участка железнодорожного пути грузонапряженностью 63,3 млн. т. брутто в год (взято в среднем по Куйбышевской дирекции инфраструктуры).

При планировании экспериментов по шлифованию рабочей поверхности головок рельсов необходимо:

- произвести замеры очертаний поперечного профиля головок рельсов до шлифования;
- произвести фиксацию геометрических размеров шлифовальных кругов до и после операции шлифования;
- определить линейный съём величины припуска после обработки поверхности катания головок рельсов;
- измерить высоту абразивного инструмента после операции шлифования;
- определить общий фронт работ.

5. Продолжительность обработки в ходе натурных испытаний составляла до 20 минут (контролировалось с использованием электронного секундомера Интеграл С-01);

6. Если в процессе выполнения эксперимента шлифовальные круги механически разрушались, то эксперимент прекращался. Абразивный инструмент с определенными эксплуатационными характеристиками признавался несоответствующим ТУ № 3982-001-00224774 - 2001.

Список параметров фиксируемых в ходе натурных испытаний модифицированных шлифовальных кругов и методология контроля представлены в таблице 3.1. Представленные параметры процесса обработки рабочей поверхности головки железнодорожных рельсов определены при помощи формул или зафиксированы при помощи измерительных инструментов.

Таблица 3.1. Фиксируемые параметры при проведении натурных испытаний модифицированных шлифовальных кругов для специализированных рессоршлифовальных поездов, мобильных средств (с абразивными кругами совершающие круговые движения).

Наименование параметра	Обозначение	Ед. измерения	Примечания
1	2	3	4
1. Высота шлифовального круга	h	мм	Фиксируется инструментально
2. Высота рабочей части шлифовального круга	h_p	мм	Используется формула (3.1)
3. Скорость движения по обрабатываемому участку	$V_{\text{лаб.уст}}$	км/ч	Фиксируется инструментально оборудованием лабораторной установки
4. Мощность операции	P	кВт	Фиксируется инструментально оборудованием лабораторной установки
5. Продолжительность обработки (время работы шлиф. кругов)	$t_{\text{шк}}$	мин	Фиксируется инструментально
6. Высота шлифовального круга после обработки рельсов	$h_{\text{ост}}$	мм	Фиксируется инструментально штангенциркулем ШЦ-II

Продолжение таблицы 3.1.

7. Износ абразивного шлифовального круга	$h_{из}^{шк}$	мм	Используется формула (3.3).
8. Интенсивность износа шлифовальных кругов	$I_{шк}$	мм/мин	Используется формула (3.2).
9. Стойкость шлифовальных кругов	T	ч	Используется формула (3.4).
10. Длина обработанного участка	$L_{уч}$	м	Определяется расчетным путем
11. Съём припуска рельсовой стали	$t_{p.c}$	мм	Фиксируется инструментально
12. Объем удаленного металла рельсовой стали	V_{p65}	мм ³	Определяется расчетным путем
13. Объем затраченного шлифовального материала	$V_{зшм}$	мм ³	Используется формула (3.5).
14. Коэффициент шлифования для определенных режимов резания	$K_{ш}$		Используется формула (3.6).
15. Ширина участка шлифования	B	мм	Фиксируется инструментально

Определение высоты рабочего участка шлифовального круга h_p вычисляется по следующей формуле:

$$h_p = h - h_{п}, \text{ мм}, \quad (3.1)$$

где: h - высота шлифовального круга, мм;

$h_{п} = 50$ – высота шлифовального круга для закрепления в посадочном месте лабораторной установки, мм.

Определение интенсивности износа шлифовальных кругов $I_{шк}$ использовали следующую формулу:

$$I_{шк} = \frac{h_{из}^{шк}}{\tau_{шк}}, \text{ мм/мин}, \quad (3.2)$$

где: $\tau_{шк}$ – общее время работы шлифовального круга, мин;

$h_{из}^{шк}$ - износ шлифовального круга за время проведения натурного эксперимента t мм:

$$h_{из}^{шк} = h - h_{ост}, \text{ мм}, \quad (3.3)$$

где: $h_{ост}$ - высота шлифовального круга (остаток) после завершения экспериментальной обработки поверхности катания головок рельсов, мм.

Стойкость круга T определяется из выражения:

$$T = \frac{h_p}{60 * I_{шк}}, \text{ ч}, \quad (3.4)$$

Объем затраченного шлифовального материала вычисляется по формуле:

$$V_{шм} = \frac{\pi * (D^2 - d^2)}{4} h_{шк}, \text{ мм}^3, \quad (3.5)$$

где: D , d – соответствуют наружному и внутреннему диаметрам шлифовального круга, мм.

Коэффициент шлифования $K_{ш}$ определяется из выражения (3.6):

$$K_{ш} = \frac{V_{p65}}{V_{абр}} \quad (3.6)$$

где: V_{p65} – полный объем удаленного металла рельсовой стали, мм³.

3.2 Модификация структуры абразивного инструмента с использованием микро-наполнителей

В результате проведенного анализа 1 главы настоящей работы связанного с возможностью совершенствования абразивного инструмента, выявлены недостатки которые заключаются в следующем: отсутствуют адекватные математические модели описывающие взаимосвязи геометрических параметров модификаторов и их процентного содержания в объеме абразивных композиций влияющих на прочностные свойства черепка модифицированного абразивного инструмента. Помимо этих критериев отсутствуют данные по влиянию рецептурно-технологических параметров модифицированного абразивного инструмента его зернистости, твердости, вида связи).

Режущая способность модифицированных абразивных инструментов зависит от комплексных рецептурно-технологических критериев, которые

сосредоточены на определенных позициях, таких как структурно-механические свойства корундовых абразивных частиц, физико-механические характеристики связующего (керамической, бакелитовой и других видах связующих компонентов).

Обеспечить необходимую прочность абразивному инструменту удастся за счет использования плавящегося связующего компонента стекловидной массы, в состав которой входят огнеупорная глина, полевой шпат, а также кварц. В процессе обжига формовочной абразивной композиций стекловидная масса формирует черепок абразивного инструмента с необходимыми параметрами жесткости, износостойкости и прочности (в том числе и температурной), однако связующее обладает повышенной хрупкостью.

Наиболее уязвимыми местами в структуре абразивного инструмента являются участки между зернами абразивных частиц и связующим компонентом, так называемые «мостики». Возникающие в структуре черепка трещины развиваются по более легким траекториям обходя абразивные зерна основного компонента и распространяясь к «мостикам» разрушая внутреннюю полость черепка инструмента [127].

Результаты исследований, представленных Крюковым С. А. (см. рисунок 3.3.) позволяют определить влияние размеров микро-наполнителей и их концентрации в формовочных композициях на изменение прочности образцов абразивного инструмента.

Анализируя полученные в результате экспериментальных исследований зависимости, наблюдается изменение прочности на разрыв B_p абразивного инструмента она уменьшается в зависимости от геометрических размеров наполнителей. В процессах структурообразования черепка абразивного инструмента немаловажную роль играет фактор дисперсности наполнителей рассматриваемой дисперсной системы.

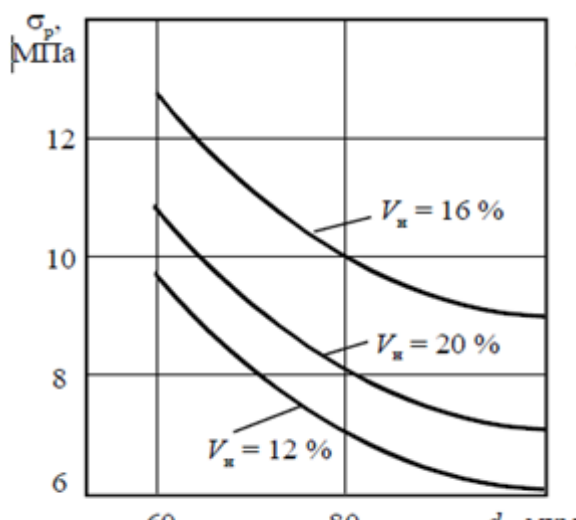


Рис. 3.3 - Зависимости предела прочности на сжатие образцов от размера частиц наполнителя

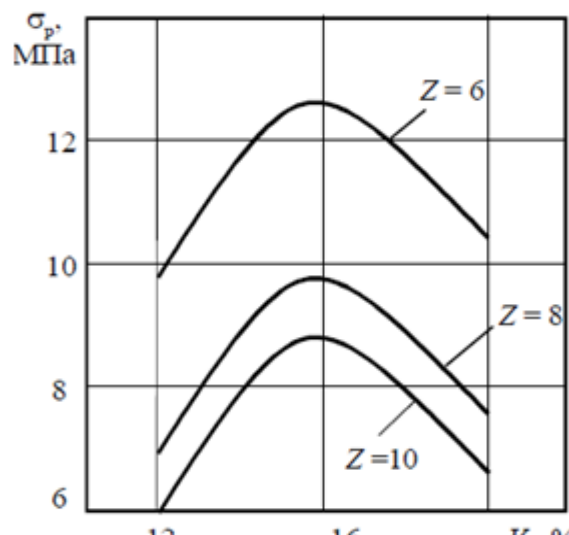


Рис. 3.4 - Зависимости предела прочности на сжатие образцов от их объемного содержания

В результате проведенных экспериментов и зависимостей полученных в ходе обработки экспериментальных сведений возможно значительно в пределах 25 - 60 % увеличить прочность абразивного инструмента, за счет варьирования геометрических размеров наполнителей в формовочных композициях, в сравнении с заводским абразивным инструментом.

Стоит заметить, что при использовании наполнителей более мелких фракций начинает происходить процесс агрегирования этих компонентов. Наличие такого эффекта приводит к тому, что нарушается равномерное распределение частиц наполнителя мелкодисперсной фракции в объеме формовочной композиции, сводя на «нет» упрочнение внутренней структуры черепка абразивного инструмента.

Автор предпринимает попытку упрочнения слабых мест «мостиков» в черепке абразивного композиционного шлифовального круга, за счет использования инновационных нанопропрочнителей типа МУНТ «Таунит» с определением оптимальных геометрических размеров конгломератов с учетом зернистости, твердости и процентного соотношения абразивных частиц (номера структуры шлифовальных кругов).

3.2.1 Разработка эффективного способа диспергирования наномодификатора МУНТ «Таунит»

Предлагается методика наполнения формовочных смесей абразивного инструмента наномодификатором типа МУНТ (многослойных углеродных нанотрубок), предварительно прошедших через ультразвуковую обработку с последующим перемешиванием всех абразивных компонентов композиции.

Ультразвуковую обработку исходных глобул МУНТ «Таунит» осуществляли в ультразвуковом диспергаторе модели STEGLER 3DT (рисунок 3.5.). Характеристики прибора следующие: частота ультразвука составляет 40000 Гц, суммарная мощность ультразвуковых волноводов составляет 0,12 кВт.



Рис. 3.5 - Внешний вид ультразвуковой ваны

Структура модификатора «Таунит» представляет собой трубчатые образования с внутренним сквозным каналом, состоящие из нескольких углеродных слоев.

Геометрические размеры частиц модификатора имеют внешний радиус 10-35 нм и длину от двух до 5 мкм. Внешний вид гранул модификатора в виде сыпучего порошка черного цвета показан на рисунке 3.6.



Рис. 3.6 - МУНТ «Таунит», полученный в ООО «НаноТехЦентр»

Конгломераты гранул углеродных нанотрубок, как и сами многостенные нанотрубки являются химически инертными что позволяет их применять в различных смесях и композициях. Ограничивается их применение тем что конгломераты представляют собой спутанные клубки из углеродных трубок. В следствии этого необходимым условием для их эффективного применения является предварительное их измельчение.

На этапе предварительных испытаний полученных материалов с внесением небольшого количества модификатора в виде нанотрубок было замечено существенное увеличение прочности на растяжение и изгиб. Отсюда был сделан вывод о том что показатели прочностных свойств получаемого черепка абразивного инструмента существенно возрастают от добавки модификатора. Объясняется это в первую очередь высокими физико-механическими характеристиками самих нанотрубок и их высокой адгезией к основным материалам, что подтверждает гипотезу о армирующем эффекте данного вида добавки.

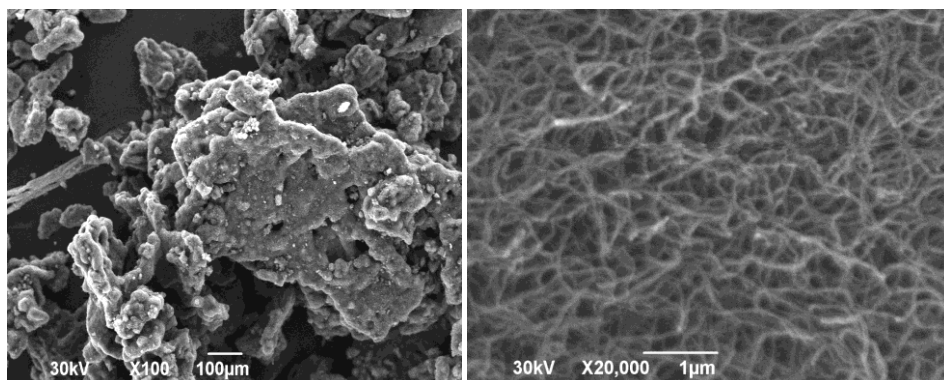


Рис. 3.7 - Внешний вид конгломератов(слева) и спутанные пучки углеродного наноматериала «Таунит» (справа)

Первоначальной задачей являлось успешное разрушение и измельчение исходных глобул модификатора. Выполнение этой задачи решалось с использованием приема диспергирования. МУНТ подвергались воздействию кавитационных сил в жидкой среде с использованием ультразвуковой ванны STEGLER 3DT.

Особо важным звеном в цепочке модифицирования абразивного инструмента является способ (варианты) доставки в формовочную композицию наномодификатора. С учетом технологических особенностей процесса изготовления абразивного инструмента проведены эксперименты по приготовлению суспензии жидкостных сред, в которых наиболее эффективно разрушаются исходные глобулы рассматриваемого наномодификатора за счет ультразвукового воздействия.

В процессе определения эффективного способа доставки наномодификатора в формовочную композицию определены оптимальное время необходимое для получения стабильной суспензии наномодификатора, частота ультразвукового воздействия, среды обработки.

В результате оптимальное время обработки составило $t=420$ сек, при частоте $f = 40000$ Гц.

В основе методике введения модификатора лежит ультразвуковая обработка исходного материала в изопропиловом спирте и дальнейшая его смешивание с натриевым стеклом.

Таким образом формовочная смесь шлифовального круга будет содержать модификатор в необходимом количестве и равномерно распределен в композиции формируемого круга.

Исследователями ТГТУ были получены следующие основные физико-механические характеристики МУНТ «Таунит»: средняя длина частиц варьируется в пределах 2-10 мкм, насыпная плотность составляет около 500 кг/м^3 , площадь удельной внешней поверхности около $120 \text{ м}^2/\text{г}$, прочность на растяжение составляет 2000 МПа, средний диаметр около 40 мкм.

Определение размеров измельченных глобул «Таунит» исследовали при помощи цифрового микроскопа со встроенной камерой Альтами 105 и приложением Altami VideoKit для обработки изображений. Осуществлены серии экспериментов результаты которых представлены в таблице 3.2, по определению влияния продолжительности ультразвуковой обработки на геометрические параметры МУНТ «Таунит».

Таблица 3.2. 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

По полученным результатам удалось получить зависимости рисунок 3.8 изменения геометрических параметров МУНТ «Таунит» от продолжительности ультразвуковой обработки в различных средах.

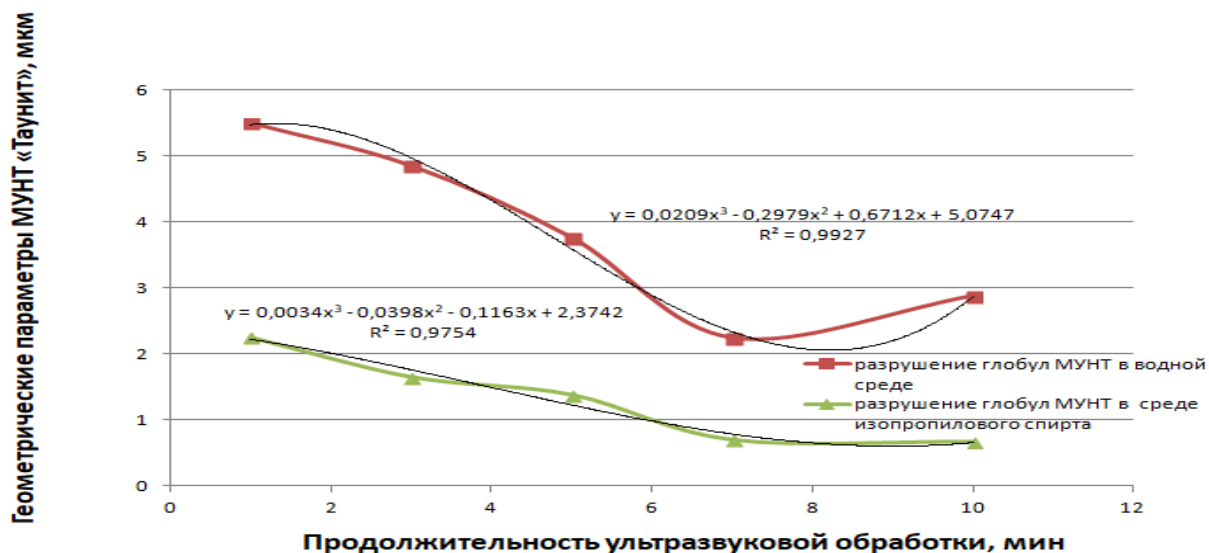


Рис. 3.8. - Зависимости геометрических параметров МУНТ «Таунит» от продолжительности ультразвуковой обработки в различных средах

Проводя анализ полученных зависимостей диспергирования наночастиц МУНТ «Таунит» в различных средах, наблюдаются следующие тенденции в протекании рассматриваемого физического процесса. Наименьший размер глобул достигнут при ультразвуковой обработке в среде

изопропилового спирта при продолжительности 7 минут средняя величина частиц составила 0,7 мкм, что в 3,2 раза меньше в сравнении с диспергацией осуществляемой в водной среде. Дальнейшее увеличение продолжительности ультразвуковой обработки не приводит к существенным изменениям размера частиц, однако наблюдается агрегация частиц с увеличением геометрических размеров глобул.

После определения эффективных режимов и среды диспергации глобул наномодификатора необходимо было определить долю частиц (определенных по размерам), прошедших обработку в среде изопропилового спирта в течении 7 минут.

Распределение исходных(чистых) и прошедших обработку частиц по размерам осуществлялось в центре коллективного пользования Самарского государственного технического университета «Исследование физико-химических свойств веществ и материалов» приведена на рисунке 3.9.

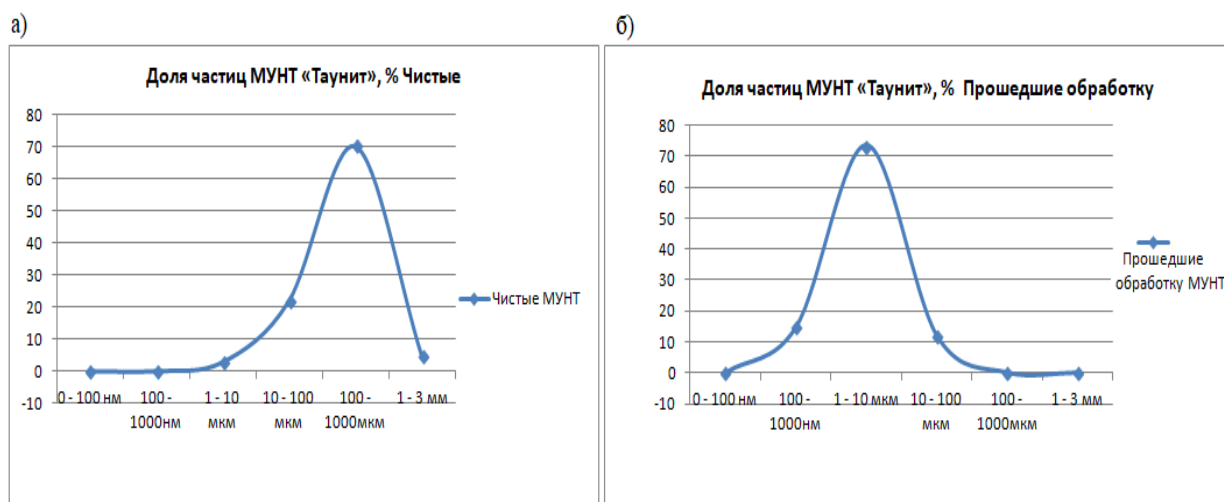


Рис. 3.9. - Распределение частиц по геометрическим размерам исходных(чистых) А и прошедших 7 минутную обработку частиц в среде изопропилового спирта

По результатам проведенного эксперимента по определению доли частиц (определенных по размерам) исходных(чистых) и прошедших обработку МУНТ по размерам позволило составить таблицы 3.3 и 3.4 с фиксируемым объемным изменением границ геометрических размеров частиц МУНТ.

Таблица 3.3. Границы геометрических размеров частиц МУНТ чистых и прошедших обработку глобул.

Границы геометрических размеров	Доля частиц МУНТ «Таунит», %	
	Чистые	Прошедшие обработку
0 - 100 нм	0	0
100 - 1000нм	0	14,8
1 - 10 мкм	2,8	80,4
10 - 100 мкм	22	4,8
100 - 1000мкм	70,4	0
1 - 3 мм	4,8	0

Таблица 3.4. Экспериментально определенные размеры частиц модификатора «Таунит»

Показатели	Средние геометрические размеры, мкм частиц МУНТ «Таунит»
Конгломераты нанотрубок	302,45
Суспензия МУНТ + спирт	0,7

Анализируя данные таблиц 3.3, 3.4 возможно наблюдать следующие изменения происходящие с наночастицами МУНТ «Таунит» в процессе их ультразвуковой диспергации а именно, средний геометрические размер исходных(чистых) частиц составляет 302,45 мкм, после использования технологического приема ультразвукового диспергирования продолжительностью 7 минут в среде изопропилового спирта средний размер частиц уменьшается до показателя 0,7 мкм, это в 432 раза меньше относительно чистых наночастиц.

Объемная доля чистых частиц определенных геометрических размеров находится в интервале от 10 - 1000 мкм, объемная доля наночастиц определенных геометрических размеров прошедшие обработку смещается в область от 100 нм до 10 мкм.

Таким образом суспензия, полученная по предлагаемой технологии в своем объеме, содержит 15 % частиц нанометровых геометрических размеров и 85 % частиц размеров от 1 - 10 мкм, 5 % частиц размеров от 10 - 100 мкм.

В результате применения технологии ультразвуковой обработки в среде изопропилового спирта наномодификатора типа МУНТ «Таунит» удастся обеспечить измельчение исходных глобул и оптимизировать фракционный объемный состав получаемой суспензии в сторону наноразмерного диапазона.

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 3.10).

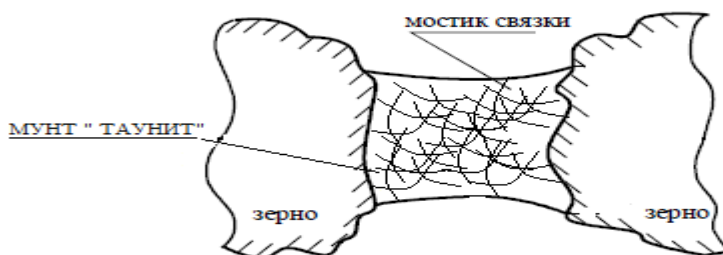


Рис. 3.10 - Модель мостика связки модифицированного АИ

3.2.2 Влияние наномодификатора на прочностные свойства керамического сегмента шлифовального круга

Проектирование и создание композиционного шлифовального круга, состоящего из чередующихся режущих элементов двух типов, первый тип элементов которого выполнен из абразивных зерен на бакелитовой связке, а второй тип из абразивных зерен на наноструктурированной керамической связке, осуществляется по комбинированной технологии изготовления абразивных инструментов.

С целью определения влияния наномодификатора полученного по технологии описанной в п.3.1.1, происходило наполнение керамической связки наномодификатором типа МУНТ «Таунит», который смешивался с

базовыми компонентами связки(шихты) до получения однородной массы продолжительностью 5 минут.

Состав шихты(база) вес. %: полевой шпат 53%, каолин 31%, жидкое натриевое стекло 7%, декстрин 9%, абразивным материалом является белый электрокорунд марки 25А. После приготовления модифицированной смеси, формировались стандартные образцы прошедшие обжиг при температуре 1320°С, которые подвергались стандартным физико-механическим испытаниям.

Результаты испытаний модифицированного керамического сегмента шлифовального круга представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 Влияние содержания наномодификатора на физико-механические свойства керамического сегмента шлифовального круга

Состав	Расход материалов, мас. %		Физико - механические свойства, МПа	
	База шихта	МУНТ «Таунит»	$\sigma_{\text{рас}}$	$\sigma_{\text{изг}}$
1	100	-	7,85	20,2
2		0,0005	11,1	24,04
3		0,005	12,7	25,4
4		0,001	12,4	25,1
5		0,05	11,6	24,4
6		0,01	11,2	24,1
7		0,5	10,8	23,5
8		1	11,5	23,9

Проводя комплексный анализ зависимостей, представленных на рисунках 3.11, 3.12 по влиянию содержания наномодификатора на физико-механические свойства керамического сегмента шлифовального круга и полученных результатов экспериментов, представленных в таблице 3.5 позволяют выявить наиболее эффективную концентрацию наномодификатора при которой значительно возрастают физико-механические свойства наномодифицированного керамического сегмента.



Рис. 3.11. - Распределение прочности при растяжении керамических сегментов в зависимости от концентрации наномодификатора МУНТ «Таунит», %

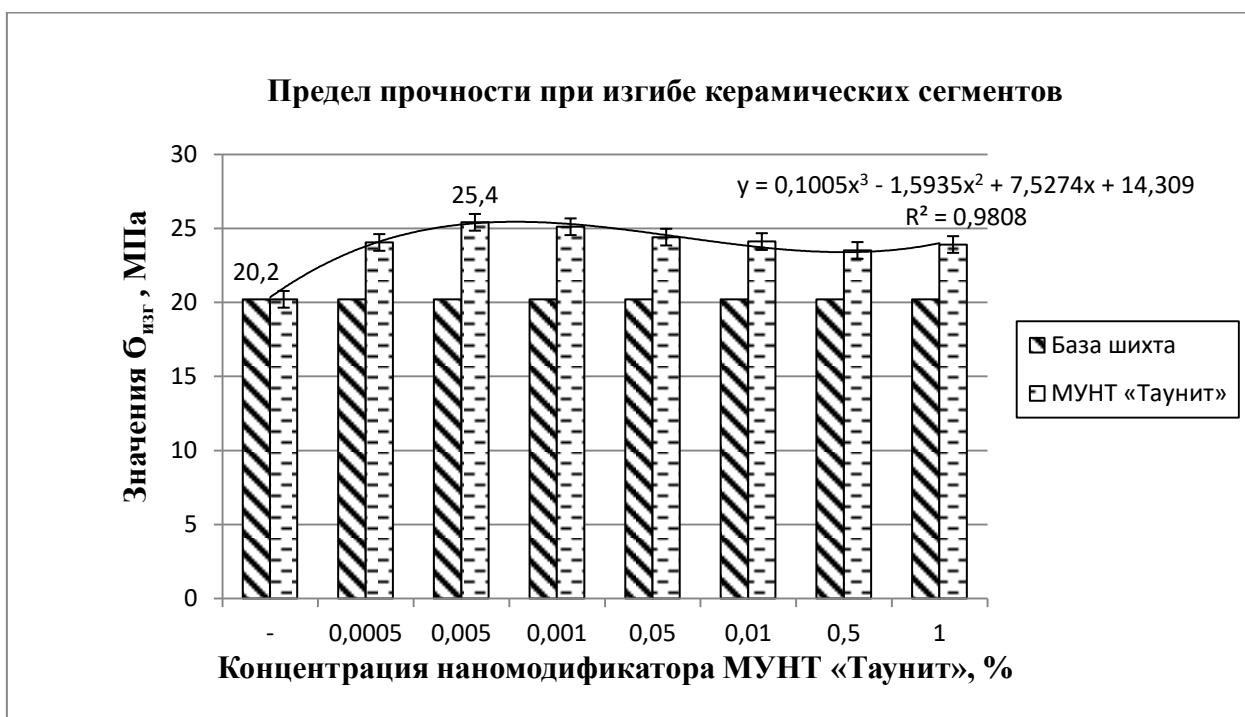


Рис. 3.12. - Распределение прочности при изгибе керамических сегментов в зависимости от концентрации наномодификатора МУНТ «Таунит», %

В результате проведенных экспериментов установлено, что оптимальная дозировка МУНТ «Таунит» в базовом составе шихты составляет 0,005 - 0,001 мас. % от расхода натриевого стекла.

При наличии в составе керамической шихты наномодификатора в количестве 0,005 %, увеличивается предел прочности при растяжении в 1,62(12,7 МПа) раза по сравнению с базовым составом, показатель прочности при испытании контрольных образцов на изгиб достигает

значения 25,4 МПа что на 25,6 % больше по сравнению с базовой композицией керамической шихты.

Микроструктура наноструктурированного керамического сегмента композиционного шлифовального круга представлена на (рисунке 3.13).

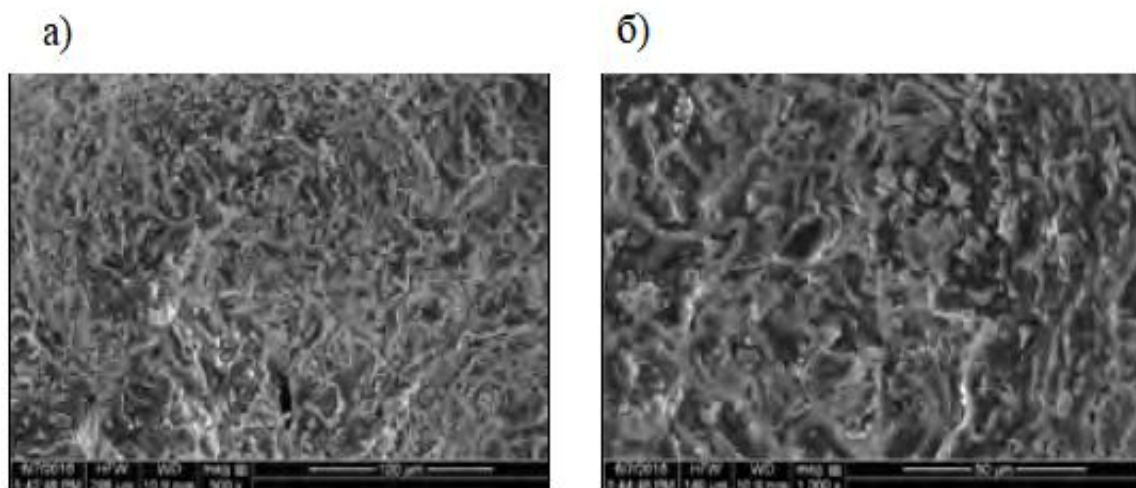


Рис.3.13 - Микроструктура модифицированного керамического сегмента 0,005% наномодификатора МУНТ «Таунит»: а - 600х; б - 1200х

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).

Геометрические модели модифицированных композиционных шлифовальных кругов представлены на рисунке 3.14 а, б.

Экспериментальные образцы композиционных шлифовальных кругов для ручного станка и для рельсошлифовального поезда представлены на рисунке 3.15 а, б.



Рис. 3.14 - Геометрические модели композиционных шлифовальных кругов используемых на мобильных рельсошлифовальных установках: а - для ручного станка; б - для рельсошлифовального поезда



Рис. 3.15 - Экспериментальные образцы композиционных шлифовальных кругов а - для ручного станка; б - для рельсошлифовального поезда

В дальнейших исследованиях направленных на выявление эффективных режимов обработки верхней части поверхности катания головок железнодорожных рельсов использовались композиционные шлифовальные круги с комбинированной рабочей поверхностью (рисунок 3.15).

При изготовлении керамического сегмента композиционного шлифовального круга в состав формовочной композиции вносили наноструктурированный модификатор в количестве 0,005 % от расхода натриевого стекла. Рецепт и технология изготовления сегмента на бакелитовой связке шлифовального круга не подвергалась изменениям, его производство осуществлялось по традиционной технологии.

3.3 Методика планирования и оценки результатов исследований работы шлифовальных композиционных кругов

Целью проводимых натурных экспериментов являлось определение наиболее эффективных режимов обработки верхней части поверхности катания головок железнодорожных рельсов и рельсовых плетей для кругов с различными структурными характеристиками. В ходе экспериментов определялась стойкость абразивных кругов и качество обработанной поверхности.

Математическая модель процесса шлифования поверхности катания головок железнодорожных рельсов представляется в общем виде полиномом:

$$y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + b_{123}X_1X_2X_3 \quad (3.7)$$

где: y - математическая функция, описывающая процесс шлифования рельсов;

X_1, X_2, X_3 - кодированные значения факторов (технологические $P_z, V_{\text{лаб.уст}}, V_{\text{кр}}$; физико-механические характеристики шлифовального круга (F, St, Z_h)).

Допущенные в диссертационном исследовании уровни технологических факторов и их зашифрованные обозначения представлены в таблице 3.6. Зашифрованные значения факторов x_1, x_2, x_3 , принимаются на трех уровнях: верхней уровень +1, основной уровень 0 и нижний уровень -1.

Таблица 3.6. Зашифрованные обозначения факторов и их уровней

Факторы	Зашифрованные обозначение	Натуральные уровни факторов, соответствующие зашифрованным		
		Верхний +1	Основной 0	Нижний -1
Сила резания, Н	x_1	36	41	46
Скорость лабораторной установки, км/ч;	x_2	5	6	7
Скорость шлифовального круга, м/с;	x_3	44	51	58

В целом для проверки значимости коэффициентов уравнения (3.7), проведены трехфакторные эксперименты для технологических и физико-механических факторов, использование параллельных экспериментов (по критерию Стьюдента) подтвердила значимость всех коэффициентов уравнений. Проверка на адекватность уравнений математических моделей

процесса шлифования поверхности катания головок железнодорожных рельсов осуществлялась с использованием критерия Фишера [160].

В основу обработки большого массива экспериментальных данных, полученных в ходе натурных экспериментов, лег дисперсионный анализ, осуществляемый с использованием специализированного программного комплекса Statistika.

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

В качестве исходных независимых переменных определены такие факторы как сила резания P_z (36-46 Н), продольная подача $V_{\text{лаб}}$ (скорость лабораторной установки 5-7 км/ч), скорость шлифовального круга $V_{\text{кр}}$ (44-58 м/с), зернистость (F36-F14), структура S_t (% абразива 40-60%), твердость круга Z_h (1,1-1,7 мм).

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

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

3.3.1 Влияние физико-механических характеристик композиционных шлифовальных кругов и технологических режимов обработки на величину снимаемого припуска

С целью подтверждения наиболее значимых физико-механических характеристик (факторов) композиционного шлифовального круга, влияющих на величину съема припуска $t_{p.c}$ проведено математическое планирование и натурные эксперименты (матрица планирования экспериментов представлена в приложении П 4.1). В результате проверки

значимости факторов: зернистости (F), структуры (S_t) и твердости (Z_h) композиционного шлифовального круга получено следующее уравнение:

$$t_{p.c} = -3,13 + 0,007F + 0,15S_t + 3,8Z_h \quad (3.8)$$

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

Интерпретация полученных коэффициентов регрессии 3.8 заключается в следующем: константа оценивает агрегированное влияние прочих (кроме учтенных в модели X_i) факторов на величину съема припуска и означает, что величина съема припуска $t_{p.c}$ (мкм) при отсутствии X_i составила бы -3,13 мкм.

Коэффициент b_1 указывает, что с увеличением зернистости (F) на 1, величина съема припуска $t_{p.c}$ увеличивается на 0,007 мкм. Коэффициент b_2 указывает, что с увеличением количества абразивных частиц в структуре абразивного инструмента (S_t) на 1, величина съема припуска увеличивается на 0,15 мкм. Коэффициент b_3 указывает, что с увеличением твердости шлифовального круга (Z_h) на 1, значения величины съема припуска $t_{p.c}$ увеличивается на 3,8 мкм.

В результате обработки полученных экспериментальных данных, представленных в приложении П 4.2 определена следующая зависимость величины съема припуска $t_{p.c}$ (мкм) в зависимости от технологических режимов обработки рабочей поверхности катания железнодорожных рельсов.

При проведении натурных экспериментов установлено, что наиболее значимыми технологическими факторами, влияющим на величину съема припуска, являются сила резания, скорость лабораторной установки, скорость шлифовального круга.

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

$$t_{p.c} = -24,233 + 0,172P_z + 1,35V_{\text{лаб}} + 0,46V_{\text{кр}} \quad (3.9)$$

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

Интерпретация полученных коэффициентов регрессии 3.9 заключается в следующем: константа оценивает агрегированное влияние прочих (кроме

учтенных в модели X_i) факторов на величину съема припуска и означает, что величина съема припуска $t_{p.c}$ (мкм) при отсутствии X_i составила бы -24,2334 мкм.

Коэффициент b_1 указывает, что с увеличением силы резания (P_z) на 1, величина съема припуска $t_{p.c}$ увеличивается на 0,172 мкм. Коэффициент b_2 указывает, что с увеличением скорости лабораторной установки ($V_{\text{лаб}}$) на 1, величина съема припуска увеличивается на 1,35 мкм. Коэффициент b_3 указывает, что с увеличением скорости шлифовального круга ($V_{\text{кр}}$) на 1, значения величины съема припуска $t_{p.c}$ увеличивается на 0,46 мкм.

Обработка экспериментов физико-механических характеристик композиционного шлифовального круга проводилась с фиксируемым значением зернистости абразивного материала (принятой - F14).

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

$$t_{p.c} = 106,011 - 0,928S_t - 103,821Z_h + 0,023S_t^2 - 0,804S_tZ_h + 50Z_h^2 \quad (3.10)$$

На рисунке 3.16 представлена графическая интерпретация результатов обработки математической модели 3.10.

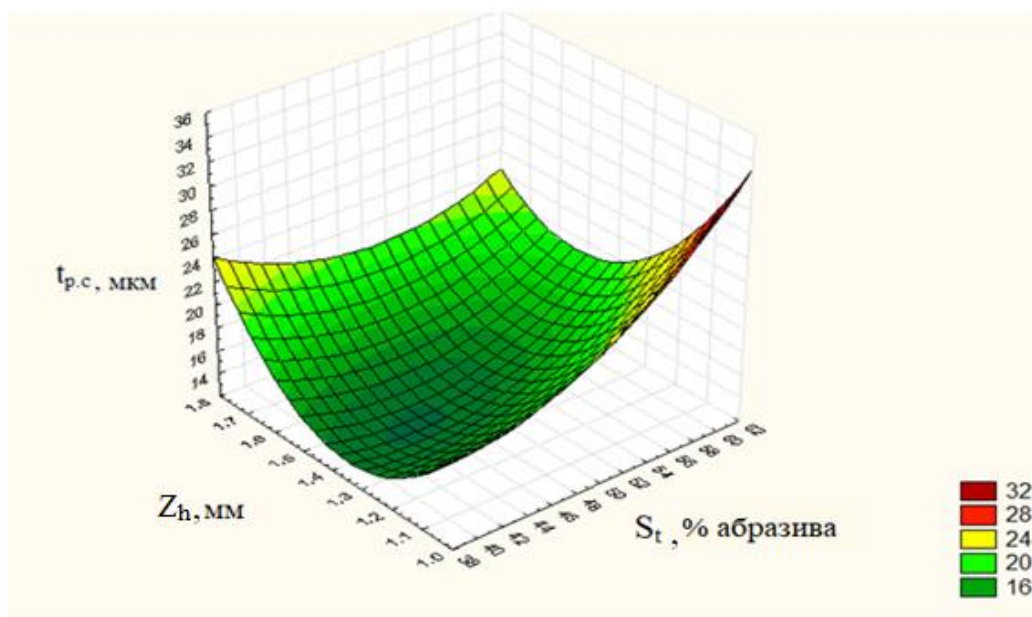


Рис. 3.16 - Влияние физико-механических факторов композиционного круга на величину съема припуска при зернистости круга F14

Из полученного уравнения регрессии 3.10, 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 при зернистости F14.

Математическое планирование экспериментов от технологических факторов проводилось аналогичным образом как при исследовании физико-механических характеристик композиционного шлифовального круга.

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

$$t_{p.c} = -216,743 + 7,307P_z + 2,709V_{кр} - 0,063P_z^2 - 0,041P_z V_{кр} - 0,005V_{кр}^2 \quad (3.11)$$

На рисунке 3.17, представлены графические интерпретации результатов обработки математической модели 3.11.

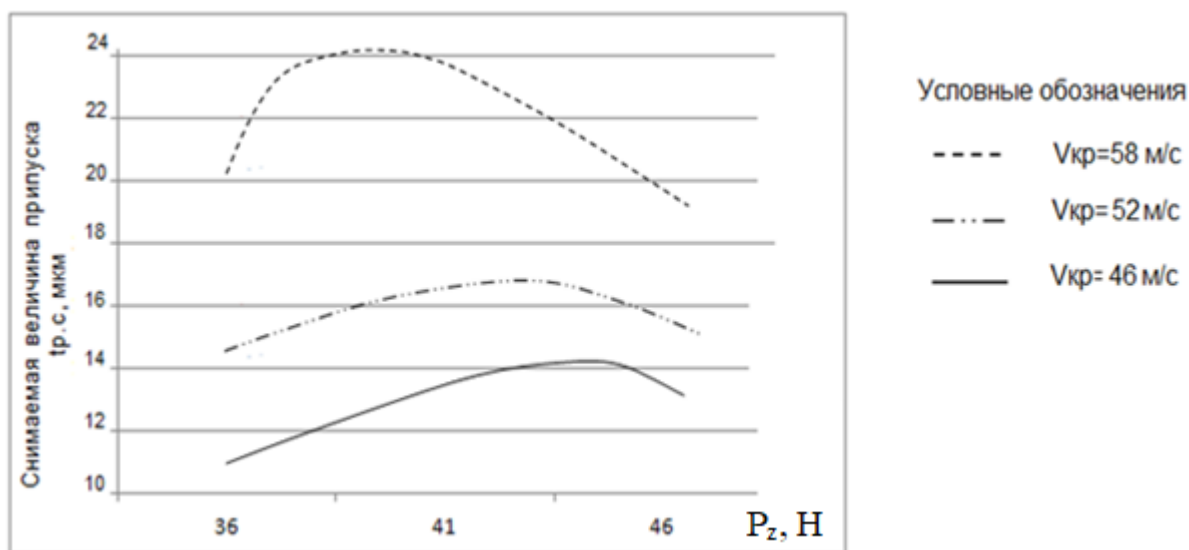


Рис. 3.17 - Влияние технологических факторов процесса шлифования поверхности железнодорожных рельсов на величину съема припуска при максимальной скорости лабораторной установке 7 км/ч

Из полученного уравнения регрессии 3.11 следует, что при скорости шлифовального круга 58м/с и силе резания 40Н, достигается максимальная величина съема припуска $t_{p.c}=24$ мкм.

Образующиеся стружка (Рисунок 3.18) в процессе шлифования на большой окружной скорости шлифовального круга имеет значительно большую ширину при увеличенной толщине.

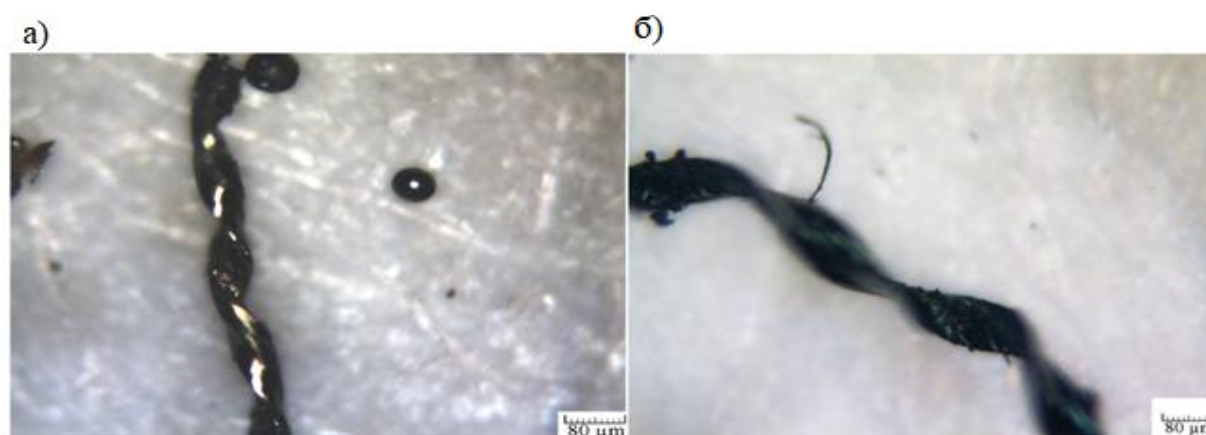


Рис. 3.18 - Фрагменты микроструктуры стружки рельсовой стали Э76ХФ полученной после обработки традиционным - (а) и КШК - (б) увеличение - $\times 500$

Проводя анализ микроструктуры стружки рельсовой стали Э76ХФ полученной после обработки традиционным и композиционным шлифовальными кругами определено, образованные в процессе шлифования стружки относятся к сливному типу в обоих случаях поверхность гладкая завитая, однако наблюдаются стружки значительной ширины, снимаемые абразивными зернами при работе композиционного шлифовального круга.

При детальном рассмотрении технологической операции, с использованием композиционных шлифовальных кругов различных структур, достигнутый результат возможно объяснить следующим образом: в процессе резания образуются стружки значительной ширины, получаемые в результате работы абразивных частиц по поверхности катания рельса при общем снижении количества образованных стружек.

Рассматривая процесс шлифования, значения снимаемой величины припуска рельсовой стали увеличиваются при снижении твердости КШК. Данное обстоятельство связано с тем, что при работе КШК меньшей твердости режущая способность такого инструмента выше, так как зерна участвующие в процессе обработки значительно быстрее обновляют режущую поверхность инструмента, своевременно освобождаясь из

связующего компонента черепка абразивного инструмента, при максимальном использовании ресурса абразивного зерна.

Выполненная серия натуральных экспериментов и полученные корреляционные зависимости в процессе обработки экспериментальных данных позволили установить факторы, влияющие на величину снимаемого припуска рельсовой стали при шлифовании поверхности катания головок железнодорожных рельсов.

3.3.2 Стойкость композиционных шлифовальных кругов с учетом их структурных характеристик и режимов обработки поверхности катания головок железнодорожных рельсов

С целью подтверждения наиболее значимых физико-механических характеристик (факторов) композиционного шлифовального круга, влияющих на стойкость шлифовальных кругов $T(ч)$ проведено математическое планирование эксперимента (матрица планирования экспериментов представлена в приложении П 4.3).

В результате проверки значимости факторов: зернистости (F), структуры (S_t) и твердости (Z_h) композиционного шлифовального круга получено следующее уравнение зависимости стойкости $T(ч)$ от физико-механических характеристик композиционного шлифовального круга:

$$T = 6,4 - 0,003F + 0,06S_t + 2,7Z_h \quad (3.12)$$

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

Интерпретация полученных коэффициентов регрессии 3.12 заключается в следующем: константа оценивает агрегированное влияние прочих (кроме учтенных в модели X_i) факторов на стойкость шлифовальных кругов означает, что стойкость шлифовальных кругов $T(ч)$ при отсутствии X_i составила бы 6,4 ч.

Коэффициент b_1 указывает, что с увеличением зернистости (F) на 1, стойкость шлифовального круга снижается на 0,003 ч. Коэффициент b_2 указывает, что с увеличением количества абразивных частиц в структуре

абразивного инструмента (S_t) на 1, стойкость шлифовальных кругов $T(ч)$ увеличивается на 0,06 ч. Коэффициент b_3 указывает, что с увеличением твердости шлифовального круга (Z_h) на 1, значения стойкости шлифовального круга $T(ч)$ увеличивается на 2,7 ч.

Математическое планирование экспериментов по выявлению влияния технологических факторов на процесс шлифования поверхности железнодорожных рельсов проводились аналогичным образом, как и при исследовании физико-механических характеристик композиционного шлифовального круга.

При проведении и последующей обработке экспериментальных данных, направленных на исследование стойкости $T(ч)$ композиционных кругов определены значения технологических факторов, влияющих на неё. Матрица планирования экспериментов представлена в приложение П 4.4.

В результате проведения натурных экспериментов установлено, что наиболее значимыми технологическими факторами, влияющими на стойкость шлифовальных кругов, являются сила резания, скорость лабораторной установки, скорость шлифовального круга.

Стойкость шлифовальных кругов $T(ч)$ в зависимости от технологических режимов определяется следующим уравнением:

$$T = 10,7 - 0,038P_z - 0,37V_{\text{лаб}} + 0,019V_{\text{кр}} \quad (3.13)$$

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

Интерпретация полученных коэффициентов регрессии 3.13 заключается в следующем: константа оценивает агрегированное влияние прочих (кроме учтенных в модели X_i) факторов на стойкость шлифовальных кругов означает, что стойкость шлифовальных кругов $T(ч)$ при отсутствии X_i составила бы 10,7ч.

Коэффициент b_1 указывает, что с увеличением силы резания (P_z) на 1, стойкость шлифовального круга снижается на 0,038 ч. Коэффициент b_2

указывает, что с увеличением скорости лабораторной установки ($V_{\text{лаб}}$) на 1, стойкость шлифовальных кругов $T(\text{ч})$ снижается на 0,37 ч. Коэффициент b_3 указывает, что с увеличением скорости шлифовального круга ($V_{\text{кр}}$) на 1, значения стойкости шлифовального круга $T(\text{ч})$ увеличивается на 0,019 ч.

В результате обработки экспериментальных данных влияющих на работоспособность(стойкость) шлифовальных кругов получены следующие зависимости выходных параметров от физико-механических характеристик композиционного шлифовального круга при зернистости вставок F14:

$$T = 20,107 - 0,933S_t + 22,037Z_h + 0,009S_t^2 + 0,05S_tZ_h - 9,815Z_h^2 \quad (3.14)$$

На рисунке 3.19, представлена графическая интерпретация результатов обработки математической модели 3.14.

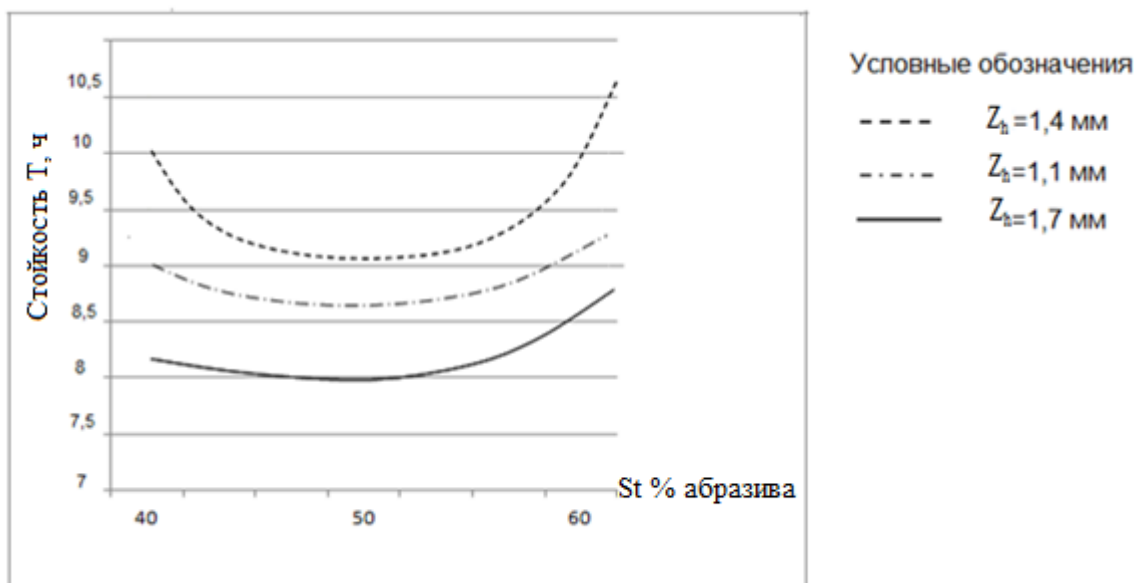


Рис.3.19 - Влияние физико-механических характеристик композиционного шлифовального круга на параметры процесса шлифования поверхности железнодорожных рельсов: стойкость(работоспособность) при зернистости круга F14

Из полученного уравнения регрессии 3.14 следует, что при зернистости F14, твердости композиционного шлифовального круга 1,1мм(Z_h) и плотной структуры S_t3 (60% абразива), стойкость(работоспособность) шлифовального круга с заявленными физико-механическими характеристиками составит $T=9,4\text{ч}$.

Математическое планирование экспериментов по выявлению зависимости технологических факторов проводились аналогичным образом,

как и при исследовании физико-механических характеристик композиционного шлифовального круга.

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

$$T = 17,642 - 0,935P_z + 0,373V_{кр} + 0,008P_z^2 + 0,004P_zV_{кр} - 0,005V_{кр}^2 \quad (3.15)$$

На рисунке 3.20, представлена графическая интерпретация результатов обработки математической модели 3.15.

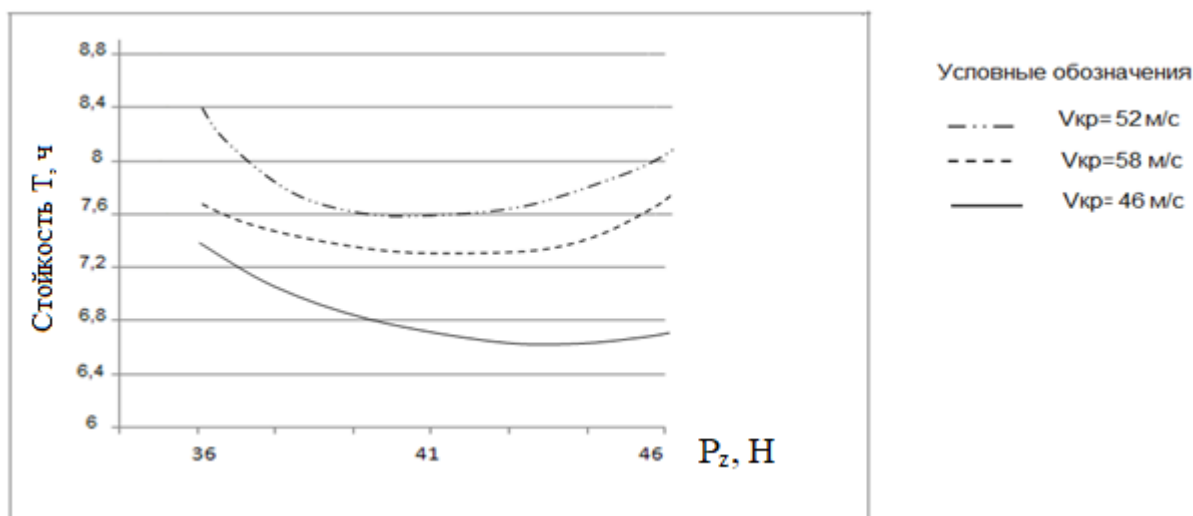


Рис. 3.20 - Влияние технологических факторов процесса шлифования поверхности железнодорожных рельсов на стойкость(работоспособность) при максимальной скорости лабораторной установке 7 км/ч

Из полученного уравнения регрессии 3.15 следует, что при скорости шлифовального круга 58м/с и силе резания 40Н, стойкость(работоспособность) шлифовального круга при таком режиме шлифования составит $T=7,4ч$.

Потеря стойкости абразивного инструмента связана с тем, что повышается нагрузка на абразивные зерна участвующих в процессе резания, а также с возрастающим динамическим воздействием вызываемым перемещением мобильной установки вдоль обрабатываемого участка железнодорожного пути.

Не маловажными факторами, влияющими на стойкость абразивных композиционных кругов, являются структурные характеристики

композиционных шлифовальных кругов, а именно структура и твердость абразивного инструмента.

Анализируя полученные значения стойкости композиционных шлифовальных кругов, состоящих из разнообразных структур, происходят следующие изменения. Средние значения стойкости композиционных кругов, производящих обработку поверхности катания головок рельса со структурами S_{t10} , S_{t6} , практически одинаковы и составляют 8,8 ч. Стойкость композиционного круга, имеющего структуру S_{t3} составляет 9,4 ч.

Данный результат объясняется следующим образом: эффективная работа шлифовального круга обеспечивается равномерной постоянной нагрузкой, распределенной на рабочие поверхности абразивных зерен.

Так при постоянной мощности привода шпинделя в течении всего процесса шлифования, работоспособность(стойкость) шлифовальных кругов со структурой, содержащей больший объем абразивного материала, будет выше относительно шлифовальных кругов, имеющих в своем составе меньшее количество абразивного материала, связано это с перераспределением нагрузки на рабочую поверхность круга со значительной концентрации абразивных зерен.

Также одним из важных факторов оказывающим влияние на стойкость шлифовальных кругов применяемых на операциях технологического процесса шлифования рельсов является твердость абразивного инструмента.

Учитывая полученные в ходе экспериментов корреляционные зависимости стойкости шлифовальных кругов от соответствующих характеристик твердости Q, R, T установлено, что с понижением твердости абразивных композиционных шлифовальных кругов, стойкость инструмента снижается значительно.

Однако при постоянной мощности технологического процесса шлифования поверхности катания головки железнодорожных рельсов, значения параметра стойкости композиционного шлифовального круга увеличивается с повышением твердости используемых при экспериментах

шлифовальных кругов в следствии повышенной прочности и удерживающей способности абразивных зерен в присутствии наномодификатора в структуре черепка инструмента.

Также были определены коэффициенты шлифования ($K_{ш}$ для цельнолитого и композиционного шлифовальных кругов с модифицированными абразивными наноструктурированными керамическими связками(МАНКС) при разных технологических режимах обработки (формула 3.6). Графическая интерпретация результатов коэффициентов шлифования представлена на рисунке 3.21.

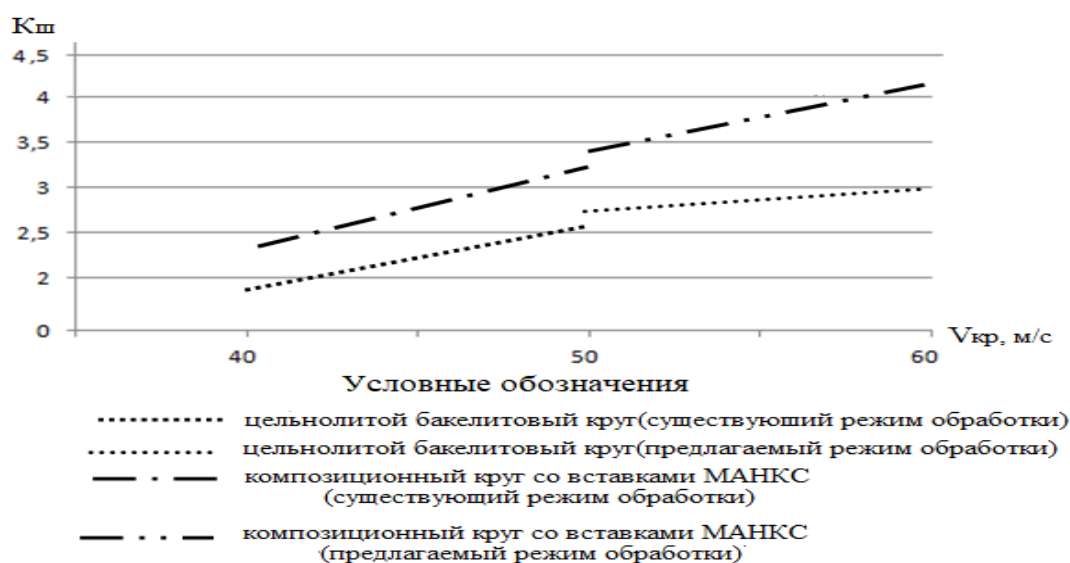


Рис. 3.21 - Коэффициент шлифования для цельнолитого и композиционного (МАНКС) шлифовальных кругов при разных режимах обработки

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

В процессе выполнения экспериментальных исследований направленных на выявление факторов, влияющих на работоспособность и стойкость композиционных шлифовальных кругов, применяемых на операциях шлифования, удалось получить корреляционные зависимости с

помощью, которых можно регулировать стойкость используемых шлифовальных кругов и обеспечить наиболее производительный процесс обработки поверхности катания головок рельсов.

3.4 Выводы по главе

1. 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, последующие выпаривание спирта. Применение данной технологии диспергирования обеспечивает размельчение исходных глобул рассматриваемого наномодификатора до показателей 0,7 мкм, что в 432 раза меньше относительно чистых не прошедших обработку глобул наночастиц.

2. 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.

3. Определены математические зависимости изменения геометрических значений частиц МУНТ «Таунит» от продолжительности ультразвуковой обработки, происходящей в различных средах(носителях).

4. Установлено, оптимальной дозировкой наномодификатора в составе керамического сегмента шлифовального круга является 0,005 - 0,001 мас. % от расхода натриевого стекла. При наличии в составе керамической шихты

наномодификатора в количестве 0,005 %, увеличивается предел прочности при растяжении в 1,62(12,7 МПа) раза по сравнению с базовым составом, показатель прочности при испытании контрольных образцов на изгиб достигает значения 25,4 МПа, что на 25,6 % больше по сравнению с базовой 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.

5. Установлено, при зернистости F14 твердости композиционного шлифовального круга 1,1мм(Т) и плотной структуре $S_t3(60\%$ абразива), достигается максимальное снятие припуска $t_{p,c}=28\text{мкм}$; стойкость(работоспособность) шлифовального круга при этом составляет $T=9,4\text{ч}$.

6. Определено что при скорости шлифовального круга 58м/с и силе резания 40Н, достигается максимальный съем припуска на обработку $t_{p,c}=24\text{мкм}$; стойкость(работоспособность) шлифовального круга при этом составит $T=7,4\text{ч}$.

7. Определены коэффициенты шлифования ($K_{ш}$ для цельнолитого и композиционного 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.

8. В ходе исследования 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 позиции уменьшения технологического времени (повышение производительности шлифования).

В этих обстоятельствах наиболее эффективным абразивным инструментом оказался шлифовальный композиционный круг с характеристиками сегментов на рабочей поверхности: зернистостью - F14, плотностью структуры(S_t3), твердостью - T(Z_h).

ГЛАВА 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ И ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ РЕЛЬСОВ В ПРОЦЕССЕ ШЛИФОВАНИЯ

Для исследования термодинамического состояния композиционных шлифовальных кругов и обработанной поверхности рельсов при установленных ранее эффективных режимах обработки использовался метод конечно-элементного анализа программного комплекса Ansys.

Моделирование температурного процесса, возникающего между композиционным шлифовальным кругом и рабочей поверхности головок железнодорожных рельсов в результате шлифования состоит из следующих этапов:

- создание геометрической модели рассматриваемого процесса;
- создание конечно-элементной модели;
- наложение граничных условий и тепловых нагрузок присущих рассматриваемому процессу;
- проведение расчетов и анализ полученных в ходе компьютерного моделирования результатов экспериментов.

Для построения компьютерной модели используется пакет Ansys/Workbench общий вид окна интерфейса, которого приведен на рисунке 4.1.

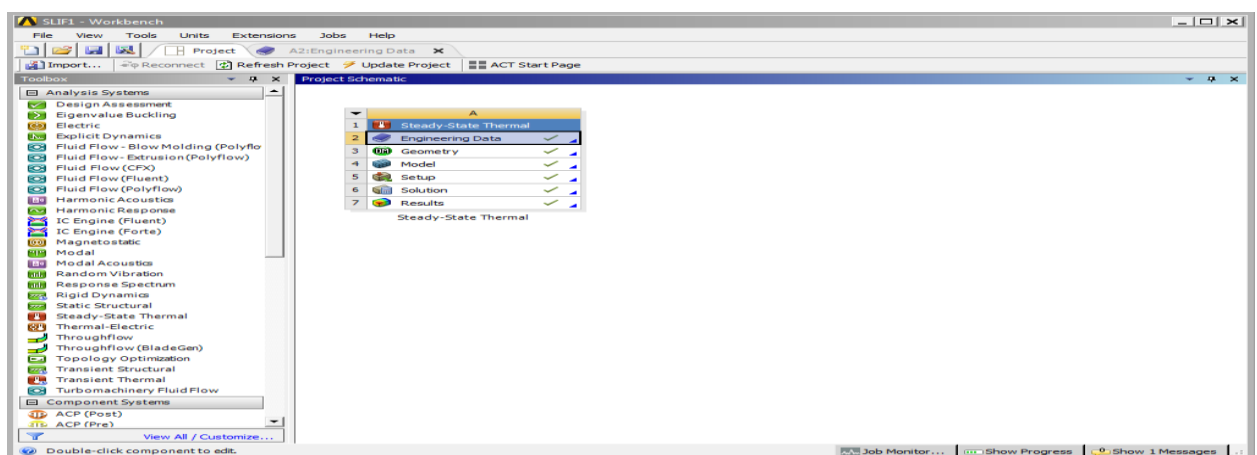


Рис 4.1. - Общий вид интерфейса Ansys/Workbench с модулем термического анализа

4.1. Последовательность компьютерного моделирования температурного процесса в программном комплексе Ansys/Workbench

создание геометрической модели

Создание геометрической модели рассматриваемого нами технологического процесса обработки рабочей поверхности головок железнодорожных рельсов происходит в модуле **Design Modeller**. Запуск модуля происходит по нажатию правой кнопки мыши на строке **Geometry** и выбором команды **Design Modeller** в контекстном меню (рисунке 4.2).

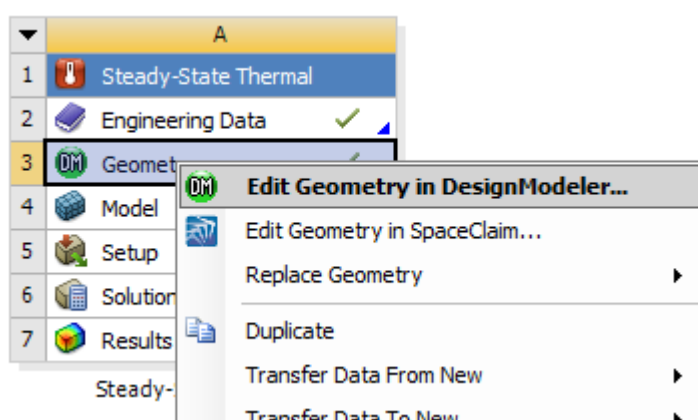


Рис. 4.2 - Команды запуска модуля по созданию геометрии модели

Общий вид интерфейса окна геометрического моделировщика показан на рисунке 4.3. После запуска необходимо настроить размерности используемых величин.

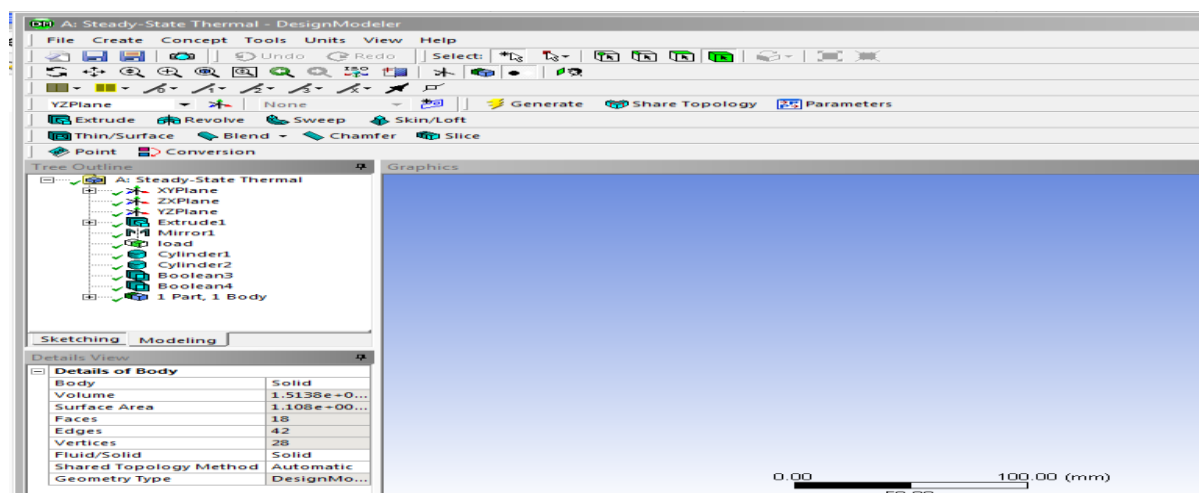


Рис. 4.3 - Общий вид окна геометрического моделировщика

Геометрия рельса создается путем протяжки контура рельса вдоль перпендикулярной образующей. Располагаем контур рельса в плоскости ХУ, а образующую – вдоль оси Z. В соответствии с ГОСТ Р 51685-2013 «Рельсы железнодорожные. Общие технические условия» [38], профиль рельса типа Р65 представляет собой комбинацию 6-ти парных окружностей с радиусами 500, 80 и 15 мм соответственно (рисунок 4.4).

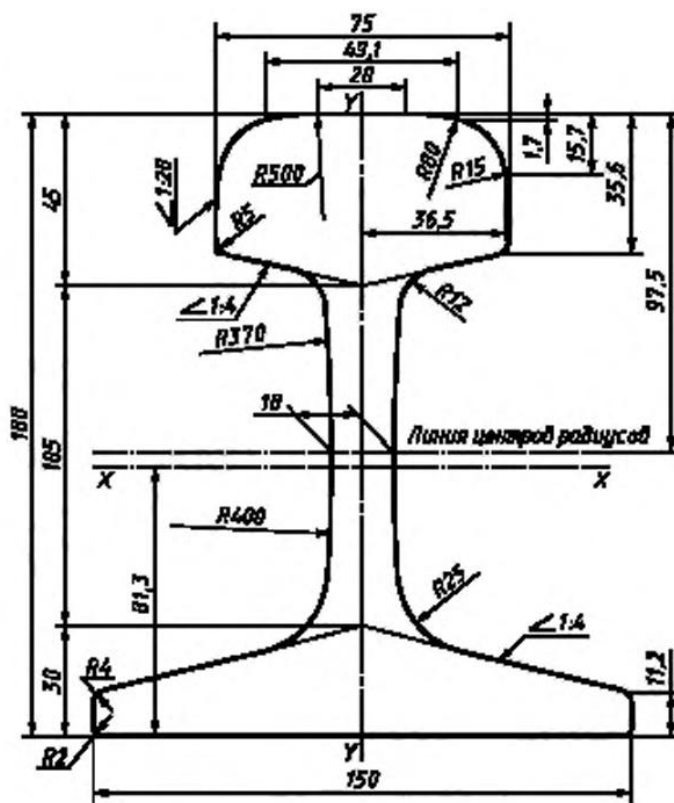


Рис. 4.4 - Поперечный профиль рельса типа Р65

В процессе создания геометрической модели рельса типа Р65 исходим из предположения, что нагрев поверхностного слоя между шлифовальным кругом и обработанной поверхностью головки рельса происходит локальными участками незначительной глубины [35, 106], поэтому создавать полный поперечный профиль геометрии рассматриваемого рельса нецелесообразно. На рисунке 4.5 показан готовый контур рельса с размерами в соответствии с действующим ГОСТом.

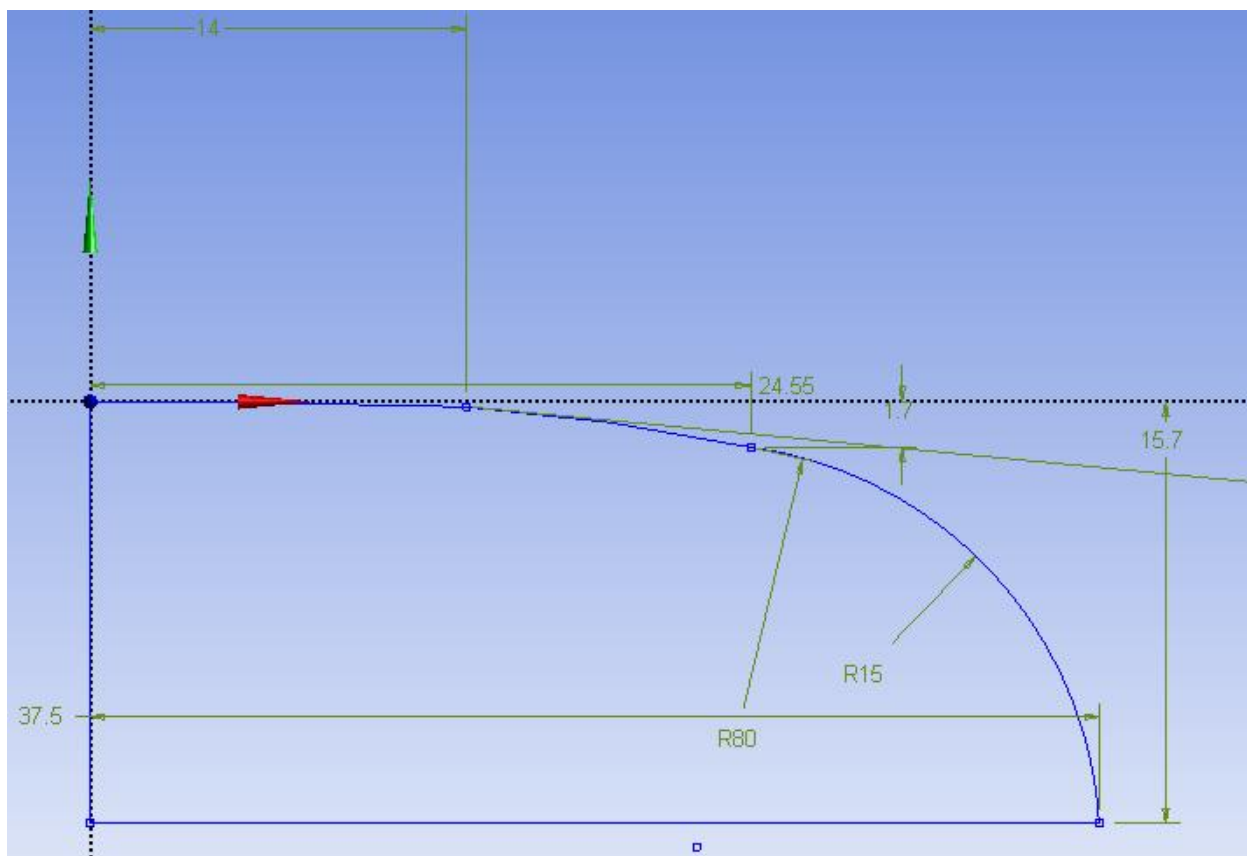


Рис 4.5 - Формируемый контур головки рельса Р65 с геометрическими размерами

Результат создания поперечного профиля рельсов показан на рисунке 4.6.

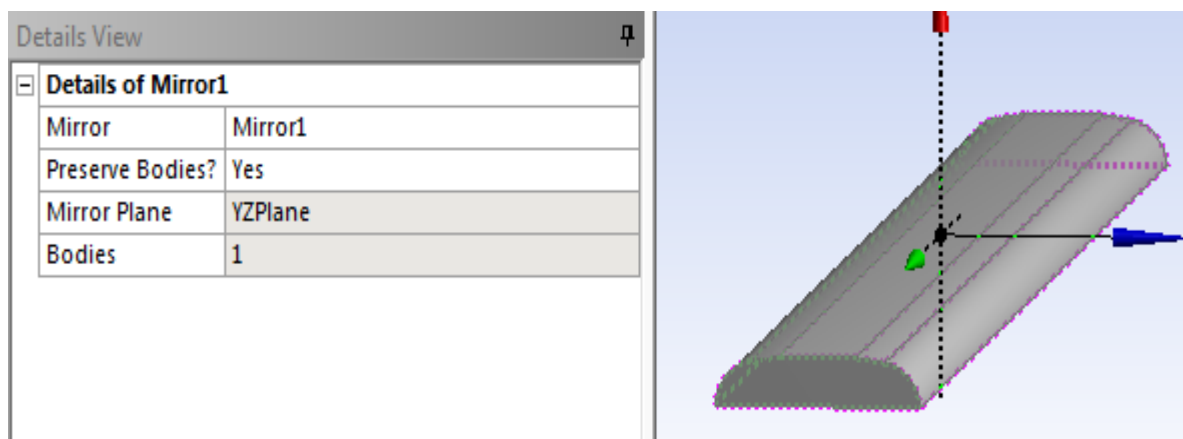


Рис. 4.6 - Сгенерированный поперечный профиль головки железнодорожных рельсов Р65

После завершения создания геометрической модели рельса необходимо выделить области приложения тепловых нагрузок. Для этого необходимо создать геометрию шлифовального круга и наложить ее на рабочую поверхность рельса.

Геометрическую модель шлифовального круга не обязательно моделировать полностью, так как в генерации тепла участвует только нижняя рабочая поверхность абразивного инструмента. Шлифовальный круг моделируется двумя соосными цилиндрами, с последующим вырезанием внутренней части. Необходимые размеры при создании геометрической модели цилиндра (шлифовального круга) указаны на рисунке 4.7.

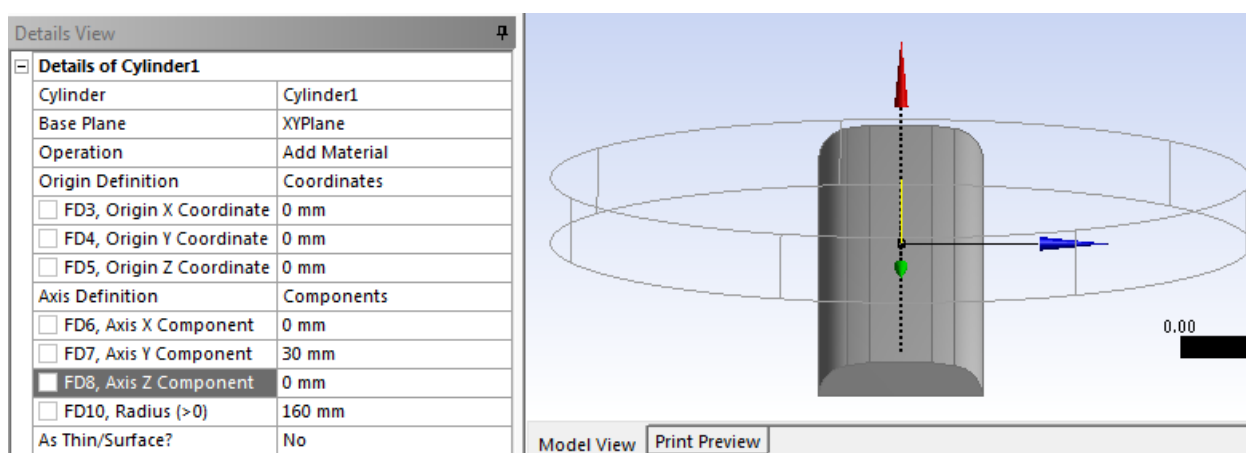


Рис. 4.7 - Интерфейс модуля размеров внешнего цилиндра (шлифовального круга)

После задания всех размеров необходимо сгенерировать окончательно созданный цилиндр. Аналогичным образом создается внутренний цилиндр. Параметры и размеры внутреннего цилиндра показаны на рисунке 4.8.

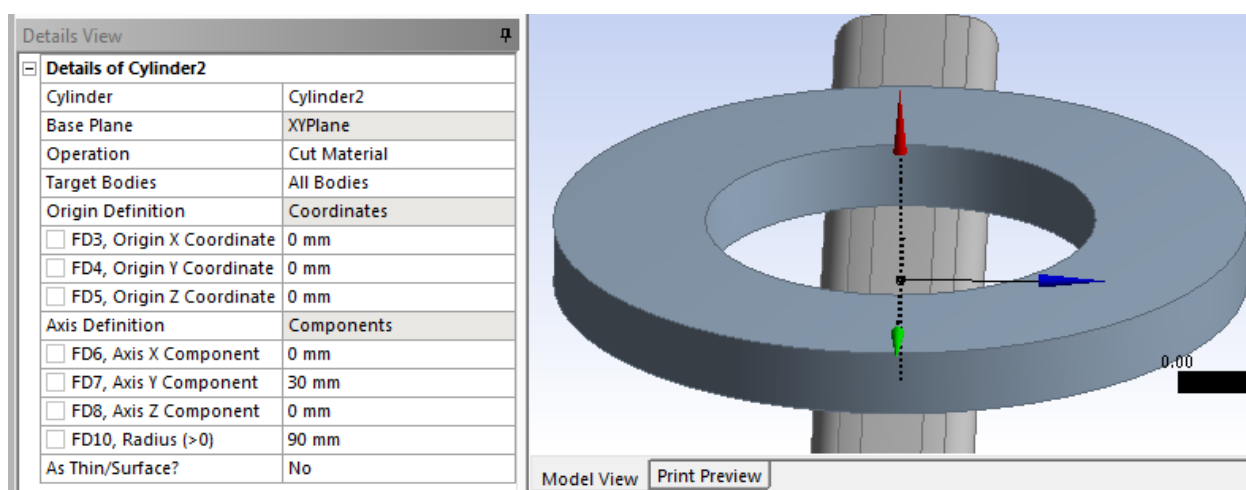


Рис 4.8 - Интерфейс модуля размеров внутреннего цилиндра

После завершения формирования шлифовального круга его необходимо правильно позиционировать. Позиционирование заключается в перемещении центра круга и его поворота на заданные величины. Поскольку

профиль рельса имеет кусочно-гладкую образующую, описать позиционирование круга одной аналитической формулой невозможно, поэтому необходимо создать операции перемещения и поворота тела.

На рисунке 4.9 показаны параметры для смещения шлифовального круга для обработки центральной части дорожки катания рельса на глубину 0,1 мм.

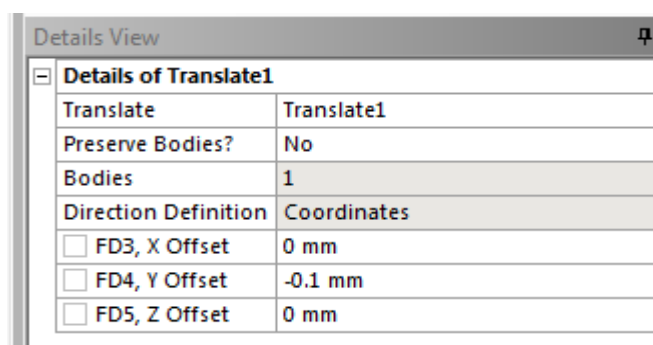


Рис 4.9 - Интерфейс модуля параметров смещения шлифовального круга для обработки центральной части поверхности катания рельса типа Р65

В данной работе решается задача ликвидации продольных неровностей, возникающих на верхней рабочей поверхности катания рельсов, за счет использования технологической операции шлифования, поэтому наклон шлифовального круга не приводится.

Заключительной частью создания геометрии рассматриваемого процесса шлифования рельсов является получение отпечатков шлифовального круга на поверхности катания рельса. В результате этой операции шлифовальный круг удаляется, а на верхней части поверхности катания рельса формируются два отпечатка от работы шлифовального круга представленного на рисунке 4.10.

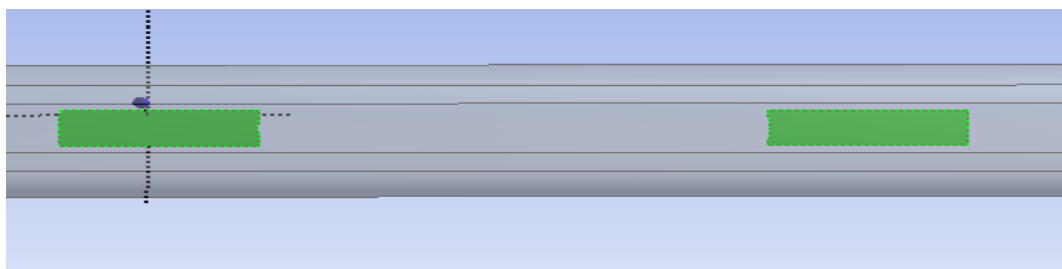


Рис. 4.10 - Формирование отпечатков шлифовального круга на поверхности рельсов

Ширину полученных отпечатков можно контролировать с помощью инструмента Distance Finder. В результате на экране отразится расстояние между контурами от отпечатков шлифовального круга рисунке 4.11.

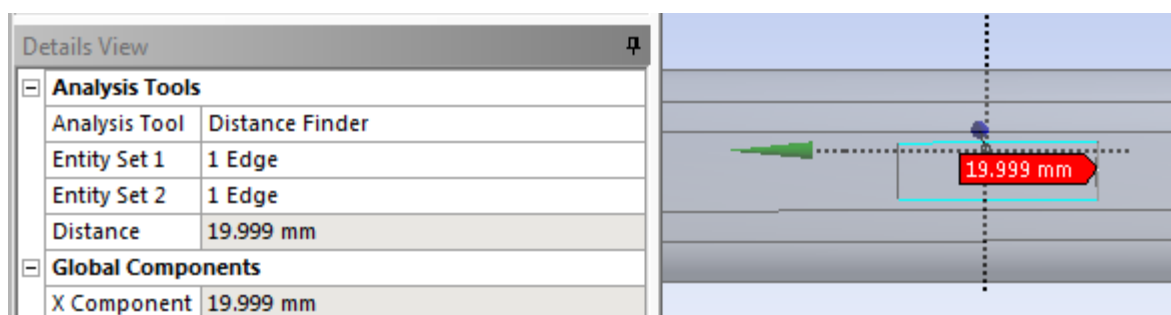


Рис. 4.11 - Фиксируемые размеры между контурами от отпечатков шлифовального круга

На этом создание геометрической модели рассматриваемого технологического процесса завершается, модель сохраняется.

4.1.1 Последовательность компьютерного моделирования температурного процесса в программном комплексе Ansys/Workbench создание конечно–элементной модели

Создание конечно элементной модели подразумевает наложение конечно-элементной сетки на созданную геометрическую модель рассматриваемого процесса.

Распространение температуры изотропично, то есть одинаково по всем направлениям, поэтому при построении сетки можно использовать обыкновенные тетраэдральные элементы. Исключение составляют области приложения тепловых нагрузок и область обмена теплом рельса с окружающей средой. В этих областях существует выраженный градиент температуры, поэтому в них используется слоистая сетка. Инструменты наложения расчетной сетки располагаются в модуле Model.

Первым шагом к созданию сетки является задание глобальных параметров разбиения. Необходимо выделить пункт Mesh в дереве модели и в окне Detail of Mesh задать размер элемента 4 мм, кроме того, необходимо для параметров Span Angle задать значение Fine (рисунок 4.12).

Details of "Mesh"	
[-] Display	
Display Style	Body Color
[-] Defaults	
Physics Preference	Mechanical
☐ Relevance	100
Element Order	Program Controlled
[-] Sizing	
Size Function	Adaptive
Relevance Center	Fine
☐ Element Size	4.0 mm
Mesh Defeaturing	Yes
☐ Defeature Size	Default
Transition	Slow
Initial Size Seed	Assembly
Span Angle Center	Fine
Bounding Box Diagonal	644.570 mm

Рис 4.12 - Глобальные параметры сетки

Для большей точности результатов компьютерного моделирования необходимо измельчить сетку в местах нагрева. В окне Details of Sizing, в пункте Geometry необходимо указать 8 линий, которые являются границами для параметра Type, задать значение Element Size и в строке Element Size задать значение 2 мм (рисунок 4.13).

Details of "Edge Sizing" - Sizing	
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	8 Edges
[-] Definition	
Suppressed	No
Type	Element Size
☐ Element Size	2.0 mm
[-] Advanced	
Behavior	Soft
Bias Type	No Bias

Рис. 4.13 - Глобальные параметры сетки в местах нагрева

С помощью данного приема задан уменьшенный размер элементов для границ приложения тепловых нагрузок между шлифовальным кругом и верхней поверхностью катания головок железнодорожных рельсов. После чего необходимо задать слоистость сетки на поверхностях теплообмена. Указываются все верхние грани рельса и задается максимальное количество

слоев 15 (параметр maximum Layers), после этого необходимо сгенерировать сетку. Фрагмент сгенерированной сетки показан на рисунке 4.14.

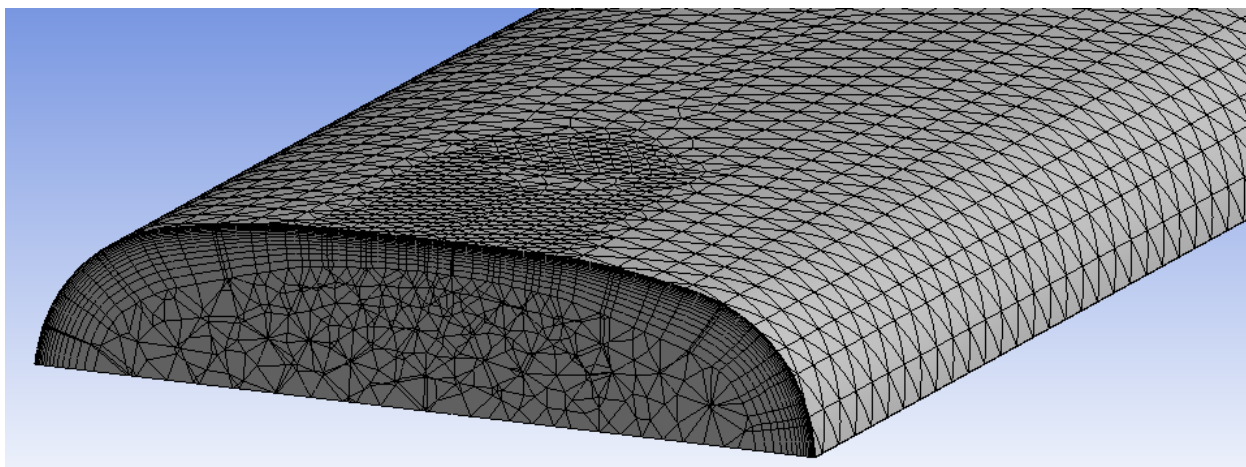


Рис. 4.14 - Фрагмент сгенерированной сетки на верхней части поверхности катания головок железнодорожных рельсов типа Р65

На этом построение конечно-элементной модели рассматриваемого процесса завершается.

4.1.2 Последовательность компьютерного моделирования температурного процесса в программном комплексе Ansys/Workbench и формирование граничных условий

В процессе исследования технологического процесса шлифования верхней части поверхности катания головок железнодорожных рельсов абразивным инструментом устанавливаются следующие граничные условия:

- на формируемых отпечатках шлифовального круга на верхней части поверхности катания головок железнодорожных рельсов задается тепловая мощность;
- на границах участков, контактирующих с воздухом, задается коэффициент конвекции;
- на поверхностях являющимися продолжением рельса задается температура, исходя из предположения что рельс на удалении от места нагрева сохраняет температуру окружающей среды.

При формировании граничных условий для назначения тепловой мощности формируемых отпечатков шлифовального круга на верхней части

поверхности катания головок железнодорожных рельсов необходимо выбрать параметр TabularData. В правом нижнем углу экрана появится таблица, в которую необходимо внести следующие характеристики, представленные на рисунке 4.15.

Tabular Data			
	Steps	Time [s]	☒ Heat Flow [W]
1	1	0.	10000
2	1	0.1	10000
3	2	0.2	0.
4	3	1.1	0.
5	3	2.2	= 0.
*			

Рис. 4.15 - Характеристики тепловой мощности формируемых отпечатков шлифовального круга на верхней части поверхности катания головок железнодорожных рельсов

Физический смысл данных, представленных в таблице (рисунка 4.15), отражает факт нагрева участков мощностью 10 кВт в течении 0,1 с. Затем в течении 0,1 с тепловая мощность падает до нуля. После в течении 2-х секунд остается нулевой.

При формировании граничных условий по заданию конвекционного теплообмена между рельсом и окружающей средой необходимо выполнить команду Insert – Convection, затем в окне Details of Convection в строке Geometry указать все поверхности на верхней части рельса, а в строке Film Coefficient задать значение коэффициента конвекции $8,7 \cdot 10^{-6}$ Вт/мм² (см. рисунок 4.16).

Details of "Convection"	
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	5 Faces
[-] Definition	
Type	Convection
☐ Film Coefficient	$8.7e-006$ W/mm ² ·°C...
☐ Ambient Temperature	22. °C (step appli...
Convection Matrix	Program Controlled
Suppressed	No

Рис 4.16 - Характеристики конвекционного теплообмена между рельсом и окружающей средой

Создание граничных условий на торцевых и нижних поверхностях профиля головки рельса, являющимися продолжением рельса, задается в пунктах Transient Termal с выполнением команд Insert – Temperature, затем в окне Details of Temperature, в строке Geometry указываем три оставшиеся

поверхности: торцы и нижнюю часть геометрии, а в строке Magnitude указываем стационарное значение 22 °С.

Следующим этапом моделирования процесса шлифования рельсов является этап формирования и анализа полученных результатов в ходе проведенного компьютерного моделирования.

4.1.3 Формирование и анализ полученных результатов процесса шлифования поверхности катания железнодорожных рельсов

После того как все нагрузки заданы осуществляется запуск модели на расчет.

По завершению расчета необходимо сформировать набор выходных данных для анализа. Необходимо выбрать в контекстном меню команду Insert – Termal – Temperature. Для обновления результатов без повторных расчетов нужно вызывается контекстное меню и выбирается команда Evaluate All Results (см. рисунок 4.17).

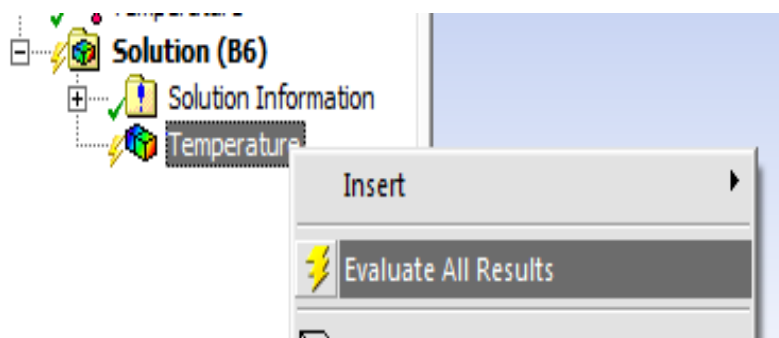


Рис. 4.17 - Контекстное меню команды Evaluate All Results

После этого выполняется команда в строке Temperature и происходит вывод результатов на экран компьютера с распределением температуры на обрабатываемой верхней части поверхности катания головки рельса (см. рисунок 4.18).

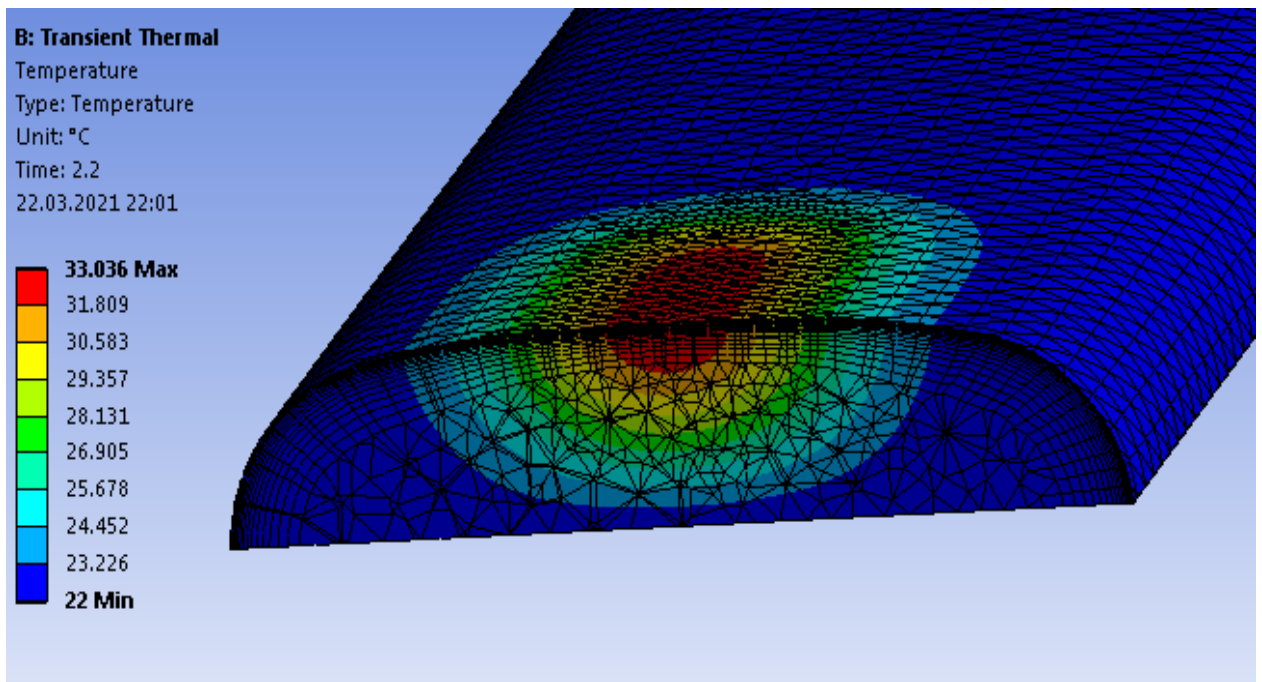


Рис. 4.18 - Пример результатов компьютерного моделирования с распределением температуры на обрабатываемой верхней части поверхности катания головки железнодорожных рельсов

Использование метода конечно-элементного анализа пакета Ansys/Workbench для исследований температурного потока на поверхностях обработанного слоя рельса и температурного состояния рабочей поверхности абразивного инструмента, позволяют автору настоящего диссертационного исследования без больших трудоемких, экономических и временных потерь производить компьютерное моделирование, для нахождения эффективных параметров процесса шлифования железнодорожных рельсов, находящихся на перегонах, станционных, приемоотправочных и прочих путях общего или необщего пользования.

4.2 Исследование и моделирование термодинамического состояния композиционных шлифовальных кругов и обработанной поверхности катания головок рельсов

В программном комплексе Ansys/Workbench моделируется процесс механической обработки верхней части поверхности катания головки железнодорожных рельсов, осуществляемый при следующих режимах резания:

- скорость рельсошлифовальной мобильной установки принимается равной 7 км/ч, ($V_{\text{лаб.уст}}=1,94$ м/с);
- частота вращения шлифовальных кругов (существующего и предлагаемого) составляет 4600 об/мин ($V_{\text{кр}}=58$ м/с);
- ширина дорожки шлифования по верхней части поверхности катания головок железнодорожных рельсов составляет 20 мм;
- геометрические размеры абразивных кругов: наружный диаметр круга 250 мм, внутренний диаметр 150 мм;
- мощность, подаваемая на шлифовальную головку 15-25 кВт.

Для мощности подаваемую на шлифовальную головку справедлива формула 4.1.

$$W = M_{\text{тр}} \omega = \mu R' N \omega, \quad (4.1)$$

где: $M_{\text{тр}}$ - момент от силы трения;

ω - угловая скорость шлифовального круга;

N - нормальная сила прижатия шлифовальной головки;

R' - эквивалентный радиус, на котором приложена сила N .

Рассмотрим участок дорожки шлифования, который контактирует со шлифовальным кругом (существующий вариант), изготовленным из абразивных частиц на бакелитовой связке. Одна сторона у данного участка равна длине дуги шлифования, а другая разнице наружного и внутреннего радиусов шлифовального круга (рисунок 4.19).

Поскольку считается, что длина дорожки шлифования постоянна, на удалении от центра шлифовального круга, фигура будет близка к прямоугольнику. Выделим на этом участке элементарный элемент площадью $drdL$, на который действует элементарная нормальная сила N^* .

Тогда момент трения от этой силы относительно центра шлифовального круга будет равен:

$$dM_{mp} = \mu N^* r dr dL \quad (4.2)$$

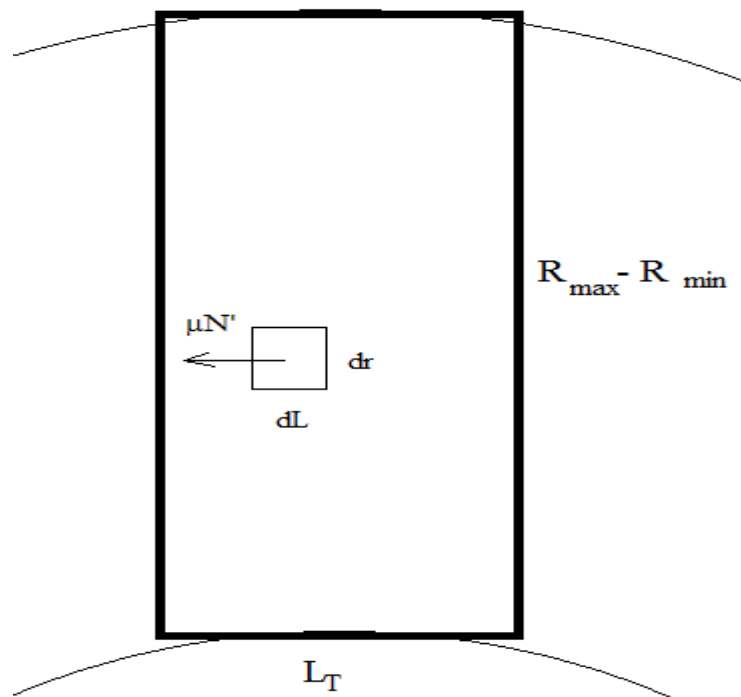


Рис. 4.19 - Схема к определению термодинамического состояния верхней части поверхности катания головки железнодорожных рельсов при шлифовании

Полный момент трения вычисляется по формуле 4.3

$$\begin{aligned} M_{mp} &= \int_0^{L_T} dL \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} \mu N^* r dr = \mu L_T N^* \frac{R_{\max}^2 - R_{\min}^2}{2} = \\ &= \frac{R_{\max}^2 - R_{\min}^2}{2} = \frac{(R_{\max} + R_{\min})(R_{\max} - R_{\min})}{2} \end{aligned} \quad (4.3)$$

Произведение $L_T N^* (R_{\max} - R_{\min}) = N$ - полная нормальная сила, действующая на дорожку шлифования.

Выражение $\frac{(R_{\max} + R_{\min})}{2} = R'$ - эквивалентный радиус, на который эквивалентная сила трения должна быть отодвинута от центра шлифовального круга.

Подставляя выражение для эквивалентного радиуса в (4.1), получаем:

$$N = \frac{W}{\mu \omega R'} = \frac{20000}{0,33 \cdot 419 \cdot 0,125} = 1157 H \approx 116 \text{ кГ}.$$

Определим разницу температурного состояния на верхней части поверхности катания головки железнодорожных рельсов при использовании шлифовального круга, выполненного по традиционной технологии изготовления на бакелитовой связке, рабочая поверхность которого представляет цельнолитую абразивную поверхность и композиционного шлифовального круга с модифицированными абразивными вставками на наноструктурированной керамической связке (МАНКС).

При использовании цельного абразивного шлифовального круга коэффициент трения между рельсом и кругом равен 0,33, что соответствует принятой мощности в 20 кВт.

В свою очередь с использованием композиционного шлифовального круга с наноструктурированными керамическими вставками (МАНКС) коэффициент трения циклически меняется в интервале от 0,33 до 0,6, поэтому введем эквивалентный коэффициент трения, который дает ту же мощность, что и два реальных коэффициента.

По результатам теоретических исследований, проведенных автором во 2 главе диссертации, полная длина дуги шлифования участка рабочей поверхности композиционного шлифовального круга в комбинации «бакелит + керамическая вставка МАНКС» на 65% состоящей из бакелитовой части и

35% нанокерамики. Поэтому значение эквивалентного коэффициента трения находится по формуле:

$$\mu_{\text{э}} = 0,35 * 0,6 + 0,65 * 0,33 = 0,424 \quad (4.4)$$

Этому коэффициенту соответствует значение необходимой мощности:

$$W = \mu_{\text{э}} R' N \omega = 26 \text{ кВт}$$

В качестве геометрической модели рассматриваем участок головки рельса равный по длине двум диаметрам шлифовального круга с целью исключения краевых эффектов. Рассмотрение всего поперечного сечения рельса нецелесообразно, поскольку в каждом сечении рельса тепловой поток действует непродолжительное время и сечение не успевает прогреться полностью.

По данным [98], в деталь уходит от 60 % до 85 % генерируемого при шлифовании тепла, поэтому будем считать, что на поверхности дорожки шлифования возникает тепловой поток 17 кВт (цельный бакелитовый шлифовальный круг) и 22 кВт для модифицированного шлифовального круга, который равномерно распределяется по всей площади контакта шлифовального круга и верхней части поверхности катания головки рельса. Поскольку шлифовальный круг контактирует с рельсом двумя областями (передней и задней), то на каждую часть будет подаваться половина общего теплового потока.

На остальной поверхности рельсов задается коэффициент конвективного теплообмена между рельсом и воздухом $8 \cdot 10^7$ Вт/мм² при температуре окружающей среды в диапазоне от -10 °С до +50 °С с шагом 10 °С а также в точке 22 °С.

Ниже представлен расчет для температуры окружающего воздуха 22 °С. На нижней и торцевых поверхностях геометрической модели рельса задается постоянная температура 22 °С, данное граничное условие имеет физический смысл, так как температурные возмущения возникающие в

процессе резания не проникают глубоко в рельс, а повышение температуры за счет притока тепла носит кратковременный локальный характер.

С каждым поперечным сечением рельса шлифовальный круг взаимодействует дважды, передней и задней рабочими поверхностями.

Для правильного вычисления температуры рельса необходимо учесть время, в течении которого рассматриваемое сечение рельса находится внутри шлифовального круга без воздействия теплового потока.

Длина передней и задней рабочих поверхностей шлифовального круга равна половине разности диаметров

$$\ell_d = \frac{250-150}{2} = 50 \text{ мм.}$$

При скорости рельсошлифовальной мобильной установки 7 км/ч или 1,94 м/с сечение рельса подвергается воздействию теплового потока в течение 0,05 с. Затем тепловая нагрузка снимается на то время, пока рассматриваемое сечение находится внутри шлифовального круга. За этот период шлифовальный круг перемещается на величину внутреннего диаметра, следовательно, это время (релаксации) равно:

$$t_r = \frac{d_i}{v_t} = 0,13 \text{ с.}$$

где: v_t - скорость рельсошлифовальной мобильной установки.

Далее тепловая нагрузка вновь прикладывается к рельсу на время 0,05с.

По окончании этого процесса анализируется остаточная температура рельса.

График тепловой нагрузки на участок дорожки шлифования представлен на рисунке 4.20.

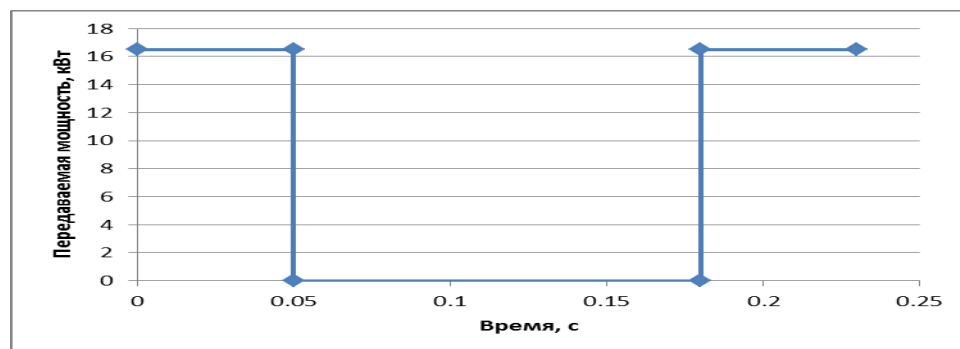


Рис. 4.20 - Тепловая нагрузка на участке дорожки шлифования формируемой цельнолитым бакелитовым шлифовальным кругом

Результаты расчетов для случаев цельнолитого (традиционного) и комбинированного (предлагаемого) шлифовальных кругов на верхней части поверхности катания головки рельса показаны на рисунках 4.21 - 4.24.

На графике (см. рисунок 4.21) показано изменение максимальной и минимальной температуры при обработке традиционным шлифовальным кругом в расчетной области за время вычислений.

Наблюдается два пика максимальной температуры, соответствующих прохождению передней и задней части рабочей поверхности шлифовального круга. После прохождения шлифовального круга максимальная температура составила 170 °С.

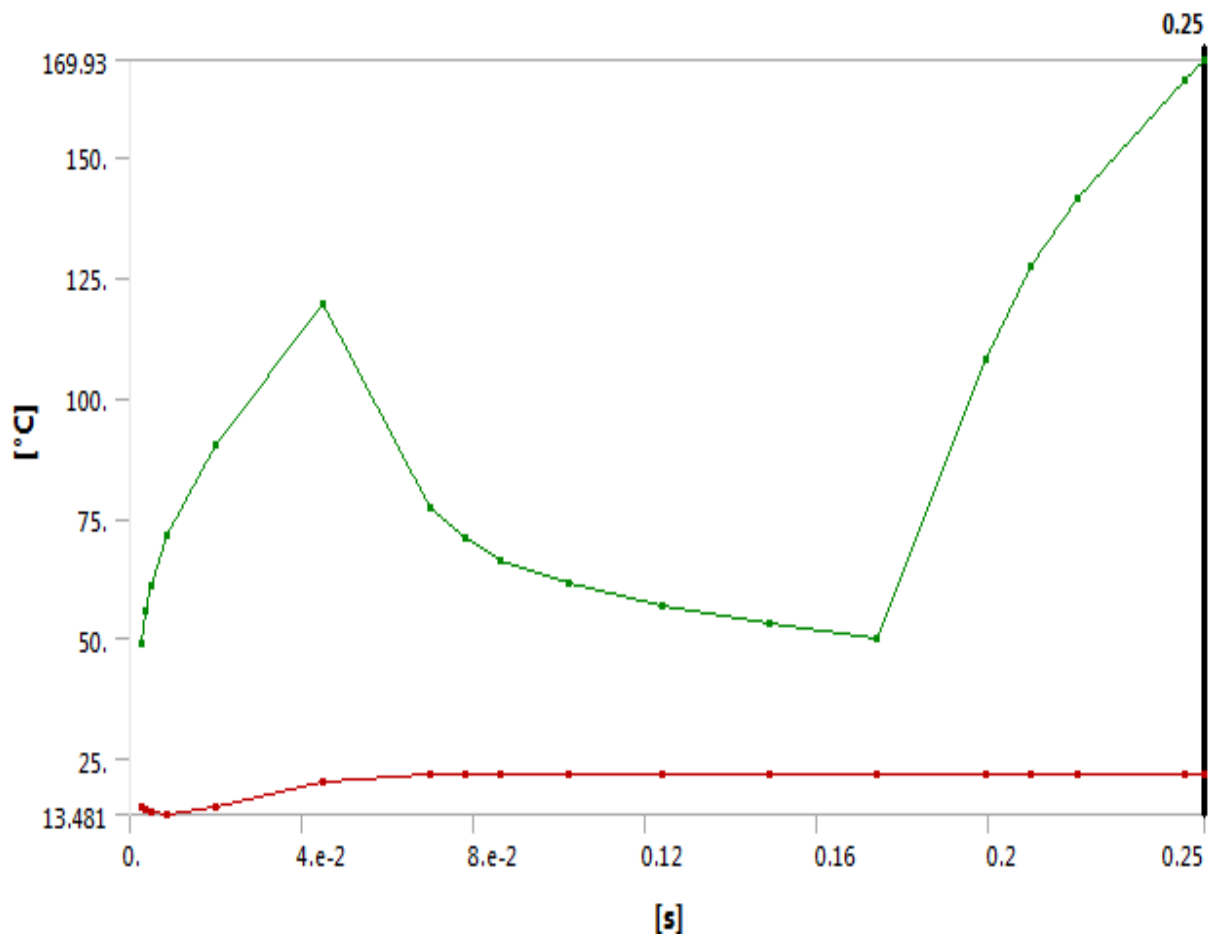


Рис. 4.21 - Изменение максимальной и минимальной температур в рельсе в процессе шлифования для цельнолитого бакелитового круга

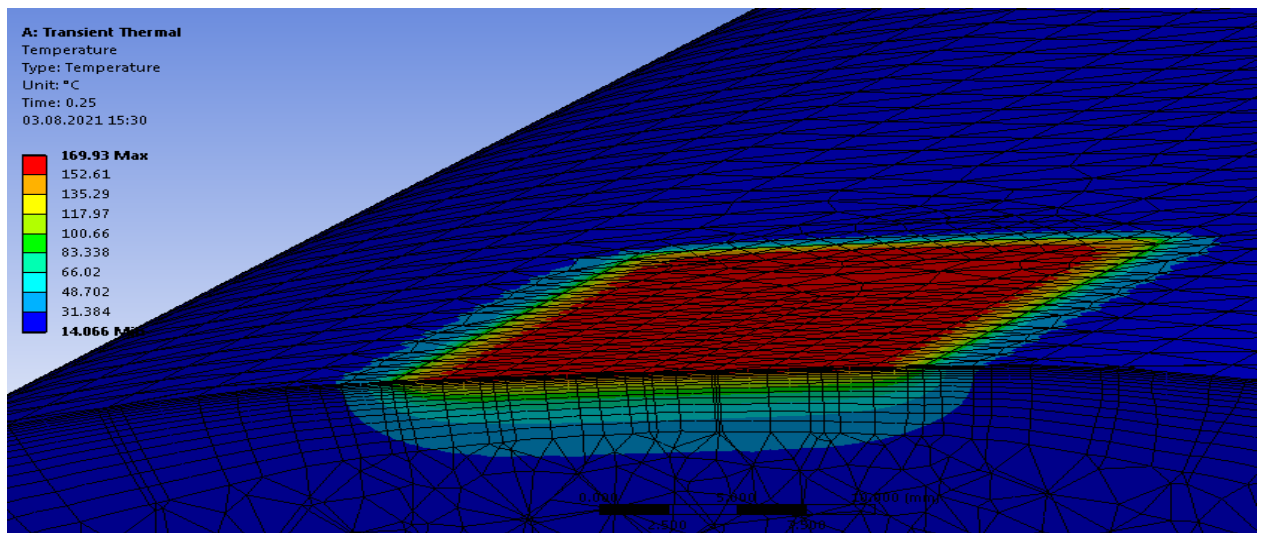


Рис. 4.22 - Распределение температуры на верхней части поверхности катания головки рельса после прохождения цельнолитого бакелитового круга

На рисунке 4.22 показано распределение температуры на верхней части поверхности катания головки рельса после прохождения шлифовального цельнолитого бакелитового круга. Видно, что максимум температуры

находится на верхней части поверхности катания головок рельса, что соответствует физике процесса.

В процессе моделирования происходит нагрев локальной области верхней части поверхности катания головки рельса, связанного с кратковременным тепловым воздействием (рисунок 4.23). Поверхностный слой рельса прогревается на глубину порядка 3,5 мм.

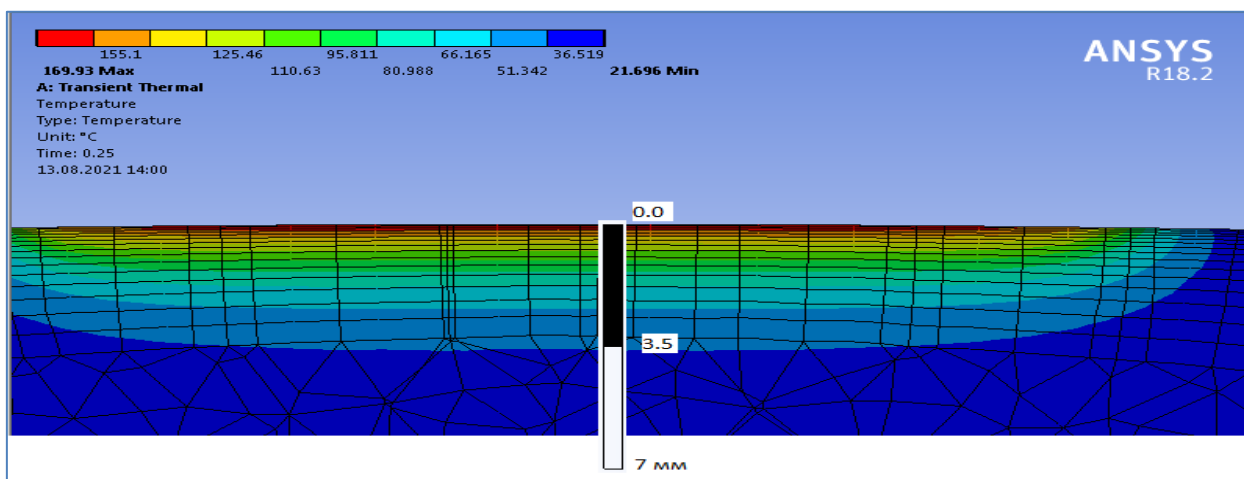


Рис 4.23 - Глубина прогрева верхнего поверхностного слоя головки рельса при обработке цельнолитым бакелитовым шлифовальным кругом

Похожая картина получается при анализе данных, полученных в ходе компьютерного моделирования, при исследовании комбинированного композиционного шлифовального круга. График изменения максимальной и минимальной температуры в процессе обработки поверхности катания головки рельса показан на рисунке 4.24.

Распределение температуры на верхней части поверхности катания головки рельса по окончанию процесса шлифования отображено на рисунке 4.25.

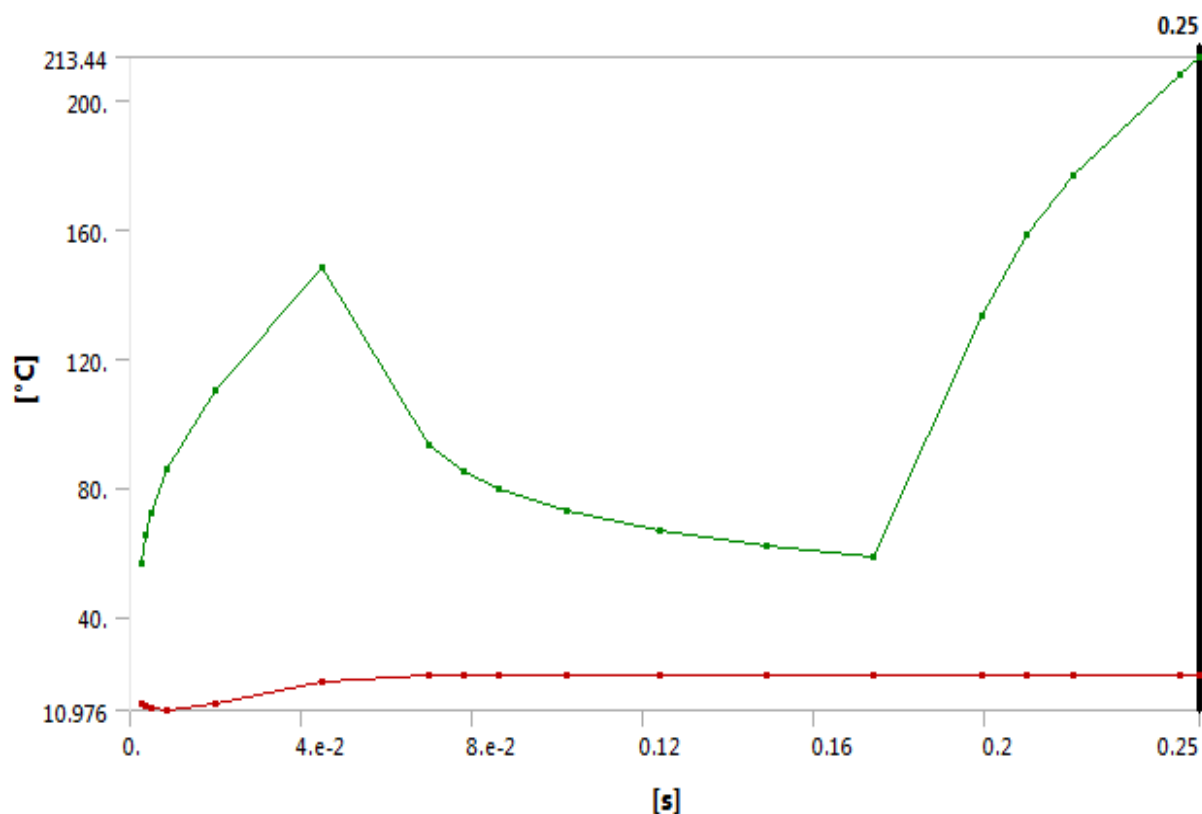


Рис. 4.24. - Изменение максимальной и минимальной температур в рельсе в процессе шлифования композиционным шлифовальным кругом со вставками МАНКС

На графике (см. рисунок 4.24) показано изменение максимальной и минимальной температур при обработке композиционным шлифовальным кругом в расчетной области за время вычислений. При анализе полученных данных наблюдается два пика максимальной температуры, соответствующих прохождению передней и задней рабочих поверхностей композиционного шлифовального круга. После прохождения шлифовального круга максимальная температура на поверхности катания головки рельса составила 213 °С.

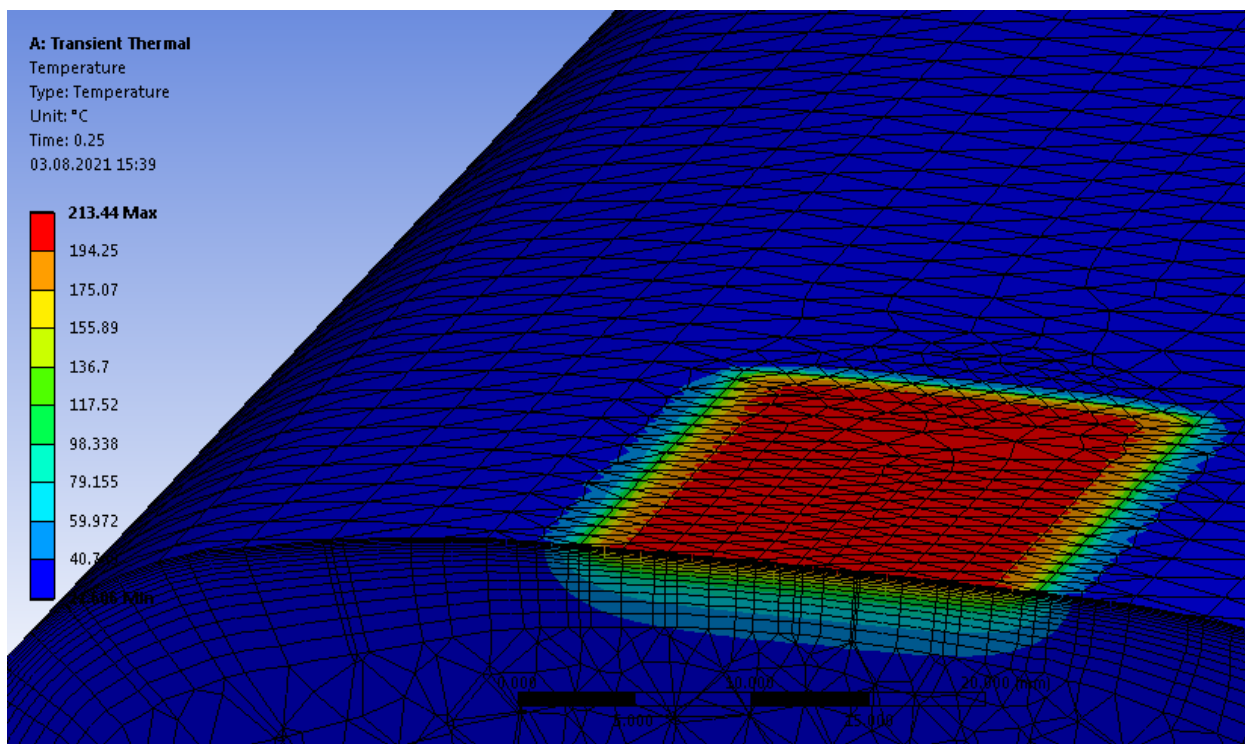


Рис. 4.25 - Распределение температуры на верхней части поверхности катания головки рельса после прохождения композиционным шлифовальным кругом со вставками МАНКС

Анализируя характер распределения температурных градиентов на верхней части поверхности катания головки рельса, после прохождения шлифовального композиционного круга, представленных на рисунке 4.25 заметно, что максимальные значения температур находятся также как и в случае с применением традиционного бакелитового шлифовального круга на верхней части поверхности катания головки рельса, что соответствует физике процесса.

Участвующие в процессе резания абразивные зерна композиционного шлифовального круга являются инициаторами по нагреву локальной области головки рельса, связанного с кратковременным тепловым воздействием. Однако керамические сегменты присутствующие на рабочей поверхности шлифовального круга препятствуют проникновению тепловых потоков в глубь сечения абразивного инструмента.

В процессе моделирования происходит нагрев локальной области верхней части поверхности катания головки рельса, связанного с

кратковременным тепловым воздействием (рисунок 4.26). Поверхностный слой рельса прогревается на глубину около 3,5 мм.

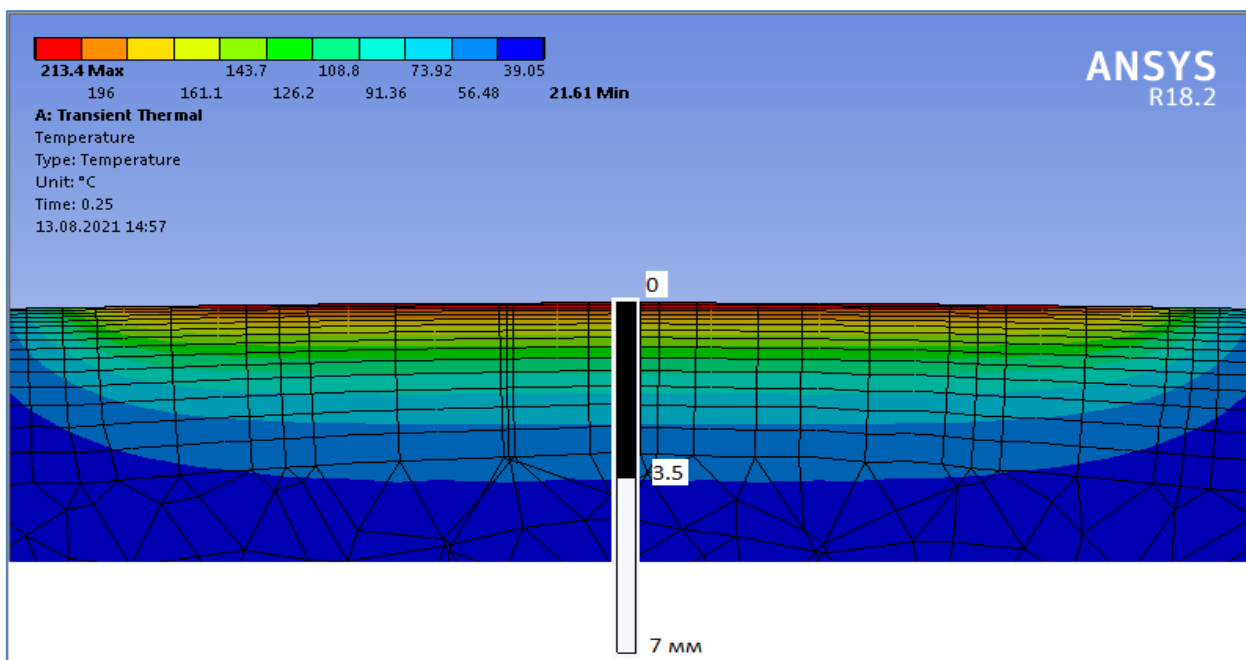


Рис. 4.26 - Глубина прогрева верхнего поверхностного слоя головки рельса при обработке композиционным шлифовальным кругом со вставками МАНКС

Подводя промежуточное сравнение двух вариантов обработки верхней части рабочей поверхности катания железнодорожных рельсов мобильной рельсошлифовальной установкой, с использованием двух типов рабочих абразивных инструментов, позволяют сделать следующие промежуточные вывод: отличия между двумя вариантами расчетов проявляются в числовых значениях максимальной температуры возникающей на верхней части поверхности катания головки рельса после прохождения шлифовальных кругов.

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 $t_p=22^\circ\text{C}$ что на 26 % больше чем при использовании цельнолитого традиционного бакелитового круга.; 241 °C при $t_p=50^\circ\text{C}$; 191 °C при $t_p=0^\circ\text{C}$.

В то же время в работе [98] указано, что средняя температура металла при шлифовании может достигать 350 °С.

Таким образом, можно заключить, что использование композиционного шлифовального круга с указанными выше соотношениями бакелитовых и сегментов МАНКС на рабочей поверхности инструмента, не приведет к образованию прижогов на обрабатываемой верхней части поверхности катания головки железнодорожных рельсов. Существенно увеличится эксплуатационный ресурс композиционного шлифовального круга, повысится качество обрабатываемой поверхности рельсов, в конечном итоге удастся решить проблему восстановления и увеличения эксплуатационных показателей рельсов и рельсовых плетей на сети железных дорог РФ.

4.2.1 Исследование и моделирование термодинамического состояния рабочих поверхностей (цельнолитого и композиционного) АИ

Для выполнения расчета термодинамического состояния рабочей поверхности абразивного инструмента создана геометрическая модель (рисунок 4.27) и заданы граничные условия, определяющие тепловой поток на рабочей поверхности шлифовального круга и конвективный теплообмен на остальных поверхностях инструмента.

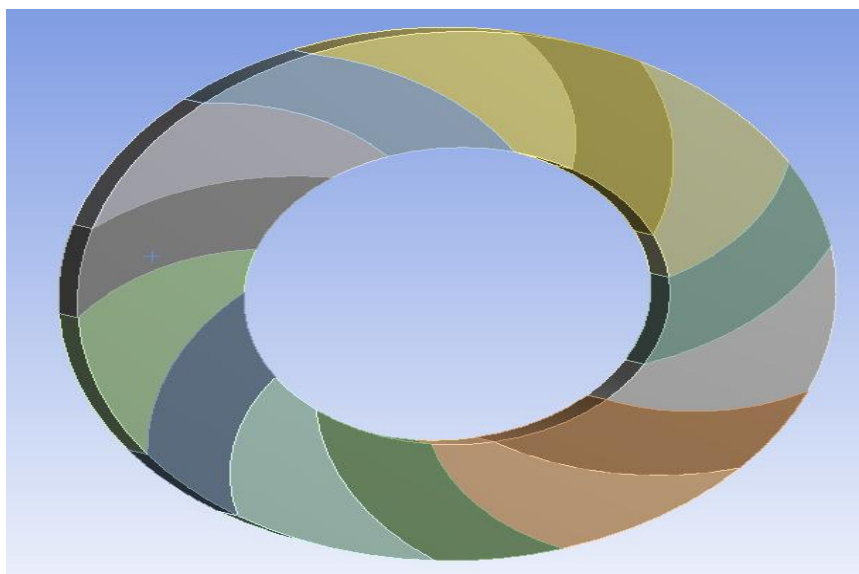


Рис. 4.27 - Геометрическая модель рабочей поверхности абразивного инструмента

Для цельнолитого шлифовального круга суммарная мощность равнялась $20-17=3\text{кВт}$ и распределялась равномерно по всей площади рабочей поверхности шлифовального круга.

Подаваемая мощность на композиционный шлифовальный круг составляла, согласно эквивалентному коэффициенту $26-22=4\text{кВт}$. В последнем случае мощность разделялась по всем рабочим поверхностям (бакелитовым и нанокерамическим) в соответствие с коэффициентами трения:

$$W_{\text{кер}} + W_{\text{бак}} = 4/7, W_{\text{кер}} = \frac{0,6}{0,33} W_{\text{бак}}, 2.81 W_{\text{бак}} = 4/7$$

$$W_{\text{бак}} = 0,2\text{кВт}, W_{\text{кер}} = 0,37\text{ кВт}.$$

Теплообмен между нанокерамическими и бакелитовыми участками моделировался тепловым контактом исходя из свойств материалов, образующих соответствующие сегменты на рабочей поверхности композиционного круга. Состав бакелитового и керамического сегментов (МАНКС) рабочей поверхности композиционного шлифовального круга принимался согласно таблице 4.1

Таблица 4.1 Объемное соотношение компонентов бакелитового и керамического 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, необходимых для выполнения температурного расчета, определялись в тесном сотрудничестве с сотрудниками центра коллективного пользования наукоемкого оборудования Самарского государственного технического

университета «Исследование физико-химических свойств веществ и материалов» представлены в таблице 4.2.

На основе объемного соотношения компонентов бакелитового и керамического сегментов рабочей поверхности композиционного шлифовального круга получены эквивалентные значения коэффициентов теплопроводности:

$$\text{Бакелитового сегмента } \beta_{\text{бак}} = (0,6 \cdot 36,26 + 0,29 \cdot 0,23) \cdot 0,89 = 19,4$$

$$\text{Керамического сегмента } \beta_{\text{кер}} = (0,85 \cdot 37,18 + 0,15 \cdot 0,85) = 32$$

Таблица 4.2 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

При выводе значений коэффициентов теплопроводности предполагалось, что поры уменьшают площадь взаимодействия материалов или уменьшают коэффициент теплопроводности при постоянной площади взаимодействия материалов.

На остальных поверхностях шлифовального круга был задан средний коэффициент конвективного теплообмена. Значение этого коэффициента вычислялось по формуле [2.6]:

$$\alpha = 5,6 + 4v \left[\frac{Bm}{\text{мм}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \right].$$

Средний радиус шлифовального круга равен 200 мм, при условии, что частота вращения круга составляет 4600 об/мин получаем:

$$\alpha = 1.68 * 10^{-3} \left[\frac{Bm}{\text{мм}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \right].$$

В результате расчетов получено распределение температуры внутри и на рабочей поверхности композиционного шлифовального круга. Эти результаты представлены на рисунках 4.28 - 4.30.

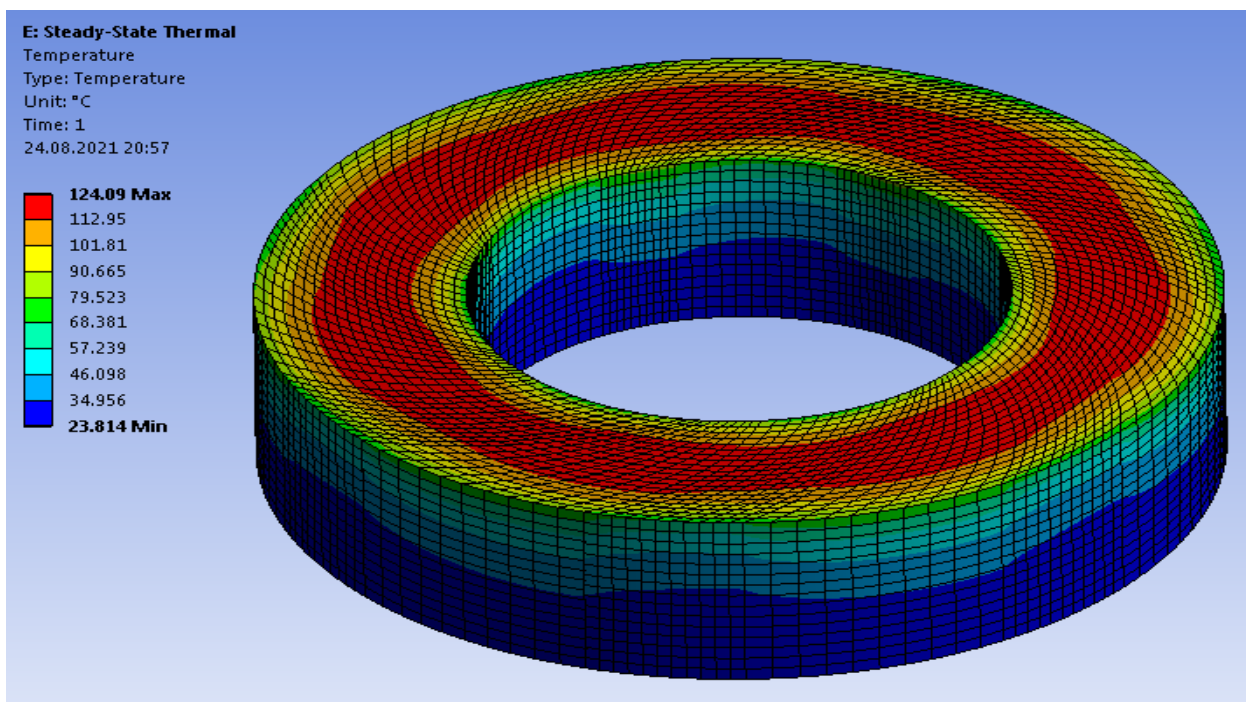


Рис. 4.28 - Распределение температуры на рабочей поверхности композиционного шлифовального круга

На рисунке 4.28 показан результат расчета температурного состояния рабочей поверхности композиционного шлифовального круга. Анализируя распределение температур на верхней рабочей части круга, наблюдаются равномерные не локальные концентрации температурных полей на поверхности, при этом максимальные значения температур составляют около 124 °С.

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

В процессе моделирования происходит нагрев локальной области верхней части рабочей поверхности шлифовального круга. Характер распределения температурных полей, возникающих внутри абразивного инструмента представлен на рисунках 4.29 - 4.30.

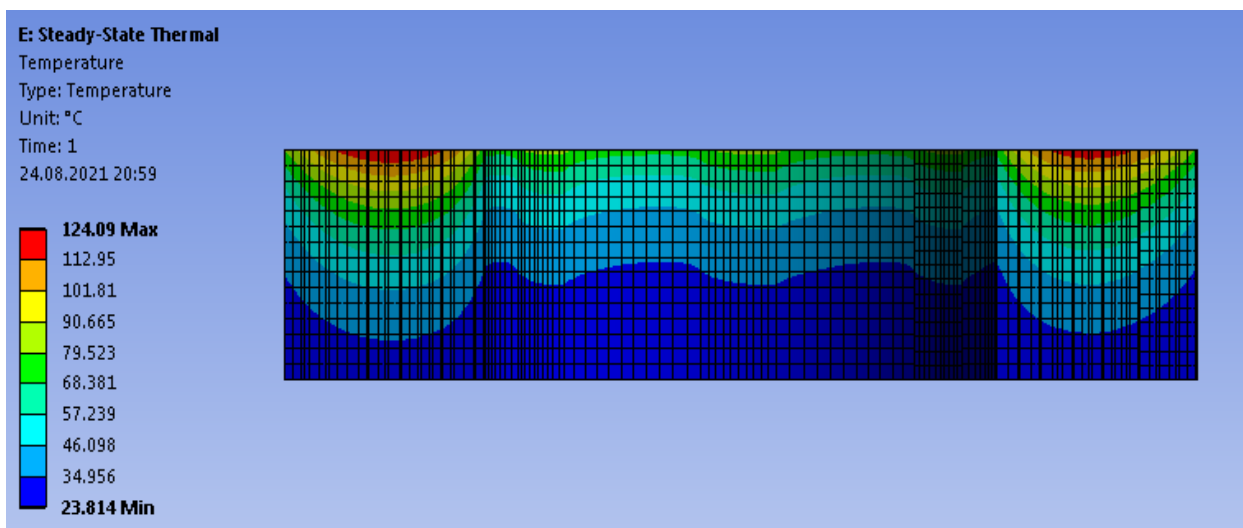


Рис. 4.29 - Распределение температуры на рабочей поверхности композиционного круга диаметральное сечении (слева) – керамический сегмент; справа - бакелитовый сегмент

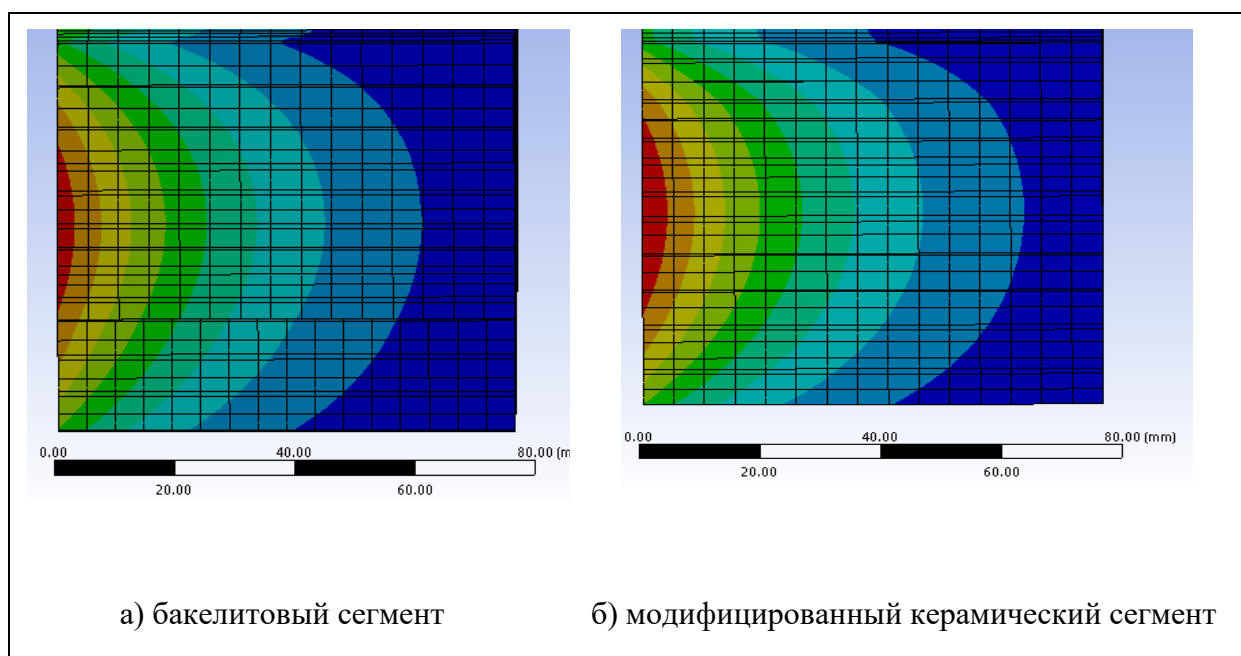


Рис. 4.30 - Распределение температурных полей возникающих внутри композиционного шлифовального круга

Проводя анализ температурных полей, возникающих внутри композиционного шлифовального круга, наблюдается незначительное превышение температурных градиентов в зоне керамического сегмента на глубине до 5 мм. Дальнейшее распространение температурных полей внутри исследуемой рабочей поверхности шлифовального круга в диапазоне от 5 до 50 мм кардинально не отличаются.

Результаты моделирования и расчета температурного состояния рабочей поверхности цельнолитого шлифовального круга представлены на

рисунках 4.31 - 4.33, на которых показано распределение температуры при аналогичных тепловых нагрузках.

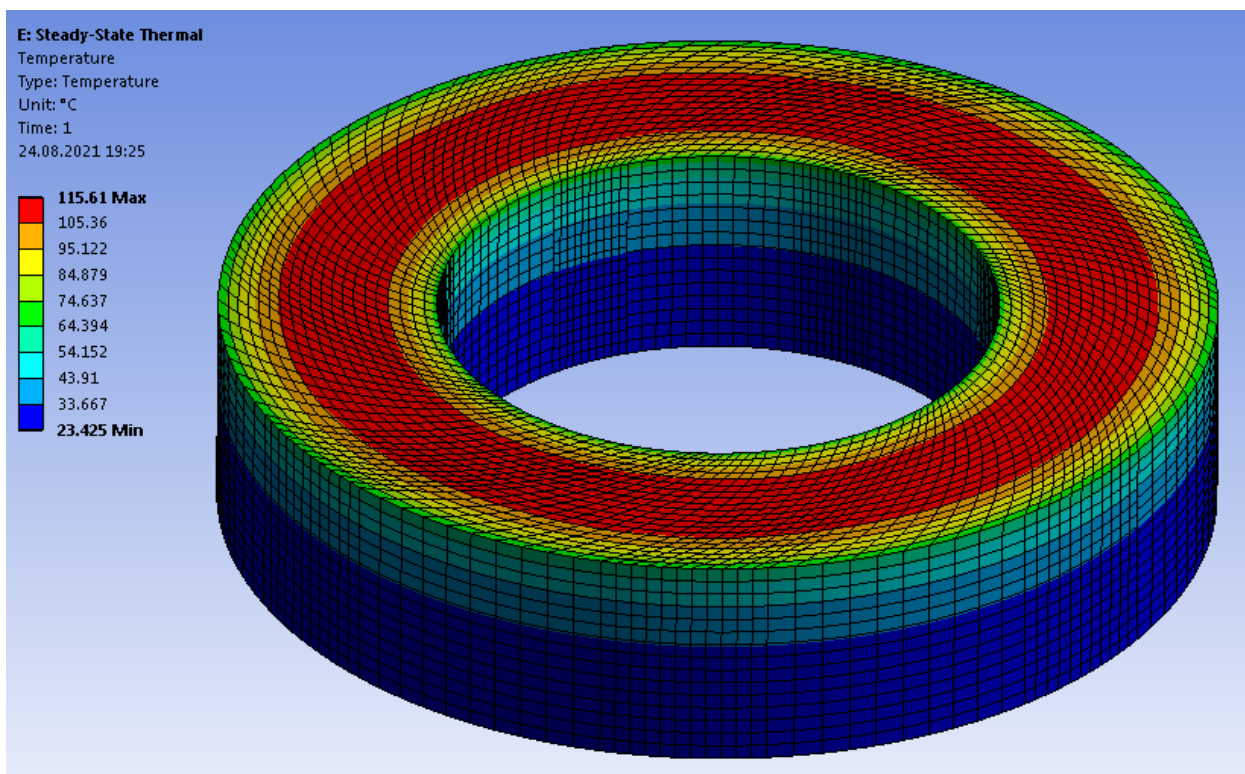


Рис. 4.31 - Распределение температуры на рабочей поверхности цельнолитого шлифовального круга

На рисунке 4.31 показан результат расчета температурного состояния рабочей поверхности цельнолитого шлифовального круга. Анализируя распределение температур на верхней рабочей части круга, наблюдаются равномерные не локальные концентрации температурных полей на поверхности, при этом максимальные значения температур составили около 116 °С.

Формирование равномерного температурного поля на поверхности круга в результате обработки рельсов способствует равномерному съему величины припуска, однако период работоспособности(стойкости) цельнолитого абразивного инструмента значительно ниже, в сравнении со стойкостью композиционного шлифовального круга, в следствии невысокой теплостойкости и хрупкости бакелитовой связки.

В процессе моделирования происходит нагрев локальной области верхней части рабочей поверхности шлифовального круга. Характер

распределения температурных полей, возникающих внутри абразивного инструмента представлен на рисунках 4.32 - 4.33.

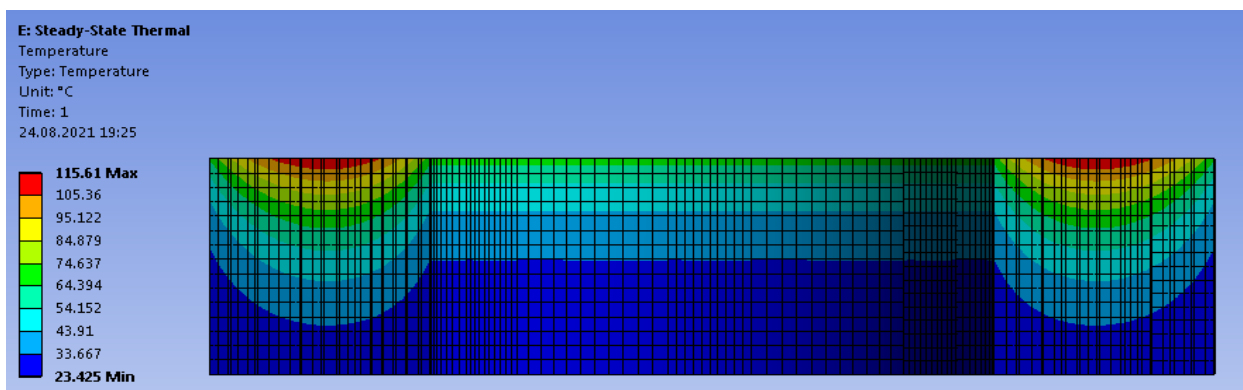


Рис. 4.32 - Распределение температуры на рабочей поверхности цельнолитого шлифовального круга в диаметральной сечении

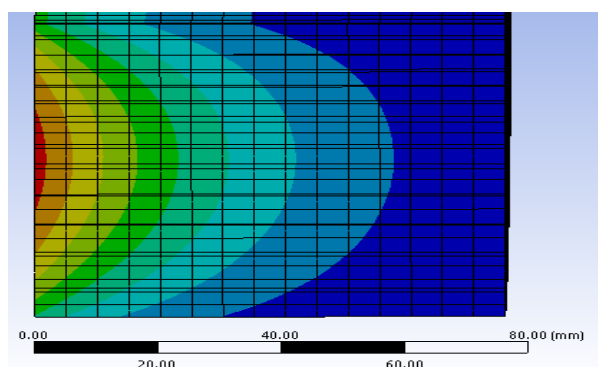


Рис. 4.33 - Распределение температурных полей возникающих внутри цельнолитого шлифовального круга

Исследуя характер и глубину рассеивания температурных полей, возникающих внутри цельнолитого шлифовального круга, наблюдается превышение температурных градиентов в поверхностном слое инструмента на глубине до 2,5 мм. Дальнейший характер распространения внутренних температурных полей исследуемой рабочей поверхности шлифовального круга в диапазоне от 5 до 50 мм проявляется в виде затухающих температурных градиентов.

В ходе выполненного компьютерного моделирования и анализа результатов произведенного расчета установлено, наличие модифицированных нанокерамических вставок на рабочей поверхности композиционного шлифовального круга способствует формированию равномерного теплового потока на поверхности круга с максимальным

значением 124 °С, это на 8% больше (116 °С) относительно теплового потока образующегося на рабочей поверхности цельнолитого шлифовального круга в процессе обработки поверхности катания рельсов.

Полученные в ходе моделирования температурные значения на рабочей поверхности абразивных инструментов, подтверждаются натурными экспериментами. Так при обработке композиционным шлифовальным кругом средние температурные значения формируемого теплового потока на поверхности круга составляли 123 °С, цельнолитого 113 °С.

Проведенные исследования температурного состояния рабочих поверхностей (цельнолитого и композиционного) АИ позволили определить и сопоставить формируемые тепловые потоки на рабочих поверхностях исследуемых шлифовальных кругов используемых при обработке железнодорожных рельсов и рельсовых плетей.

4.3 Оценка влияния характеристик композиционных шлифовальных кругов и режимов обработки на формируемый поверхностный слой верхней части поверхности катания головок железнодорожных рельсов

В процессе дальнейших исследований термодинамического состояния формируемого поверхностного слоя в технологическом процессе шлифования особое внимание уделено микрорельефу (шероховатости R_z), возникающему в результате взаимодействия рабочей поверхности абразивного инструмента с обрабатываемой поверхностью катания головки рельса.

Отбор проб производили после завершения циклов испытаний реализуемых по методике описанной в 3 главе диссертационной работы, проведение исследований поверхностного слоя формируемого в процессе шлифования железнодорожных рельсов осуществлялось по методике отображенной в межгосударственном стандарте ГОСТ 2789-73

«Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики» (с изменениями и дополнениями от 20 апреля 2017г.).

Контроль и определение значений шероховатости формируемого поверхностного слоя осуществляли с использованием портативного прибора ИШП-210 (рисунок 4.34), включенного в реестр приборов измерения шероховатости поверхности в холдинге ОАО РЖД. Технические характеристики применяемого прибора представлены в таблице 4.2.



Рис 4.34 - Общий вид прибора для измерения шероховатости поверхности (ИШП-210)

Таблица 4.2 Основные технико-эксплуатационные характеристики
портативного прибора ИШП - 210

Наименование характеристики	Значение
Модификация	ИШП-210
Измеряемые параметры шероховатости	Ra, Rz, Rq, Rt, Rp, Rv, R3z, R3y, Rz (JIS), Rs, Rsk, Rku, RSm, Rmr
Фильтр	Гаусса, RC, PC-RC Профиль без фильтра D-P
График	Первичный профиль / профиль, подвергнутый фильтрации и кривая tp
Диапазон измерений: - по параметру Ra, мкм - по параметру Rz, мкм - Ось X (горизонтальная), мм	от 0,1 до 16,0 от 0,02 до 160,00 17,5
Дискретность / Диапазон измерений (автоматический); Ось Z (вертикальная), мкм	0,01 мкм / ± 20 0,02 мкм / ± 40 0,04 мкм / ± 80
Пределы допускаемой основной относительной погрешности измерений шероховатости по параметру Ra, %	10
Относительное СКО результатов измерений, %, не более	6

Диапазон вертикального перемещения щупа (ось Z - вертикальная), мкм	от –80 до +80
Радиус кривизны щупа, мкм	5
Измерительное усилие, мН	4
Отсечка шага, мм	0,25; 0,8; 2,5
Длина оценки, мм	от 1 до 5 длин отсечки шага
Скорость перемещения щупа, мм/с	
- на базовой длине 0,25 мм	0,135
- на базовой длине 0,8 мм	0,5
- на базовой длине 2,5 мм	1,0

Характеристики (зернистость, твердость, номер структуры) композиционных шлифовальных кругов, применяемых на операциях шлифования верхней части поверхности катания головок железнодорожных рельсов оказывают непосредственное влияние на механизм образования микрорельефа обрабатываемой поверхности.

Композиционные шлифовальные круги различной зернистостью, способствуют формированию стружки в процессе шлифования различной величины. Немаловажным фактором, оказывающим влияние на формирование шероховатости поверхности, является количество задействованных в операциях резания абразивных зерен шлифовального круга.

Изменение твердости КШК на операциях шлифования рельсов влечет за собой снижение режущей способности инструмента в процессе обработки, это влечет за собой увеличение температурных градиентов на поверхности рельса и шлифовального круга. Повышение пористости структуры абразивного инструмента с определенным объемом абразивного материала, при обработке совершаемой на одинаковых режимах способствует формированию повышенных температурных градиентов между обрабатываемой поверхностью и поверхностью шлифовального круга.

В результате натурных экспериментов необходимо выявить факторы структурных характеристик композиционных шлифовальных кругов, оказывающих влияние на формирование шероховатости поверхностного слоя

верхней поверхности катания головок железнодорожных рельсов, осуществляемых мобильными рельсошлифовальными специализированными единицами.

4.3.1 Методика планирования и оценки результатов экспериментов

Целью проводимых натурных экспериментов являлось нахождение и определение наиболее эффективных режимов обработки верхней части поверхности катания головок железнодорожных рельсов и рельсовых плетей для кругов с различными структурными параметрами, обеспечивающих формирование качественного поверхностного слоя - $R_{z.p.c.}$, мкм.

Допущенные в диссертационном исследовании уровни факторов и их зашифрованные обозначения приняты аналогично таблице 3.8 третьей главы диссертационной работы.

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). Сформирована матрица планирования экспериментов, представленная в приложении П4.5.

В результате обработки полученных экспериментальных данных, определена следующая зависимость качества обрабатываемой поверхности $R_{z.p.c.}$ от зернистости, структуры и твердости композиционного шлифовального круга:

$$R_{z.p.c.} = 51,45 + 0,019F - 0,21S_t - 11,068Z_h \quad (4.5)$$

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

Интерпретация полученных коэффициентов регрессии 4.5 заключается в следующем: константа оценивает агрегированное влияние прочих (кроме учтенных в математической модели X_i) факторов на результат $R_{z.p.c.}$ и означает, что качество обрабатываемой поверхности при отсутствии X_i составила бы 51,45 мкм.

Коэффициент b_1 указывает, что с увеличением зернистости (F) на 1, $R_{z.p.c}$ увеличивается на 0,019 мкм. Коэффициент b_2 указывает, что с увеличением процентного содержания абразивных частиц в структуре шлифовального круга (S_t) на 1, качество обрабатываемой поверхности снижается на 0,21 мкм. Коэффициент b_3 указывает, что с увеличением твердости круга (Z_h) на 1, значения $R_{z.p.c}$ снижается на 11,068 мкм.

С целью подтверждения наиболее значимых факторов, влияющих на качество обработанной поверхности проведено математическое планирование и натурные эксперименты, в результате проверки значимости факторов структуры и твердости композиционного шлифовального круга при постоянных значениях зернистости получена следующая зависимость:

$$R_{z.p.c} = 8,26 + 2,74S_t - 35,824Z_h - 0,03S_t^2 + 0,06S_tZ_h + 12,41Z_h^2 \quad (4.6)$$

Графическая интерпретация результатов обработки математической модели 4.6 при значении зернистости F14 представлена на рисунке 4.35.

Определено влияние твердости элементов композиционных шлифовальных кругов (КШК) - Q, R, T на формируемый микрорельеф верхней части поверхности катания железнодорожных рельсов.

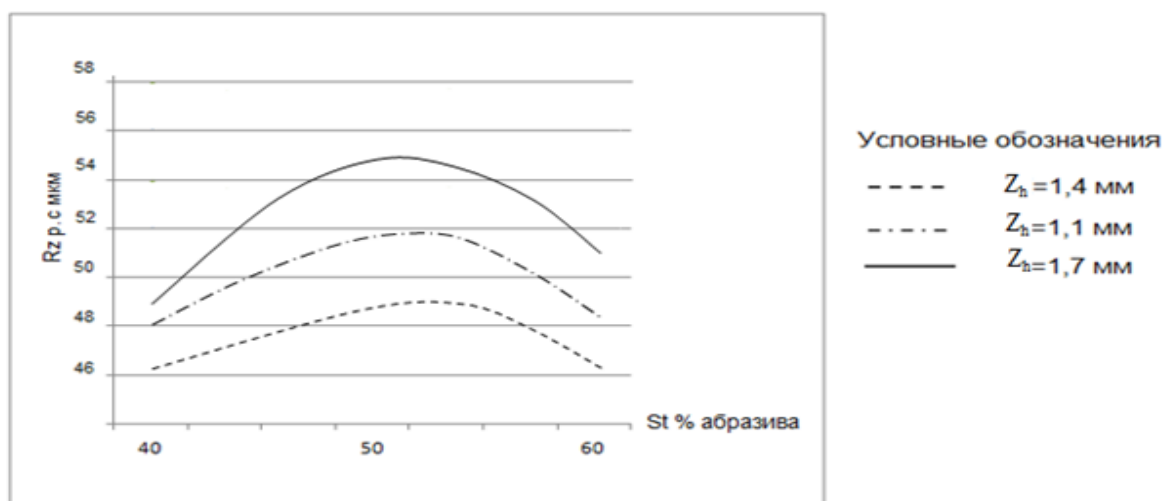


Рис. 4.35 - Влияние структуры и твердости композиционного шлифовального круга на качество обработанной поверхности при значении зернистости F14

Проводя анализ графического отображения результатов $R_{z.p.c}$ (качество обработанной поверхности) представленных на рисунке 4.35 определено, что при твердости модифицированной вставки композиционного шлифовального круга 1,1мм (Z_h) и плотной структуре S_t3 (60% абразива), шероховатость обработанной поверхности составит $R_{z.p.c} = 51 \text{ мкм}$.

В результате обработки полученных экспериментальных данных, представленных в приложении П 4.6 определена следующая зависимость качества обработанной поверхности $R_{z.p.c}$ (мкм) от технологических режимов обработки рабочей поверхности катания железнодорожных рельсов.

При проведении натурных экспериментов установлено, что наиболее значимыми технологическими факторами, влияющими на качество обработанной поверхности $R_{z.p.c}$, являются сила резания, скорость лабораторной установки, скорость шлифовального круга.

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

$$R_{z.p.c} = 30,823 + 0,41P_z + 2,4V_{\text{лаб}} - 0,0033V_{\text{кр}} \quad (4.7)$$

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

Интерпретация полученных коэффициентов регрессии 4.7 заключается в следующем: константа оценивает агрегированное влияние прочих (кроме учтенных в математической модели X_i) факторов на результат $R_{z.p.c}$. и означает, что качество обрабатываемой поверхности при отсутствии X_i составила бы 30,82 мкм.

Коэффициент b_1 указывает, что с увеличением силы резания (P_z), $R_{z.p.c}$ увеличивается на 0,41 мкм. Коэффициент b_2 указывает, что с увеличением скорости лабораторной установки ($V_{\text{лаб}}$) на 1, качество обрабатываемой поверхности увеличивается на 2,4 мкм. Коэффициент b_3 указывает, с увеличением скорости шлифовального круга ($V_{\text{кр}}$), значения $R_{z.p.c}$ снижается на 0,003 мкм.

Математическое планирование экспериментов от технологических режимов проводилось путем выделения факторов, влияющих на формирования микрорельефа поверхности железнодорожных рельсов.

В результате обработки экспериментальных данных получена следующая зависимость выходных параметров от технологических режимов:

$$R_{z.p.c} = -358,083 + 94,606P_z + 5,537V_{кр} - 7,05P_z^2 - 0,182P_zV_{кр} - 0,044V_{кр}^2 \quad (4.8)$$

На рисунке 4.36 представлена графическая интерпретация результатов обработки математической модели 4.8.

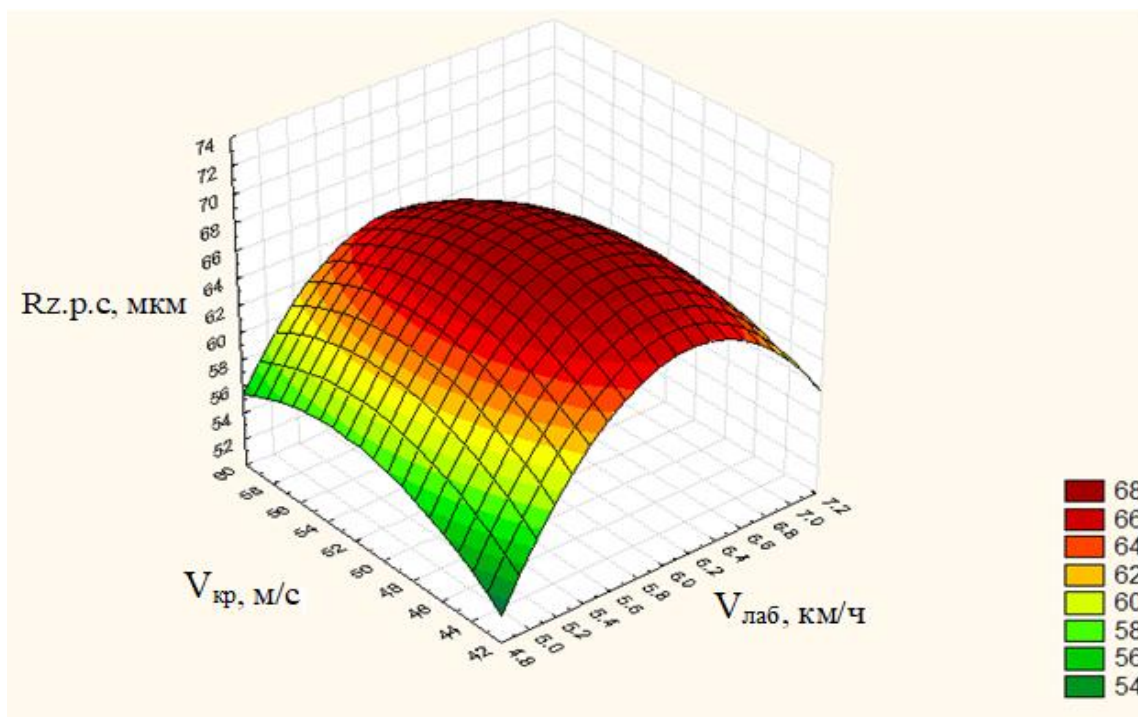


Рис. 4.36 - Влияние технологических режимов на качество обработанной поверхности при скорости лабораторной установки 7 км/ч

Формирование микрорельефа на рабочей поверхности головок железнодорожных рельсов происходит в результате взаимодействия абразивных частиц композиционного шлифовального круга с поверхностью катания рельса, таким образом параметр шероховатости поверхностного слоя безусловно зависит от размеров и характеристик образующейся стружки рельсовой стали. Микроструктура стружки представлена на рисунке 4.37 а, б.

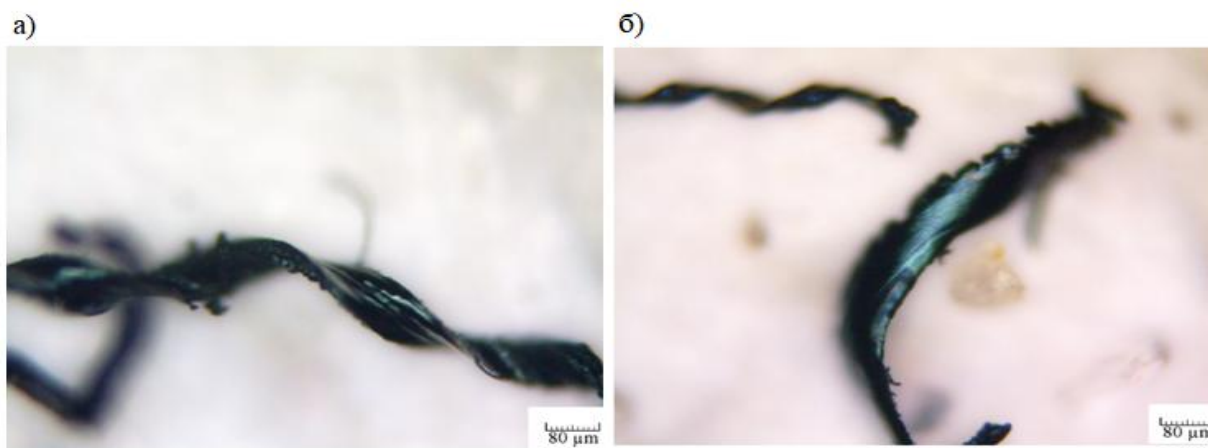


Рис. 4.37 - Фрагменты микроструктуры стружки рельсовой стали Э76ХФ полученной после обработки композиционным шлифовальным кругом увеличение - х500 раз

Проводя анализ микроструктуры стружки полученной в процессе механической обработки верхней части поверхности катания железнодорожных рельсов, наблюдается формирование сливного типа стружки, которая представлена сплошной лентой с гладкой блестящей наружной поверхностью, внешняя сторона сливной стружки имеет слабо выраженные пилообразные зазубрины. Характер образования такого типа стружек свойственен при резании пластичных материалов на больших скоростях резания.

В связи с особенностями, протекающего процесса механической обработки поверхности катания головок рельсов, использование шлифовального круга меньшей твердости позволяет формировать шероховатость обработанной поверхности с меньшими значениями, так как снижается величина образующейся в процессе резания абразивными зернами стружки.

Таким образом, в ходе выполнения экспериментальных исследований направленных на определение факторов влияющих на шероховатость формируемой поверхности, в процессе обработки поверхности рельсов, удалось получить математические корреляционные зависимости, с помощью которых возможно регулировать качество обработанной поверхности. Это способствует обеспечению эффективного технологического процесса обработки железнодорожных рельсов.

4.4 Выводы по главе

1. В ходе 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. Так для композиционного шлифовального круга максимальная температура составила 213°C , что на 26 % больше, чем при использовании цельнолитого традиционного абразивного круга.

2. В результате компьютерного моделирования и исследования термодинамического состояния рабочих поверхностей (цельнолитого и композиционного) АИ позволили определить и сопоставить формируемые тепловые потоки на рабочих поверхностях исследуемых шлифовальных кругов используемых при обработке верхней части поверхности катания железнодорожных рельсов и рельсовых плетей.

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°C , что на 8% больше (116°C) в сравнении с тепловым потоком цельнолитого бакелитового круга.

Полученные в ходе моделирования температурные значения на рабочей поверхности абразивных инструментов, подтверждаются натурными экспериментами. Так при обработке композиционным шлифовальным кругом средние температурные значения формируемого теплового потока на поверхности круга составили 123°C , и цельнолитого 113°C .

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 °С при $t_p=22^\circ\text{C}$; 241 °С при $t_p=50^\circ\text{C}$; 191 °С при $t_p=0^\circ\text{C}$.

3. Формирование равномерного температурного поля на поверхности шлифовального круга в результате обработки верхней части поверхности катания железнодорожных рельсов и рельсовых плетей (изготовленных из рельсовой стали марки Э76ХФ) способствует равномерному съему припуска, а наличие модифицированных керамических сегментов способствуют более длительному периоду работоспособности (стойкости) абразивного инструмента.

4. Определено влияние твердости элементов композиционного шлифовального круга (КШК) - Q, R, T на формируемый микрорельеф верхней части поверхности катания железнодорожных рельсов. Определено, что при зернистости F14, твердости модифицированной вставки композиционного шлифовального круга 1,1мм (Z_h) и плотной структуре S_t3 (60% абразива), шероховатость обработанной поверхности составит $R_{z.p.c} = 51\text{мкм}$.

5. В процессе исследования структурных характеристик композиционных шлифовальных кругов, применяемых на операциях шлифования верхней части поверхности катания головок железнодорожных объемнозакаленных рельсов, установлены математические корреляционные зависимости с помощью, которых возможно регулировать свойства и значения шероховатости формируемого поверхностного слоя обработанной поверхности рельса.

ГЛАВА 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ РАЗМЕРОВ СЕГМЕНТОВ КОМПОЗИЦИОННОГО ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА. РАЗРАБОТКА ПРАКТИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОВЫШЕНИЮ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ГОЛОВКИ РЕЛЬСОВ

5.1 Реализация методики расчёта режимов механической обработки железнодорожных рельсов на операциях профильного шлифования рельсов

В ходе выполненного диссертационного исследования полученных теоретических и экспериментальных результатов, выявленных взаимосвязей изложенных в предыдущих главах диссертации, представлена методика расчёта режимов механической обработки железнодорожных рельсов на операциях профильного шлифования рельсов модифицированным шлифовальным кругом.

Порядок выполнения расчёта режимов механической обработки железнодорожных рельсов выполняется по следующим этапам:

1. Подбор параметров композиционного шлифовального круга.

1.1. Выбор абразивного материала. Подбор шлифовального абразивного материала назначается в зависимости от вида механической обработки и материала который необходимо обрабатывать. При шлифовании рабочей поверхности железнодорожных рельсов, в качестве абразивного материала, выбран электрокорунд. Применение его обусловлено тем, что на поверхности его зерен при равных условиях обработки температура будет меньше, чем у карбида кремния [3, 150].

1.2. Определение зернистости шлифовального материала. Подбор гранулометрического состава композиционного шлифовального круга осуществляется в зависимости от исходных значений шероховатости рабочей поверхности железнодорожных рельсов до и после обработке, способа

шлифования.

Для расчета необходимо знать количество зерен в единице площади шлифовального композиционного круга.

2. Подбор технологических режимов резания.

Устанавливается скорость шлифовального круга, сила прижима круга к поверхности рельса, продольная подача, число циклов проходов, позволяющих снять суммарный необходимый припуск материала (таблица 5.1).

Таблица 5.1 – Рекомендуемая скорость композиционного шлифовального круга и сила прижима к обрабатываемой поверхности

Обрабатываемый материал	Скорость шлифовального круга, м/с	Сила прижима КШК к рельсу, Н
Железнодорожные рельсы Э76ХФ	35 – 60	30 – 90

С целью практического применения экспериментально определено значение врезания зерен электрокорунда композиционного шлифовального круга зернистостью F14 в поверхность обрабатываемого сегмента железнодорожного рельса из стали Э76ХФ, которая зафиксирована профилографическим методом и составила $64,4 \cdot 10^{-6}$ м.

3. Определение входных и выходных значений (таблица 5.2.).

Таблица 5.2 – Входные и выходные значения механической обработки железнодорожных рельсов на операциях профильного шлифования рельсов

Наименование	Обозначение
Входные данные:	
Заготовка	
Длина заготовки, м	L_3
Предел прочности материала заготовки, Н/м ²	σ_s
Инструмент	
Материал абразива	
Зернистость	F
Количество зерен в единице площади, шт/м ²	n_g
Радиусы закруглений вершин зерен, м	ρ_g

Высота круга, м		B
Углы резания абразивного материала	Угол между равнодействующей силы резания, град.	β
	Угол сдвига, град.	β_1
Радиальный износ инструмента, м		ΔR
Износ зерна, м		$h_g \max$
Оборудование		
Податливость системы, м/Н		ω_{TS}
Режимы резания		
Скорость круга, м/с		V_K
Скорость движения изделия, м/с		V_u
Сила прижатия круга, Н		P_H
Предварительный натяг, м		N
Поперечная подача, м		S_y
Глубина микрорезания, м		t_f
Выходные параметры		
Шероховатость обработанной поверхности, м		R_z
Величина радиального съема материала, м		Δr
Величина слоя, в котором распределена шероховатость, м		H
Радиальный износ инструмента, м		ΔR
Значение силы резания, Н		P_y

1. Производится расчет параметров для этапа врезания, на основе уравнения баланса перемещений :

$$\Delta A_i = S_{yi} + N = \Delta t_{fi} + \Delta R_i + \Delta r_{i-1} + \Delta A_{yi}, \quad (5.1)$$

где ΔA_i - перемещение на величину подач, м;

S_{yi} – поперечная подача, м;

N – предварительный натяг, м;

Δt_{fi} - приращение глубины микрорезания, м;

ΔR_i – радиальный износ инструмента, м;

Δr_{i-1} – радиальный съем металла предыдущего оборота, м;

ΔA_{yi} - приращение упругих деформаций элементов технологической системы.

Этап врезания.

1) Вычисляется сумма предварительного натяга N и поперечной подачи S_y :

$$\Delta A_I = S_{yi} + N, \quad (5.2)$$

2) Определяется значение приращения упругих деформаций по формуле:

$$A_{yi} = \frac{\Delta P_y}{j_{ts}} = w_{TS} \cdot \Delta P_y = w_{TS} \cdot (P_{yi} - P_{yi-1}) \quad (5.3)$$

где w_{TS} - податливость системы, м/Н;

ΔP_y - разность значений сил резания i -го и $(i-1)$ -го оборотов, $\Delta P_y \geq 0$.

3) Рассчитывается глубина микрорезания:

$$t_{fi} = \Delta S_y + t_{fi-1} \quad (5.4)$$

4) Вычисляется величина радиального съема материала текущего оборота:

$$\Delta r_1 = \frac{t_{f1}^2}{1,478 \cdot t_{f1} + \frac{13,66 \cdot V_u}{K_c \cdot (V_k + V_u) \cdot n_s \cdot \sqrt{D_s \cdot \rho}}}, \quad (5.5)$$

5) Рассчитывается величина слоя, в котором распределена шероховатость:

$$H_i = t_{fi} - \Delta r_i \quad (5.6)$$

6) Определяется величина силы резания по формуле [98]:

$$P_{y1} = 3\sqrt{2} \cdot B \cdot n_s \cdot \sqrt{\rho \cdot h_{g\max} \cdot H_1 \cdot D_s} \cdot (0,055 \cdot H_1 \cdot \frac{\sin \beta_2}{\sin \beta_1} + 0,061 \cdot \sqrt{\rho \cdot h_{g\max}}) \cdot \tau_s, \quad (5.7)$$

где B – высота шлифовального круга, м;

$h_{g\max}$ - износ зерна, м;

β – угол между равнодействующей силы резания и скоростью резания, град.

β_1 – угол сдвига, град.

τ_s – напряжение сдвига, Н/м²,

h_g max и углы резания абразивного материала β и β_1 выбираются в соответствии со справочными данными [43], Напряжение сдвига вычисляется по формуле:

$$\tau_s = \frac{\sigma_s}{1,5} \quad (5.8)$$

где σ_s - предел прочности материала, Н/м²

7) Выполняется уточняющий расчет значений Δt_{fi} , Δr_i , P_{yi} .

Определяется значение приращения упругих деформаций по формуле (5.3):

$$A_{yi} = \frac{\Delta P_y}{j_{ts}} = w_{TS} \cdot \Delta P_y = w_{TS} \cdot (P_{yi} - P_{yi-1})$$

Задается величина износа инструмента (вылет зерна над уровнем связки), принимается в зависимости от обрабатываемого материала и характеристик шлифовального круга:

$$\Delta R_i = \Lambda t_{fi-1} \quad (5.9)$$

где Λ коэффициент, учитывающий степень износа шлифовального круга.

Определяется экспериментально.

Приращение глубины микрорезания определяется из формулы (5.1):

$$\Delta t_{fi} = \Delta A_i - \Delta A_{yi} - \Delta R_i - \Delta r_{i-1}.$$

Определяется глубина микрорезания:

$$t_{fi} = t_{fi-1} + \Delta t_{fi} \quad (5.10)$$

Рассчитывается величина радиального съема материала по формуле (5.5), величина слоя, в котором распределена шероховатость по формуле (5.6), значение силы резания по формуле (5.7).

8) Выполняется расчет среднего арифметического отклонения профиля R_z и расстояния от наиболее глубокой впадины до средней линии профиля по формуле:

$$W_{mi} = \frac{H_i}{2} \quad (5.11)$$

Далее, полученное значение W_{mi} сравнивается с величиной радиального съема материала Δr_i , если $\Delta r_i > W_{mi}$ ведется по формуле (5.12).

$$R_a = \frac{\sqrt{2} \cdot V_u \cdot (H_{\text{вблх}})^{1,5}}{K_c \cdot \pi^2 \cdot (V_k + V_u) \cdot n_3 \cdot \sqrt{D_{\text{э}} \cdot \rho \cdot W_{\text{sum}}}}, \quad (5.12)$$

$$W_{\text{sum}} = (W_m - 0 \cdot \Delta r_{\text{свх1}})^{1,5} + (W_m - 1 \cdot \Delta r_{\text{свх1}})^{1,5} \quad (5.13)$$

Расчет выполняется для каждого оборота этапа врезания.

2. Производится расчет параметров для этапа установившегося шлифования, аналогичным образом.

Установившийся режим (шлифование на проход). Величины параметров установившегося процесса принимаются равными параметрам последнего оборота этапа врезания, $S_{y_{\text{сми}}} = 0$.

1) Определяется значение приращения упругих деформаций по формуле(5.3):

$$\Delta A_{\text{уусті}} = \omega_{\text{TS}} \cdot \Delta P_y$$

2) Задается величина износа инструмента:

$$\Delta R_{\text{ycmi}} = \Lambda t_{f_{\text{в}}}$$

3) Вычисляется перемещение на величину подач по формуле (5.1):

$$\Delta A_{\text{ycmi}} = \Delta A_{y_{\text{сми}}} + \Delta R_{\text{ycmi}} + \Delta r_{\text{в1}} + \Delta t_{f_{\text{ycmi}}}$$

4) Определяется величина предварительного натяга:

$$N_{\text{ymci}} = A_{\text{ycmi}}$$

5) Рассчитывается величина слоя, в котором распределена шероховатость по формуле (5.6):

$$H_{\text{ycmi}} = t_{f_{\text{ycmi}}} - \Delta r_{\text{ycmi}}$$

6) Расчет среднего арифметического отклонения профиля R_z и расстояния от наиболее глубокой впадины до средней линии профиля по формуле (5.11):

Далее, полученное значение W_{mi} сравнивается с величиной

радиального съема материала Δr_i , если $\Delta r_i \geq W_{mi}$, то расчет ведется по формуле (5.12).

Количество проходов выбирается в зависимости от требуемой шероховатости и припуска на обработку.

3. Производится расчет основного времени.

Величина основного времени, затрачиваемого на профильное шлифование напроход [106]:

$$\tau_j = \frac{V_{cp}}{V_u}, \quad (5.14)$$

$$V_{cp} = S_{cp} \cdot \frac{B}{2}, \quad (5.15)$$

где B – ширина круга, $B=0,025$ м

V_u – скорость перемещения изделия, $V_u=2$ м/с

$$B_{обр} = B_{заг} + \frac{B}{2}, \quad (5.16)$$

где $B_{заг}$ – ширина заготовки, $B_{заг}=0,08$ м.

Пример расчета цикла шлифования для железнодорожных рельсов марки стали ЭТ76ХФ. Исходные данные: ширина заготовки $B_{заг}=0,08$ м, длина заготовки $L_z=1$ м, ширина круга, $B=0,025$ м, скорость вращения круга $V_k=58$ м/с, скорость движения изделия $V_u=2$ м/с, композиционный шлифовальный круг рабочая поверхность которого, выполнена в виде чередующихся режущих элементов двух типов, зернистость модифицированных абразивных наноструктурированных керамических связкок(МАНКС) F14, $P_H=30$.

Этап врезания.

Для вычисления значений параметров этапа врезания принимаем величину поперечной подачи $S_y=4 \cdot 10^{-5}$ м и величину предварительного натяга $N=7 \cdot 10^{-5}$ м.

Расчет первого оборота:

- 1) Вычисляется сумма предварительного натяга и поперечной подачи по формуле (5.2):

$$\Delta A_{yi} = S_y + N = 4 \times 10^{-5} + 7 \times 10^{-5} = 11 \times 10^{-5} \text{ м}$$

- 2) Определяется значение приращения упругих деформаций по формуле (5.3):

$$\Delta A_{yi} = \omega_{TS} \cdot \Delta P_y$$

где ω_{TS} податливость системы; $\omega_{TS} = 30 \cdot 10^{-9} \text{ м/Н}$

ΔP_y – разность значений сил резания i -го и $(i-1)$ -го оборотов, $\Delta P_y \geq 0$.

На первом проходе $\Delta P_y = 0$, поэтому: $\Delta A_{yi} = 0 \text{ м}$.

- 3) Рассчитывается глубина микрорезания по формуле (5.1).

Величина радиального съема материала предыдущего прохода отсутствует, следовательно, $\Delta r_0 = 0$.

Так как износ шлифовальной ленты $\Delta R_1 = 0$ на первом обороте, то:

Величина глубины микрорезания:

$$tf1 = \Delta tf1 = \Delta A_{yi} = 11 \times 10^{-5} [\text{м}]$$

- 4) Вычисляется величина радиального съема материала первого оборота по формуле (5.5):

$$K_C = 0,92$$

$$\Delta r_i = \frac{(11 \times 10^{-5})^2}{1,478 \times 11 \times 10^{-5} + \frac{13,66 * 2}{0,92 \times (50 + 2) \times (167 \times 10^3) \times \sqrt{0,125 \times 97,6 \times 10^{-6}}}} = 13,43 \times 10^{-6} [\text{м}]$$

- 5) Величина слоя, в котором распределена шероховатость рассчитывается по формуле (5.6), получим:

$$H_i = t_{fi} - \Delta r = 11 \times 10^{-5} - 13,43 \times 10^{-6} = 9,65 \times 10^{-5} [\text{м}]$$

- 6) Определяется величина силы резания по формуле (5.7):

$$\begin{aligned} P_{yi} &= 3\sqrt{2} \times 0,025 \times (192 \times 10^3) \\ &\times \sqrt{97,6 \times 10^{-6} \times 6,4 \times 10^{-5} \times 9,65 \times 10^{-5} \times 0,125} \\ &\times \left(0,055 \times 9,65 \times 10^{-5} \times \frac{0,5591}{0,3746} + 0,061 \right. \\ &\left. \times \sqrt{97,6 \times 10^{-6} \times 6,4 \times 10^{-5}} \right) \times 0,72 \times 10^9 = 51,31 [\text{Н}] \end{aligned}$$

Напряжение сдвига $\tau_s = 720 \times 10^9$

В соответствии с данными работ [14, 76, 77, 82, 96, 160], принимаем для круга данной характеристики износ зерна $h_{gmax}=10 \cdot 10^{-6}$ м, угол между равнодействующей силы резания и скоростью резания $\beta_1 = 22^\circ$. $\beta = 34^\circ$ и угол сдвига. Выполняется уточняющий расчет значений.

Приращение упругих деформаций:

$$\Delta A_{yi} = \omega_{TS} \cdot \Delta P_y = 51,31 \times 30 \times 10^{-9} = 1,54 \times 10^{-6} [\text{м}]$$

Приращение глубины микрорезания:

$$\Delta t_{fi} = \Delta A_i - \Delta A_{yi} = 11 \times 10^{-5} - 1,54 \times 10^{-6} = 10,8 \times 10^{-5} [\text{м}]$$

Глубина микрорезания:

$$t_{fi} = t_{f0} + \Delta t_{fi} = 0 + 10,8 \times 10^{-5} = 10,8 \times 10^{-5} [\text{м}]$$

Коэффициент стружкообразования:

$$K_c = 0.92$$

Величина радиального съема материала:

$$\Delta r_i = \frac{(10,8 \times 10^{-5})^2}{1,478 \times 11 \times 10^{-5} + \frac{13,66 * 2}{0,92 \times (50 + 2) \times (192 \times 10^3) \times \sqrt{0,125 \times 97,6 \times 10^{-6}}}} = 13,1 \times 10^{-6} [\text{м}]$$

Величина слоя, в котором распределена шероховатость

$$H_i = t_{fi} - \Delta r_i = 10,8 \times 10^{-5} - 13,1 \times 10^{-6} = 9,53 \times 10^{-5} [\text{м}]$$

Значение силы резания:

$$4) \quad P_{yi} =$$

$$3\sqrt{2} \times 0,025 \times [(192 \times 10^3)^3] \times \sqrt{97,6 \times 10^{-6} \times 6,4 \times 10^{-5} \times 9,53 \times 10^{-5} \times 0,125 \times (0,055 \times 9,53 \times 10^{-5} \times \frac{0.5591}{0.3746} + 0.061 \times \sqrt{97,6 \times 10^{-6} \times 6,4 \times 10^{-5}})} \times 0,72 \times 10^9 = 50,6 [\text{Н}]$$

Так как величина радиального съема материала Δr_1 больше, чем расстояние от наиболее глубокой впадины до средней линии профиля W_{m1} , то расчет величины средней арифметической длины профиля ведем по

формуле (5.13) Величина основного времени, затрачиваемого на продольное профили шлифование на проход вычисляется по формуле (5.14)

Расчет второго оборота:

5) Фактическая глубина резания:

$$tf_2 = \Delta S_{yi} = 10,8 \times 10^{-5} \times 4 \times 10^{-5} = 14,84 \times 10^{-5} [м]$$

6) Съём материала

$$\Delta r_2 = \frac{(14,84 \times 10^{-5})^2}{1,478 \times 14,84 \times 10^{-5} + \frac{13,66 * 2}{0,92 \times (50 + 2) \times (192 \times 10^3) \times \sqrt{0,125 \times 97,6 \times 10^{-6}}}} = 23,02 \times 10^{-6} [м]$$

7) Величина слоя, в котором распределена шероховатость

$$H_i = t_{f2} - \Delta r_2 = 14,84 \times 10^{-5} - 23,02 \times 10^{-6} = 12,54 \times 10^{-5} [м]$$

8) Определяется величина силы резания по формуле (5.7):

$$\begin{aligned} P_{yi} &= 3\sqrt{2} \times 0,025 \times (192 \times 10^3) \\ &\times \sqrt{97,6 \times 10^{-6} \times 6,4 \times 10^{-5} \times 12,54 \times 10^{-5} \times 0,125} \\ &\times \left(0,055 \times 12,54 \times 10^{-5} \times \frac{0,5591}{0,3746} + 0,061 \right. \\ &\left. \times \sqrt{97,6 \times 10^{-6} \times 6,4 \times 10^{-5}} \right) \times 0,72 \times 10^9 = 58,48 [Н] \end{aligned}$$

В соответствии с данными работ [14, 76, 77, 82, 96, 160], принимаем для круга данной характеристики износ зерна $h_{gmax}=10 \cdot 10^{-6} м$, угол между равнодействующей силы резания и скоростью резания $\beta_1 = 34^\circ$, $\beta = 22^\circ$ и угол сдвига.

Выполняется уточняющий расчет значений.

Приращение упругих деформаций:

$$\Delta A_{y2} = \omega_{TS} \cdot \Delta P_y = 30 \times 10^{-9} \times 7,88 = 0,2 \times 10^{-6} [м]$$

Приращение глубины микрорезания:

$$\Delta t_{f2} = \Delta A_2 - \Delta R_2 - \Delta r_1 - \Delta A_{y2} = 11 \times 10^{-5} - 1,08 \times 10^{-5} - 1,3 \times 10^{-5} - 0,2 \times 10^{-6} \\ = 8,58 \times 10^{-5} [\text{м}]$$

Глубина микрорезания:

$$t_{fi} = t_{f1} + \Delta t_{f2} = 8,58 \times 10^{-5} + 10,84 \times 10^{-5} = 19,42 \times 10^{-5} [\text{м}]$$

Коэффициент стружкообразования:

$$K_c = 0.92$$

Величина радиального съема материала:

$$\Delta r_2 = \frac{(19,42 \times 10^{-5})^2}{1,478 \times 19,42 \times 10^{-5} + \frac{13,66 * 2}{0,92 \times (50 + 2) \times (192 \times 10^3) \times \sqrt{0,125 \times 97,6 \times 10^{-6}}}} \\ = 36,8 \times 10^{-6} [\text{м}]$$

Величина слоя, в котором распределена шероховатость

$$H_i = t_{f2} - \Delta r_2 = 19,42 \times 10^{-5} - 36,8 \times 10^{-6} = 15,74 \times 10^{-5} [\text{м}]$$

Значение силы резания:

$$P_{yi} = 3\sqrt{2} \times 0,025 \times (192 \times 10^3) \\ \times \sqrt{97,6 \times 10^{-6} \times 6,4 \times 10^{-5} \times 15,74 \times 10^{-5} \times 0,125} \\ \times \left(0,055 \times 15,74 \times 10^{-5} \times \frac{0,5591}{0,3746} + 0,061 \right. \\ \left. \times \sqrt{97,6 \times 10^{-6} \times 6,4 \times 10^{-5}} \right) \times 0,72 \times 10^9 = 91,22 [\text{Н}]$$

Аналогично рассчитываются следующие обороты.

Установившийся режим.

Для определения величин параметров установившегося процесса расчет выполняется в следующем порядке:

Первый проход.

- 1) На установившемся процессе отсутствует приращение глубины резания и на следующих проходах она остается неизменной:

$$\Delta t_{fu1} = t_7 = 30,3 \times 10^{-5} [\text{м}]$$

- 2) Значение приращение глубины резания на всех последующих

установившихся процессах задается равным нулю:

$$\Delta t_{fu1} = 0$$

3) Съём материала:

$$\Delta r_{ul} = \Delta r_7 = 7,76 \times 10^{-5} \text{ [м]}$$

4) Величина радиального износа:

$$\Delta R_{u1} = 0,1 \times t_7 = 0,1 \times 30,3 \times 10^{-5} = 3,03 \times 10^{-5} \text{ [м]}$$

5) Сила резания:

$$P_{y1} = P_{y7} = 80,91 \text{ [Н]}$$

6) Разность сил:

$$\Delta P_y = P_{y1} - P_{y7} = 80,91 - 80,91 = 0$$

7) Приращение упругих деформаций элементов технологической системы:

$$\Delta A_{yu1} = W_{TS} \times \Delta P_{y1} = 30 \times 10^{-9} \times 0 = 0$$

8) Межцентровое расстояние (расстояние от центра круга до плоскости стола):

$$\begin{aligned} \Delta A_{u1} &= \Delta t_{u1} + \Delta R_{u1} + \Delta r_7 + \Delta A_{yu1} \\ &= 0 + 3,03 \times 10^{-5} + 0 + 7,76 \times 10^{-5} = 10,8 \times 10^{-5} \text{ [м]} \end{aligned}$$

9) Слой, в котором распределена шероховатость поверхности:

$$H_{u1} = t_{fu1} - \Delta r_{u1} = 30,3 \times 10^{-5} - 10,8 \times 10^{-5} = 19,55 \times 10^{-5} \text{ [м]}$$

Аналогично рассчитываются следующие обороты

Чистовая обработка.

При расчёте чистовой обработки методика, все формулы остаются такими же, как и для этапа врезания. Подача при чистовом шлифовании задается по рекомендациям, т.е. Съём материала принимается равным нулю.

1) Вычисляем перемещение на величину подачи:

$$\Delta A_{q1} = S_{y1} + N = 4 \times 10^{-5} + 7 \times 10^{-5} = 11 \times 10^{-5} \text{ [м]}$$

2) Определяем значение приращение глубины резания:

$$\Delta t_{fч1} = \Delta A_{ч1} = 11 \times 10^{-5} [\text{м}]$$

3) Вычисляем фактическую глубину резания:

$$t_{fч1} = t_{fu5} - \Delta t_{fч1} = 30 \times 10^{-5} - 11 \times 10^{-5} = 19,35 \times 10^{-5} [\text{м}]$$

4) Рассчитаем съём материала:

$$\begin{aligned} \Delta r_{ч1} &= \frac{(19,35 \times 10^{-5})^2}{1,478 \times 19,35 \times 10^{-5} + \frac{13,66 * 2}{0,92 \times (50 + 2) \times (192 \times 10^3) \times \sqrt{0,125 \times 97,6 \times 10^{-6}}}} \\ &= 36,5 \times 10^{-6} [\text{м}] \end{aligned}$$

5) Слой, в котором распределена шероховатость поверхности:

$$H_i = t_{fч1} - \Delta r_{ч1} = 19,35 \times 10^{-5} - 36,5 \times 10^{-6} = 15,69 \times 10^{-5} [\text{м}]$$

6) Рассчитаем силу резания:

$$\begin{aligned} P_{yi} &= 3\sqrt{2} \times 0,025 \times (192 \times 10^3) \\ &\times \sqrt{97,6 \times 10^{-6} \times 6,4 \times 10^{-5} \times 15,69 \times 10^{-5} \times 0,125} \\ &\times \left(0,055 \times 15,69 \times 10^{-5} \times \frac{0,5591}{0,3746} + 0,061 \right. \\ &\left. \times \sqrt{97,6 \times 10^{-6} \times 6,4 \times 10^{-5}} \right) \times 0,72 \times 10^9 = 90,84 [H] \end{aligned}$$

$$\text{Напряжение сдвига } \tau_s = 720 \times 10^9$$

Величина радиального износа остается равной последнему установившемуся процессу, так как круг не менялся:

$$\Delta R_{ч1} = \Delta R_{u5} = 3,03 \times 10^{-5} [\text{м}]$$

1) Разность сил, зная величину силы на последнем обороте

$$\Delta P_{yч} = \Delta P_{yч1} - P_{y0} = 90,84 - 80,92 = 9,92$$

2) Приращение упругих деформаций элементов технологической системы:

$$\Delta A_{yч1} = W_{TS} \times \Delta P_{yч} = 9,92 \times 30 \times 10^{-9} = 3 \times 10^{-7} [\text{м}]$$

3) Приращения глубины резания:

$$\begin{aligned} \Delta t_{fч1} &= \Delta A_{ч1} - \Delta R_{ч1} - \Delta r_0 - \Delta A_{yч1} = 11 \times 10^{-5} - 3,03 \times 10^{-5} - 0 - 3 \times 10^{-7} \\ &= 7,93 \times 10^{-5} [\text{м}] \end{aligned}$$

4) Определяем фактическую глубину:

$$t_{fч1} = t_{fu5} + \Delta t_{fч1} = 30,3 \times 10^{-5} + 7,93 \times 10^{-5} = 38,29 \times 10^{-5} [\text{м}]$$

5) Вычисляем съём материала:

$$\Delta r_i = \frac{(3,83 \times 10^{-5})^2}{1,478 \times 3,83 \times 10^{-5} + \frac{13,66 * 2}{0,92 \times (50 + 2) \times (192 \times 10^3) \times \sqrt{0,125 \times 97,6 \times 10^{-6}}}} = 112 \times 10^{-6} [\text{м}]$$

6) Величина слоя, в котором распределена шероховатость:

$$H_i = t_{fч1} - \Delta r_{ч1} = 38,28 \times 10^{-5} - 11,24 \times 10^{-5} = 27,05 \times 10^{-5} [\text{м}]$$

7) Рассчитаем силу резания:

$$\begin{aligned} P_{yi} &= 3\sqrt{2} \times 0,025 \times (192 \times 10^3) \\ &\times \sqrt{97,6 \times 10^{-6} \times 6,4 \times 10^{-5} \times 27,05 \times 10^{-5} \times 0,125} \\ &\times \left(0,055 \times 27,05 \times 10^{-5} \times \frac{0,5591}{0,3746} + 0,061 \right. \\ &\left. \times \sqrt{97,6 \times 10^{-6} \times 6,4 \times 10^{-5}} \right) \times 0,72 \times 10^9 = 99.607 [\text{Н}] \end{aligned}$$

Выхаживание.

Методика расчёта и формулы остаются идентичными зависимостям на этапе врезания и чистовой обработке.

1) Вычисляем перемещение на величину подач:

$$\Delta A_{\text{вых1}} = S_{y1} + N = 4 \times 10^{-5} + 7 \times 10^{-5} = 11 \times 10^{-5} [\text{м}]$$

2) Определяем величину радиального износа инструмента:

$$\Delta R_{\text{вых1}} = 0,1 \times t_{fч1} = 0,1 \times 38,2 \times 10^{-5} = 3,82 \times 10^{-5} [\text{м}]$$

3) Разность сил резания принимаем равной нулю, так как до этого обработки на этапе выхаживания не было:

$$\Delta P_y = 0$$

4) Приращение упругих деформаций элементов технологической системы:

$$\Delta A_{\text{вых1}} = W_{TS} \times \Delta P_y = 0 \times 30 \times 10^{-9} = 0$$

5) Приращение глубины резания:

$$\begin{aligned}\Delta t_{f_{\text{вых1}}} &= \Delta A_{\text{вых1}} - \Delta R_{\text{вых1}} - \Delta r_{\text{ч1}} - \Delta A_{\text{увых1}} \\ &= 0 - 3,82 \times 10^{-5} - 11,2 \times 10^{-5} - 0 = -15,06 \times 10^{-5} [\text{м}]\end{aligned}$$

6) Определяем величину фактической глубины резания:

$$t_{f_{\text{вых1}}} = t_{f1} + \Delta t_{f_{\text{вых1}}} = 19,35 \times 10^{-5} + (-15,06 \times 10^{-5}) = 4,2 \times 10^{-5} [\text{м}]$$

7) Рассчитаем съём материала:

$$\begin{aligned}\Delta r_{\text{вых}} &= \frac{(4,2 \times 10^{-5})^2}{1,478 \times 4,2 \times 10^{-5} + \frac{13,66 * 2}{0,92 \times (50 + 2) \times (192 \times 10^3) \times \sqrt{0,125 \times 97,6 \times 10^{-6}}}} \\ &= 2,28 \times 10^{-6} [\text{м}]\end{aligned}$$

8) Величина слоя, в котором распределена шероховатость:

$$H_{\text{вых1}} = t_{f_{\text{вых1}}} - \Delta r_{\text{вых1}} = 4,2 \times 10^{-5} - 2,28 \times 10^{-6} = 4,05 \times 10^{-5} [\text{м}]$$

9) Рассчитаем силу резания:

$$\begin{aligned}P_{yi} &= 3\sqrt{2} \times 0,025 \times (192 \times 10^3) \\ &\quad \times \sqrt{97,6 \times 10^{-6} \times 6,4 \times 10^{-5} \times 4,05 \times 10^{-5} \times 0,125} \\ &\quad \times \left(0,055 \times 4,05 \times 10^{-5} \times \frac{0,5591}{0,3746} + 0,061 \right. \\ &\quad \left. \times \sqrt{97,6 \times 10^{-6} \times 6,4 \times 10^{-5}} \right) \times 0,72 \times 10^9 = 16,46 [\text{Н}]\end{aligned}$$

Полученные результаты расчетов сведены в таблицу 5.3.

Таблица 5.3 – Результаты расчета циклов профильного шлифования железнодорожных рельсов

Таблица 5.3. – Получ. Знач.	№Прохода	Δt	ΔR	Δr	t	ΔA	t, с	Pyi
Этап врезания	1	0,000108	0	0	0,000108	0,0000015393532	0,000000	50,59845557
	2	0,00008582	0,00001085	0,00001309	0,000194	0,00011	0,800003	91,22338263
	3	0,00005486	0,00001943	0,00003681	0,000249	0,00011	1,600013	67,91901852
	4	0,00002869	0,00002491	0,00005610	0,000278	0,00011	2,400028	74,80443300
	5	0,00001474	0,00002778	0,00006720	0,000293	0,00011	3,200045	78,32077165
	6	0,00000733	0,00002926	0,00007613	0,000300	0,00011	4,000065	80,06583352
	7	0,00000359	0,00002999	0,00007762	0,000303	0,000110	4,800086	80,91987582
Установившийся процесс	1	0	0,00003035	0,00007762	0,00030	0,0001079684	5,600106	80,91987582
	2	0	0,00003035	0,00007762	0,00030	0,0000000000	5,600106	80,91987582
	3	0	0,00003035	0,00007762	0,00030	0,0000000000	5,600106	80,91987582
Чистовая обработка	1	0,00011	0,00003035	0,00011240	0,00038	0,000000030	6,400136	99,60701444
Выхаживание	1	-0,00015069	0,00003829	0,00000229	0,00004	0	7,200136	16,46316850
				Сумма			Сумма	
				0,00067358			47,200832	

Суммарный съем $\sum \Delta r = 67,3 \cdot 10^{-5}$ м.

Суммарное время обработки $\tau_{осн} = 47,2$ с.

Для улучшения показателей шероховатости рабочей поверхности головок железнодорожных рельсов количество проходов рельсошлифовальным поездом может быть увеличено.

С целью повышения производительности операции профильного шлифования головок железнодорожных рельсов, возможно установить в посадочные места рельсошлифовального комплекса композиционные круги различной зернистости, объединяя в одном проходе рельсошлифовального поезда сразу два последовательно идущих технологических этапа (первый установить грубые круги, последующие – мелкозернистые).

Внедрение и проверка результатов исследования

Используя подъездные пути учебного полигона Самарского государственного университета путей сообщения и оборудование АО НПЦ «ИНФОТРАНС» и кафедры «Железнодорожный путь и строительство», проведены экспериментальные исследования целью которых являлось обоснование, проверка и дальнейшая разработка практических рекомендаций по повышению производительности процесса шлифования верхней части рабочей поверхности головок железнодорожных рельсов находящихся в пути рельсошлифовальными станками и другими самоходными специализированными единицами.

Исследуемый абразивный инструмент успешно прошел испытания в ООО «ПКФ» «СИМС» г. Самара при выполнении операций профильного шлифования рельсов и элементов стрелочных переводов и рекомендован для дальнейшего применения. Акт о внедрении результатов диссертационного исследования представлен в приложение П1.

Дальнейшие перспективы использования результатов настоящего исследования связаны с созданием и выводом на рынок, в условиях мелкосерийного малого инновационного инструментального производства нового абразивного инструмента, внедрением результатов работы в образовательный процесс обучающихся по направлению 23.05.06 «Строительство железных дорог, мостов и транспортных тоннелей».

Исследовался процесс шлифования верхней части поверхности катания объемнозакаленных железнодорожных рельсов типа Р65 рельсовой стали марки Э76ХФ имеющих на поверхности катания заводские неровности различной величины. В операции шлифования использовалась лабораторно-экспериментальная установка (см. рисунок 5.1) с традиционными и предлагаемыми композиционными шлифовальными кругами.

Технологический процесс механической обработки верхней части поверхности катания головки рельсов включает следующие технологические этапы: контролируется очертания поперечного профиля головок рельсов и оценивают фактический продольный профиль профилографом ПР-3(см. рисунок 5.2); определяется и фиксируются значения величин неровностей на поверхности катания рельсов; выявляются поверхностные дефекты и определяются геометрические размеры микротрещин с использованием металлографического микроскопа Альтами МЕТ П (см. рисунок 5.3), после чего происходит непосредственное шлифование поверхности катания головки рельса.



Рис. 5.1 - Общий вид лабораторно-экспериментальной установки



Рис. 5.2 - Контроль очертания поперечного профиля головки рельса профилографом ПР-3



Рис. 5.3 - Металлографический микроскоп Альтами МЕТ II

Продолжительность обработки рабочей поверхности катания рельсов по традиционной схеме составило $O_{\text{традиц}} = 12 \text{ мин } 48 \text{ с}$ (параметры неровности: длина 2 м, величина 0,35 мм левой рельсовой нити 1 подъездного пути учебного полигона СамГУПС).

С целью повышения производительности операции шлифования предлагается использовать новые композиционные шлифовальные круги с рабочей поверхностью состоящей из чередующихся сегментов абразивных и керамических вставок.

Продолжительность обработки рабочей поверхности катания рельсов по предлагаемой схеме составило $O_{\text{инновац}} = 9 \text{ мин } 48 \text{ с}$ (параметры неровности: длина 2,4 м, величина 0,38 мм правой рельсовой нити 1 подъездного пути).



Рис. 5.4 - Фрагмент ликвидации заводской неровности композиционным шлифовальным кругом на поверхности рельса

Производительность технологического процесса шлифования поверхности катания железнодорожных рельсов с предлагаемыми композиционными кругами повысилась в 1,35 раза.

Таким образом, экспериментальные исследования, выполненные в производственных условиях, подтверждают высокую эффективность технологических операций, предложенных автором в диссертационном исследовании.

5.2 Разработка практических рекомендаций по повышению производительности процесса шлифования поверхности катания головки рельса

В результате полученных, в ходе экспериментов параметров и показателей качества обработанной рабочей поверхности головки рельса, разработаны практические рекомендации по использованию

композиционных шлифовальных кругов с рабочей поверхностью состоящей из чередующихся сегментов бакелитовых и керамических (МАНКС) вставок.

В процессе оптимизации геометрических размеров чередующихся сегментов на рабочей поверхности АИ предлагается использовать шлифовальный круг с чередующимися режущими элементами двух типов с отличающейся твердостью и зернистостью абразива, имеющими на боковой поверхности круга форму трапеций, большие основания которых расположены противоположно друг другу.

Абразивный инструмент выполнен в виде чашечного цилиндрического шлифовального круга (см. рисунок 5.5), выполненный в виде тела с рабочей абразивной поверхностью, ограниченной внутренней (посадочное отверстие) и внешними окружностями.

Рабочая поверхность шлифовального круга образована чередующимися режущими элементами двух типов, которые на боковой поверхности круга выполнены в форме равнобоких трапеций, большие основания которых расположены противоположно друг другу. При этом основания трапеций этих элементов, как это видно из рисунка 5.5, ограничены с одной стороны торцевой поверхностью круга, а с другой - пунктирной линией, которая показывает толщину, на которую заделаны режущие элементы на модифицированной керамической связке.

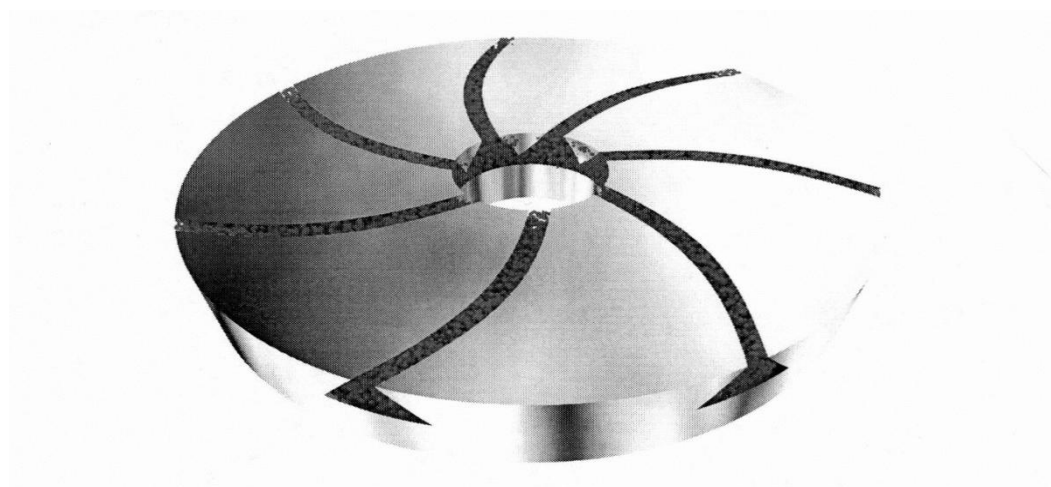


Рис. 5.5. - Общий вид композиционного шлифовального круга для обработки рабочей поверхности рельса

Толщина керамической модифицированной связки составляет $1/3 \div 1/2$ от толщины шлифовального круга, предпочтительно $1/3$.

Режущие элементы первого типа 2, площадь которых составляет 60 - 85 % от всей площади шлифовального круга, выполнены из абразивных зерен на бакелитовой связке, а элементы второго типа 3, площадь которых составляет 15 - 40 % от всей площади шлифовального круга - из абразивных зерен на керамической модифицированной связке.

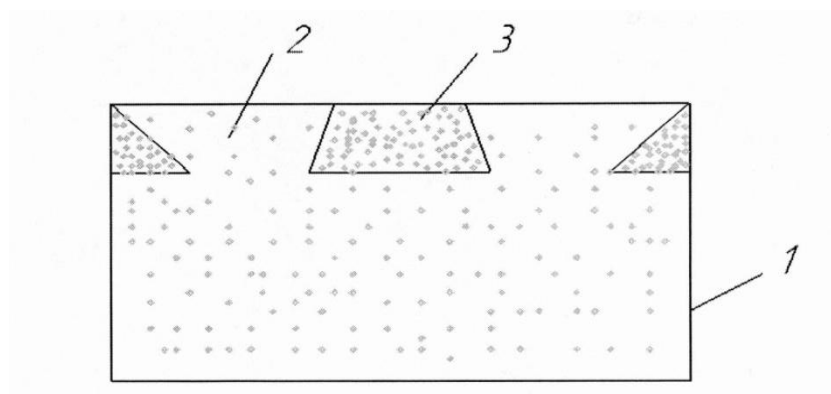


Рис. 5.6 - Рабочая поверхность композиционного шлифовального круга для обработки поверхности головки железнодорожных рельсов:

1 - контур композиционного шлифовального круга;

2 - режущий элемент первого типа на бакелитовой связке;

3 - режущий элемент второго типа на модифицированной керамической связке

Как видно из рисунка 5.5, указанные элементы 2, 3 выполнены в виде сегментов, равномерно чередующихся по всей плоскости одной из торцевых поверхностей круга. Боковые поверхности каждого из сегментов выполнены в виде спирали, располагающейся от внутренней до внешней окружности тела круга. При этом под боковыми поверхностями понимается вертикальные плоскости, образованные в местах соприкосновения друг с другом чередующихся сегментов, т.е. у каждого сегмента две боковые вертикальные поверхности.

Под сегментом в данной случае понимается часть торцевой поверхности круга, ограниченная частью внутренней и внешней окружностей тела круга, а также двумя боковыми поверхностями каждого из режущих элементов 2, 3.

Процесс изготовления предлагаемого композиционного шлифовального круга происходит следующим образом: корпус шлифовального круга 1 (см. рисунки 5.5 и 5.6) штампуются и спекается с режущими элементами 2 на бакелитовой связке. Режущие элементы 2 в осевом направлении (на боковой поверхности) имеют форму равнобоких трапеций.

Предварительно изготавливаются керамические сегменты заданных геометрических размеров. Абразивные элементы на модифицированной керамической связке изготавливают из предварительно сформированных элементов с последующим обжигом при температуре 1320 °С, которые в последствие устанавливают в бакелитовую шихту в процессе формовки и штамповки всего композиционного шлифовального круга.

После этого, композиционный шлифовальный круг спекают по технологии производства абразивных кругов на бакелитовой связке. Бакелизация всего композиционного шлифовального круга производится в бакелизаторе при температуре 190 - 210 °С.

В итоге получается композиционный абразивный круг с чередующимися режущими элементами 2 и 3 с отличающейся твердостью и зернистостью на разных видах связках.

Структура сегмента на бакелитовой связке (двухсоставная, поры составляют 11%, абразивный шлифматериал: электрокорунд нормальный марки - 14А микротвердостью 20 - 22 ГПа, механической прочностью 80%, абразивной способностью 82%, с прочностью единичного зерна - 20 Н).

Структура режущих элементов вставки МАНКС (трехсоставная, при этом средние размеры пор в структуре абразивного изделия 150 мкм - 5 - 15% в объеме, в состав абразивного шлифматериала помимо белого электрокорунда марки 25А, с микротвердостью 22 - 26 ГПа, механической прочностью 90 %, с абразивной способностью 162 %, прочностью единичного зерна - 30 Н внесены упрочняющие нанотрубки - с наружным диаметром 20 - 70 нм и длиной от 2 - 5 мкм).

Зернистость абразивного материала на бакелитовой связке F36, а на керамической F14, подбирается согласно ГОСТ Р 52381-2005 [112]

Проведенные эксплуатационные испытания исследуемого шлифовального круга с заявленными конструктивными особенностями показали высокие характеристики как самого круга, так и обработанной поверхности катания головки рельса, по сравнению с традиционными шлифовальными кругами используемыми на операциях профильного и профилактического шлифования железнодорожных рельсов.

Предлагаемый композиционный шлифовальный круг защищен охранным документом (патентом) ФИПС РФ, документ представлен в приложении ПЗ.

5.3 Выводы по главе

1. 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.

2. Спроектирован композиционный шлифовальный круг рабочая поверхность которого, выполнена в виде чередующихся режущих элементов двух типов с отличающейся твердостью и зернистостью абразива, боковая поверхность которых выполнена в форме трапеций, защищен охранным документом (патентом) федеральной службой интеллектуальной собственности РФ;

3. Разработано математическое описание операции шлифования железнодорожных рельсов, способствующая в любой момент времени при различных способах проведения шлифования определять: взаимное расположение инструмента и заготовки, параметры качества обработанной поверхности (среднее арифметическое отклонение профиля), выходные параметры технологического процесса (скорость съема припуска,

температуру в зоне контакта, составляющие сил резания). На основе разработанных теоретических и экспериментальных моделей, сформирована методика аналитического расчета режимов резания для операции шлифования железнодорожных рельсов.

4. Выполненное математическое описание операции шлифования железнодорожных рельсов, способствует выполнить задачу разработки методики расчета циклов управления операций профильного шлифования железнодорожных рельсов, при которых обеспечивается невысокая шероховатость поверхности катания и обеспечивается высокая производительность механической обработки поверхности рельсов.

5. Эффективность от применения предлагаемого композиционного шлифовального круга выявленная в ходе проведения экспериментальных исследований позволила сократить продолжительность обработки рабочей поверхности головки железнодорожного рельса с 12 мин 48 с до 9 мин 48 с, в результате удалось повысить производительность технологического процесса шлифования в 1,35 раза.

6. Практические рекомендации по шлифованию железнодорожных рельсов с использованием композиционных шлифовальных кругов с чередующимися режущими элементами двух типов с различной твердостью и зернистостью абразива, имеющими на боковой поверхности круга форму трапеций, успешно прошли испытания в ООО «ПКФ» «СИМС» г. Самара и рекомендованы для дальнейшего применения.

Ожидаемый экономический эффект от внедрения в производство композиционных шлифовальных кругов для торцевого шлифования рельсов составит 485600 руб. в год.

ОБЩИЕ ВЫВОодЫ И 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 - 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 40 Н при которых достигается съём припуска 24 мкм, стойкость круга при этом составляет T=7,4 ч; шероховатость обработанной поверхности составит R_{z,р.с} =65 мкм.

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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Абдурашитов, А. Ю.** Профильное шлифование рельсов: необходим комплексный подход // Путь и путевое хозяйство. - 2003, - №5. - С. 47-51.
2. Абразивная и алмазная обработка материалов: / Сост. А. Н. Резникова. – Москва: Машиностроение, 1977. – 391 с.
3. **Адам, Н.К.** Физика и химия поверхностей: монография / Н. К. Адам; пер. с англ. Д. М. Толстого. – М.–Л.: ГИТТЛ, 1974. – 552 с.
4. **Аксенов, В. А.** Управление качеством поверхностного слоя деталей машин и механизмов подвижного состава // Материалы Региональной научно-практической конференции «Транссиб-99»: В. А. Аксенов, А. А. Кузьменя. – Новосибирск: 1999. – 329 с.
5. **Аксенов, В. А.** Метод скоростного шлифования повышенной производительности // Тез. докл. регион, науч. - практич. конф. «Транссиб 99»: В. А. Аксенов, В. А. Шаламов, Н. М. Султан-Заде, А. Ю. Албагачиев, В. А. Комаров – Новосибирск: 1999. - С. 321 – 324.
6. **Аксенов, В. А.** Возможности повышения производительности шлифования рельсов в пути / В. А. Аксенов, В. А. Шаламов, О. А. Шаламова, А. А. Кузьменя; Сибирский государственный университет путей сообщения. - Новосибирск, 1998. - 12 с. (Рукопись деп. в ВИНТИ).
7. **Аксенов, В. А.** Технологические возможности повышения производительности шлифования рельсов в пути / В. А. Аксенов, В. А. Шаламов, О. А. Шаламова, А. А. Кузьменя. - Сб.: Проблемы повышения скоростей движения на Транссибирской магистрали. - Новосибирск, 1998. - С. 77 - 92.
8. **Алейников, С. М.** Метод граничных элементов в контактных задачах для упругих пространственно неоднородных оснований: – Москва: Изд-во АСВ, 2000. – 754 с.
9. **Анохин, В. И.** Совершенствование шлифовальных кругов для подшипниковой промышленности. Процессы абразивной обработки,

абразивные инструменты и материалы / В. И. Анохин, С. А. Крюков - Сб. тр. – Волжский, 1998. - С. 3 – 5.

10. **Ардашев, Д. В.** Оценка работоспособности шлифовального круга по комплексу эксплуатационных показателей: диссертация кандидата технических наук / Дмитрий Валерьевич Ардашев – Челябинск, 2005. – 254 с.

11. **Асимметричная шлифовка рельсов** // Путь и путевое хозяйство, 1993, - №3. - С. 39-41.

12. А.с. № 469582 (СССР), МКИЗ В24 D3/34, 1975.

13. А.с. № 831600 (СССР), МКИЗ В24 D3/100, 1981.

14. А.с. № 1463459 (СССР) МКИЗ В24 D3/14, 1989.

15. А.с. № 1526968 (СССР) МКИЗ В24 D3/14, 1989.

16. **Ахмеров, М. А.** Классифицированное зерно и его влияние на эксплуатационные показатели абразивного инструмента // Алмазная и абразивная обработка - сб. – Москва: МДНТП. – 1967. - С. 26 – 29.

17. **Багайсков, Ю. С.** Повышение эксплуатационных показателей изделий из абразивных композиционных материалов : монография / Ю. С. Багайсков, В. М. Шумячер / ВолгГАСУ, ВИСТех. – Волгоград: ВолгГАСУ, 2005. – 200 с.

18. **Багайсков, Ю. С.** Формирование рациональной композиционной структуры высокоэффективных абразивных инструментов на связующих различной упругости: автореферат диссертации доктора технических наук / Багайсков Юрий Сергеевич – Саратов, 2007. – 32 с.

19. **Байдакова, Н. В.** О влиянии формы абразивного зерна на режущую способность инструмента на операциях обдирки // Новые материалы и технологии / Н. В. Байдакова, С. А. Крюков - сб. материалов Всероссийской молодежной научн. конф. – Саратов: СГТУ, 2014. - С. 475 – 478.

20. **Байкалов, А.К.** Введение в теорию шлифования материалов. – Киев: Наукова думка, 1978. – 207 с.

21. **Бакаев, В.В.** Повышение стабильности режущих свойств шлифовальных кругов // Станки и инструменты. 1991. – № 5. – С. 23 – 27.

22. **Бакуль, В.Н.** Основы проектирования и технологии изготовления абразивного и алмазного инструмента. – Москва: Машиностроение, 1975. – 303 с.
23. **Бердиков, В.Ф.** Изучение физико-механических свойств абразивных материалов микроскопическими методами / В. Ф. Бердиков, Н. И. Богомолов, М. Д. Катрич, А. В. Бабанин // Тр. ВНИИАШ. – Москва: НИИМАШ. 1974. – № 15. – С. 32 – 40.
24. **Бердиков, В.Ф.** Исследование упругих и упруго-пластичных деформаций при моделировании точности абразивной обработки методом микроиндентирования. Точность автоматизированных производств / В. Ф. Бердиков, С. А. Крюков, А. В. Славин: сб. ст. Междунар. научн.-техн. конф. ТАП-97. – Пенза, 1997. – С. 154 – 156.
25. **Биргер, И.А.** Остаточные напряжения, Москва: «Машгиз», 1963. – 231 с.
26. **Болотин, В.В.** Объединенная модель разрушения композитных материалов при длительно действующих нагрузках // Механика композиционных материалов: 1981. № 3. – С. 405 – 420.
27. **Ваксер, Д. Б.** Пути повышения производительности абразивного инструмента при шлифовании. – М. – Л.: Машиностроение, 1964. – 124 с.
28. **Васин, В. М.** Эффективность использования абразивных кругов, пропитанных серой // Абразивы. 1977. – № 4. – С. 6 – 7.
29. **Вишняков, Я. Д.** Управление остаточными напряжениями в металлах и сплавах – Москва: Металлургия, 1989. – 252 с.
30. **Влияние термической обработки и специальных покрытий на механическую прочность абразивного зерна** // Абразивы: Н. П. Згонник, [и др]; – 1972. – № 10. – С. 8 – 9.
31. **Волков, М. П.** Влияние гранулометрического состава и формы зерен на процесс тонкого шлифования // Абразивы / М. П. Волков, Е. Г. Бандура, В. А. Смирнов. 1975. – № 8. – С. 14 – 17.

32. **Волков, М. П.** Влияние гранулометрического состава абразива на рельеф поверхности шлифовального круга и эффективность процесса тонкого шлифования // Абразивы. 1976. – № 4. – С. 4 – 7.
33. **Вульф, А. М.** Влияние формы абразивных зерен на эксплуатационные свойства кругов при обдирочном шлифовании // Абразивы / А. М. Вульф, А. В. Мурдасов. 1968. – № 6. – С. 19 – 22.
34. **Гайдамакина, О. В.** Зачем шлифуют рельсы // Путь и путевое хозяйство. 2002. - №4. – 21 с.
35. **Гликман, Л. А.** О возникновении остаточных напряжений при шлифовании // ЖТФ. / Л. А. Гликман, В. А. 1946. - Т. XVI. - выи. 7. - С. 134 - 141.
36. **Голубцова, Е. С.** Статистические методы исследования конструкционной керамики: монография / Е. С. Голубцова, Б. А. Каледин. – Мн.: УП «Технопринт». 2004. – 259 с.
37. **Горбунов, Г. И.** Основы строительного материаловедения: учебное издание / Москва: Изд-во АСВ, 2002. – 168 с.
38. **ГОСТ Р 51685-2013.** Рельсы железнодорожные. Общие технические условия. – Москва: Стандартиформ, 2014. - 101 с.
39. **Гришин, Я. В.** Пропитка серой мелкозернистого абразивного инструмента центробежным способом // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы: сб. тр. – Волжский, 1997. – С. 49 – 51.
40. **Гусев, В. Г.** Выбор схемы дискретизации режущей поверхности шлифовального круга // Станки и инструмент. – 2009. – № 6. – С. 15 – 19.
41. **Гусев, В. Г.** Выбор схемы сегментов, обеспечивающей повышение стойкости дискретного торцового шлифовального инструмента / В. Г. Гусев, П. С. Швагирев, А. В. Морозов // Повышение качества продукции и эффективности производства. (Серия. «Технические науки»): материалы Межд. науч.-техн. конф. – Вестник курганского ун-та, 2006. – Вып. 2. Ч. 1. – С. 145-146. – ISBN 85-86328-821-3.

42. **Давиденков, Н.Н.** Избранные труды: В 2-х т. Т.2. механические свойства материалов и методы измерения деформаций. Москва: Металлургия, 1981. - 655 с.

43. **Дальский, А. М.** Справочник технолога-машиностроителя: в 2-х т. Т. 2 / Под ред. А. М. Дальского, А. Г. Сулова [и др.]. – 5-е изд., перераб, и доп. – Москва: Машиностроение –1, 2001. – 944 с.

44. **Дмитриева, О.В.** специальность 05.02.08. Возможности повышения долговечности рельсов за счет рациональных режимов и условий шлифования их в пути: диссертация кандидата технических наук / Дмитриева Ольга Викторовна; Новосибирск, 2003. - 130 с.

45. **Дружина, З. И.** Защитная роль пропиточных составов при шлифовании с применением водных СОЖ // Э.И. Абразивы / З. И. Дружина, О. В. Крапивкина // НИИМАШ, 1981. – № 6. – С. 7 – 10.

46. **Евсеев, Д. Г.** Физические основы процесса шлифования / Д. Г. Евсеев, А. Н. Сальников. Саратов, СГУ, 1978. - 129 с.

47. **Ефимов, В.В.** Научные основы техники подачи СОЖ при шлифовании. – Саратов: Изд-во СГУ, 1985. – 140 с.

48. **Зайцева, С.А.** О результатах испытаний рельсошлифовального комплекса. - Москва, 1992. - 40 с.

49. **Захаренко, И. П.** Об устойчивости зерен в связке шлифовального круга // Синтетические алмазы / И. П. Захаренко, Э. А. Ахундов. – 1978. – № 6. – С. 24 – 28.

50. **Зубарев, Ю. М.** Плоское шлифование. Оборудование, оснастка, технологии / Ю. М. Зубарев, В. Г. Юрьев, В. В. Звоновских. – Москва: Спектр, 2014. – 23 с.

51. **Ивашинников, В. Т.** Режущие свойства шлифовальных кругов с различным содержанием зерна при постоянной твердости // Абразивы. –1967. – № 2. – С. 28 – 31.

52. **Изготовление шлифовальных кругов повышенной твердости и прочности путем использования шлифовальных материалов различных**

зернистостей / Ю. Ф. Юликова [и др.] // Абразивы: Экспресс информация. – Москва, 1981. Вып. 1. – С. 6 – 12.

53. Ильиных, А.С. специальность 05.02.08. Возможности управления уровнем эксплуатационных свойств рельсов в пути шлифованием: диссертация кандидата технических наук / Ильиных Андрей Степанович; Новосибирск, 2005. - 140 с.

54. Ильиных, А.С. Обобщенная математическая модель процесса профильного шлифования рельсов // Вестник Восточно-Украинского национального университета имени В. Даля. -2012. - № 5 (176). 4.2. С. 11-18.

55. Ильиных, А.С. Автоматизированная система проектирования технологического процесса шлифования рельсов // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций имени М. Тынышпаева. -2012. - № 4 (77). С. 4-7.

56. Ильиных, А.С. Особенности современной ресурсосберегающей технологии шлифования рельсов в пути // Политранспортные системы: материалы VII Всероссийской научно-технической конференции. - Красноярск: СГУПС, 2010. С. 249-253.

57. Импрегнирование шлифовальных кругов // Реф. обзор Волжского ф-ла ВНИИАШ. – Волжский, 1982. – 45 с.

58. Караулов, Е. В. Влияние структуры абразивного инструмента на технологические показатели процесса шлифования // Процессы абразивной обработки, абразивные инструмента и материалы / Е. В. Караулов, С. А. Крюков. Шлифабразив - 2004: сб. ст. Междун. науч.-техн. конф. / ВолгГАСУ; ВИСТех (филиал) ВолгГАСУ. – Волгоград, 2004. – С. 73 – 74.

59. Карпов, А. Б. Исследование взаимодействия зерна и связки шлифовальных инструментов при динамических нагрузках: автореферат кандидат технических наук / Карпов Александр Борисович; Москва, 1973. – 18 с.

60. **Клименко, В. А.** Особенности импрегнирования крупногабаритных шлифовальных кругов // Подшипниковая промышленность. – 1983. – Вып. 8. – С. – 9 – 14.

61. **Клименко, В. А.** Повышение эксплуатационных свойств абразивного инструмента импрегнированием // Обзор НИИАвтопром / В. А. Клименко, В. Н. Степанов – Москва, 1979. – 58 с.

62. **Козлов, А. М.** Моделирование взаимодействия единичного абразивного зерна с обрабатываемой поверхностью / А. М. Козлов. – Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки: сб. тр. междунар.науч.-техн. конф. – Ростов-на Дону, 2013. – Издательский центр ДГТУ. – 467 с. – С. 322 – 326.

63. **Козлов, А. М.** Повышение производительности шлифования путем управления строением рабочего слоя шлифовальных кругов / А. М. Козлов, А.Е. Косых. – Модернизация машиностроительного комплекса России на научных основах технологии машиностроения (ТМ-2011): Сб. тр. 3-й Межд. науч.-техн. конф. / Под общ. ред. А. Г. Сулова. – Брянск: Десяточка, 2011. – С.52-53.

64. **Козловский, И. С.** Влияние упрочняющего шлифования на структуру и свойства стали 45 // Металловедение и термическая обработка металлов / И. С. Козловский, Я. М. Наерман, 1982. - №4. - С. 48-51.

65. **Коломазин, В.М.** Выбор охлаждающей среды и температуры закалки для специальной термической обработки абразивного инструмента на керамической связке // Абразивы. – 1975. – № 5. – С. 28 – 31.

66. **Копатилов, В. И.** Шихта для получения абразивных изделий высокой плотности // Абразивы. – 1973. – № 5. – С. 10 – 11.

67. **Королев, А. В.** Новоселов Ю.К. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки. – Ч. I. Состояние рабочей поверхности инструмента. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1987. – 160 с.

68. **Костенко, Н. А.** Шлифование жаропрочных сплавов специальными двухабразивными кругами // ПНТПО № 6-66-1055/314. – Москва: ГОСНИТИ, 1966. – С. 32 – 34.

69. **Кремень, З. И.** Технология шлифования в машиностроении / под общ. ред. З.И. Кременя, Юрьев В.Г., Бабошкин А.Ф.– СПб: Политехника, 2007. – 424 с.

70. **Крысанов, Л. Г.** Эффективность профильной обработки рельсов // Путь и путевое хозяйство, 1996. - №12. - С. 2-6.

71. **Крюков, С. А.** Управление структурно-механическими свойствами абразивных инструментов // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты, материалы / С. А. Крюков, Д. А. Гусельников: сб. ст. Междунар. научн.-техн. конф. – Волжский, 2004. – С. 71 – 73.

72. **Крюков, С. А.** Зависимость прочности абразивных инструментов от их структурных характеристик // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. Шлифабразив - 2005: сб. ст. Междунар. научн.-техн. конф. Волжский. – Волгоград, 2005. – С. 216.

73. **Крюков, С. А.** Исследование влияния внешней среды на твердость и эксплуатационные показатели абразивного инструмента. Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы / С. А. Крюков, А. И. Мироседи: Шлифабразив-2000: сб. ст. Междунар. научн.-техн. конф. Волжский. – Волгоград, 2000. – С. 197 – 198.

74. **Крюков, С. А.** специальность 05.03.01, 05.02.08. Совершенствование процесса шлифования путем стабилизации структурно-механических свойств абразивного инструмента: диссертация кандидата технических наук. / Крюков Сергей Анатольевич – Волжский: ВИСИ, 2000. – 149 с.

75. **Крюков, С. А.** Модифицирование высокопористых шлифовальных инструментов адгезионно-инертным к связке абразивным наполнителем // Справочник. Инженерный журнал. – 2014. – 12. – С. 35 – 38.

76. **Кузьменя, А. А.** специальность 05.02.08. Повышение эффективности технологических процессов шлифования рельсов в пути: диссертация кандидата технических наук / Кузьменя Алексей Александрович - Москва: 2000. - 137 с.

77. **Кудасов, Г. Ф.** Плоское шлифование. Л., 1967. - 107 с.

78. **Кудасов, Г. Ф.** Шлифование торцом круга. М., 1940. - 124 с.

79. **Кудряшов, Б. П.** Разработка абразивных кругов со специальной структурой для шлифования быстрорежущих сталей: диссертация кандидата технических наук / Кудряшов Б. П. – 1983. – 181 с.

80. **Кулаков, Ю. М.** Предотвращение дефектов при шлифовании / Ю. М. Кулаков, В. А. Хрульков, И. В. Дунин-Барковский – Москва: Машиностроение, 1975. – 144 с.

81. **Курдюков, В. И.** специальность 05.03.01. Научные основы проектирования, изготовления и эксплуатации абразивного инструмента: диссертация доктора технических наук / Курдюков Владимир Ильич – Курган, 2000. – 496 с.

82. **Кэмпбэлл, Дж.** Шлифовка рельсов в процессе технического содержания пути в кривых /Дж. Кэмпбэлл, Е. Томсен. Перевод П19838. ЦНИИТЭИ МПС, 1981. - 5 с.

83. **Лищенко, Н. В.** Температура при шлифовании прерывистыми и высокопористыми кругами / Н.В. Лищенко, В. П. Ларшин. – Одесса: Вектор науки ТГУ, 2015. – №3-1(33-1). – С. 75 – 82.

84. **Лурье, Г. Б.** Шлифование металлов. – Москва: Машиностроение, 1969. – 172 с.

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

86. **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.

87. **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.

88. **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.

89. **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.

90. **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.

91. **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.

92. **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.

93. **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.

94. **Максимов, И.С.** Технология шлифования рельсов для скоростного движения поездов / И.С. Максимов, В.Г. Рахчеев, Е.С. Ефремова // В сборнике: Техника и технология наземного транспорта. Материалы международной студенческой научно-практической конференции. В 2-х частях. Науч. редактор Н.В. Пшенисцов, сост. А.Н. Сидоров. Нижний Новгород, 2020. С. 165-168.

95. **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.

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

97. **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.

98. **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.

99. **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.

100. **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.

101. **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.

102. **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.

103. **Маслов, Е. Н.** Теория шлифования материалов – Москва: Машиностроение, 1974. – 319 с.

104. **Маслов, Е. Н.** Основы теории шлифования металлов. Москва, 1951. - 180 с.

105. **Маталин, А. А.** Качество поверхности и эксплуатационные свойства деталей машин. М.-Л., 1956. - 252 с.

106. **Мацуи.** Механизм резания абразивными зернами; пер с яп. Какаймоккю. – 1971. – 23. – № 12. – С. 1611 – 1616.

107. **Мироседи, А. И.** специальность 05.03.01. Повышение эффективности шлифования путем совершенствования структуры инструмента с учетом результатов стохастического моделирования: диссертация кандидата технических наук / Мироседи Александр Ильич. – Волжский, 2007. – 158 с.

108. **Моделирование технологических процессов абразивной обработки:** монография / Г. В. Барсуков, Л. Г. Вайнер, Ю. С. Степанов и др. // Под ред. Ю. С. Степанова и А. В. Киричека. – Москва: Изд. дом Спектр, 2011. – 256 с.

109. **Морозов, А. В.** Дискретизация режущей поверхности шлифовальных кругов, работающих периферией / В. Г. Гусев, А. В. Морозов,

П. С. Швагирев // Материалы Межд. НТК «Повышение качества продукции и эффективности производства». - Вестник КГУ, 2006 №1. – С. 143–145.

110. **Одинг, И. А.** Допускаемые напряжения в машиностроении и циклическая прочность металлов - Москва, 1962. - 260 с.

111. **Оптимизация характеристик абразивного инструмента для рельсошлифовального поезда РШП-48** / Б. А. Чаплыгин, В. В. Райт, В. А. Шаламов, И. А. Филиппов // Инструмент Сибири, К 2, 2001. - С 14 - 15.

112. **Опыт применения рельсошлифовальных поездов с активными рабочими органами на отечественных железных дорогах** / В. Г. Альбрехт, А. П. Галунин, Л. Г. Крысанов, А. Н. Русин // Ж.-д. трансп. Сер. Путь и путевое хозяйство: ЭИ / ЦНРШТЭИ МПС, 1995. Вып. 3. - С. 12-18.

113. **Оробинский, В. М.** Исследование стабильности процесса скоростного шлифования // Прогрессивные технологии в машиностроении А. Н. Воронцова, В. В. Воронцов: межвуз. сб. науч. тр. – Волгоград: РПК «Политехника». – С. 61 – 66.

114. **Осипов, А. П.** специальность 05.02.08; 05.03.01. Оптимизация процесса шлифования на основе целенаправленного формирования рабочей поверхности абразивного инструмента: автореферат диссертации кандидата технических наук / Осипов Александр Петрович – Самара, 1999. – 28 с.

115. **Особенности продольной шлифовки рельсов** / Л. Г. Крысанов, В. А. Рейхарт, А. Ю. Абдурашитов, В. М. Григорьев // Путь и путевое хозяйство, 1998. №6. - С. 8-10.

116. **Островский, В. И.** Улучшение эксплуатационных свойств шлифовальных кругов путем пропитки. Экономичность и точность абразивно - алмазной обработки. – Л., 1971. – № 1. – С. 20 – 28.

117. **Отказы рельсов и продление их срока службы** / В. Ф. Скубак, В. Л. Порошин, В. В. Порошин, О. И. Цысь // Путь и путевое хозяйство, 1997. №5. - С. 10-12.

118. **О явлениях, происходящих в поверхностном слое при шлифовании** / В. А. Сипайлов, А. В. Якимов, В. И. Потемкин, С. А. Иванов // Вестник машиностроения, 1966, №3, - С. 69-72.

119. **Пат.** 2215643 РФ. Абразивный инструмент / В. М. Шумячер, В. А. Назаренко, С. А. Крюков, И. В. Дуличенко // Бюл. № 31. – 2003. – 2 с.

120. **Пат.** 2697542 РФ. Композиционный шлифовальный круг для торцевого шлифования / В. Г. Рахчеев, И. С. Максимов, С. А. Галанский, А. Г. Мустафин, В. В. Денисов, М. В. Прусов // Бюл. №23. - 2019.

121. **Пат.** 2183551 РФ. Комбинированный шлифовальный круг / Л. В. Худобин, Г. Р. Муслина, Ю. М. Правиков // Бюл. №17. - 2002.

122. **Пат.** 1526953 США. Сегментный шлифовальный круг / Hugo W. W. Оpubл. - 1925.

123. **Пат.** 2319600 РФ. Шлифовальный круг / В. И. Бутенко, Д. И. Диденко // Бюл. № 8. - 2008.

124. **Пат.** 2395381 РФ. Шлифовальный инструмент / В. И. Бутенко, Д. С. Дуров, Л. В. Гусакова. // Бюл. № 21. - 2010.

125. **Пат.** 2574183 РФ. Масса для изготовления абразивного инструмента / В. И. Бутенко // Бюл. № 4. - 2016.

126. **Пат.** 2354534 РФ. Масса для изготовления абразивного инструмента / В. М. Шумячер, А. В. Славин, С. А. Крюков // Бюл. № 13. – 2009.

127. **Пат.** Япон. Способ изготовления абразивных инструментов / Иноуэ Киеси // № 50-6397, 13.03.75. РЖ. Техн. маш., 1976, 2Б387П.

128. **Пат.** Япон. Шлифовальный круг / Массуда Цунэо // № 52-47198, 01.11.77. РЖ. Техн. маш., 1978, 9А763П.

129. **Пат.** 2262434 РФ. Масса для изготовления абразивного инструмента / В. М. Шумячер, А. В. Славин, И. В. Дуличенко, С. А. Крюков // Бюл. № 29. – 2005. – 3 с.

130. **Переладов, А. Б.** Расчет сил резания при шлифовании / А. Б. Переладов, И. В. Кожевников // Проблемы качества технологической

подготовки: сб. статей. – Волгоград: Волжский, 2007. – С. 289 – 291. – ISBN 978-598276-128-8.

131. **Пицына, Л. Г.** Изучение поверхности разрыва абразивного черепка на керамической связке // Абразивы / Л. Г. Пицына, А. В. Мурдасов, В. Т. Ивашинников – 1973. – № 8. – С. 15 – 17.

132. **Поведение колесных и рельсовых сталей при износе** // Железные дороги мира. - 2001, №6. - С. 72-76.

133. **Подзей, А. В.** Технологические остаточные напряжения. Москва: Машиностроение, 1973.

134. **Полубелова, А. С.** Производство абразивных материалов / А. С. Полубелова, В. Н. Крылов [и др.] – М. – Л.: Машиностроение, 1968. – 124 с.

135. **Попов, С. А.** Шлифование высокопористыми кругами / А. С. Попов, Р. В. Ананьев – Москва: Машиностроение, 1980. – 80 с.

136. **Попов, С. А.** Влияние однородности зернового состава абразива и формы зерен на рельеф режущей поверхности шлифовальных кругов // Абразивы / С. А. Попов, Л. С. Соколова – 1972. – № 12. – С. 2 – 6.

137. **Прогрессивные машиностроительные технологии, оборудование и инструменты:** коллективная монография / А. Ю. Албагачиев, А. А. Дьяконов, Ю. С. Степанов [и др.] // Под ред. А. В. Киричека. – Москва: Изд. Дом «Спектр», 2014. – 304 с.

138. **Окада, С.** Прочность шлифовальных кругов / ВЦП. – № Ц-58020; пер. с англ. // Сэрамиккусу. – 1973. – Т. 8. – № 10. – С. 824 – 832.

139. **Профильное шлифование рельсов на замкнутых маршрутах** // Железные дороги мира. - 2001, - № 1. - С. 68-71.

140. **Равицкая, Т. М.** О механизме и природе образования контактно - усталостных дефектов // Производство, качество и стойкость железнодорожных рельсов: Сб. науч. Трудов - Москва, 1966. - С. 326 - 335.

141. **Равицкая, Т. М.** К вопросу о механизме образования дефектов контактного происхождения в головках рельсов // Технология производства и

свойства черных металлов / Т. М. Равицкая, Д. С. Казарновский : Сб. науч. Трудов - Москва, 1965. - Вып. XI. - С. 324-334.

142. Распоряжение ОАО «РЖД» № 2499р от 23.10.2014 Об утверждении и введении в действие инструкции «Дефекты рельсов. Классификация, каталог и параметры дефектных и остродефектных рельсов».

143. **Расчеты машиностроительных конструкций методом конечных элементов:** справочник / В. И. Мяченков, В. П. Мальцев, В. П. Майборода [и др]; под общ. ред. В. М. Мяченкова. – Москва: Машиностроение, 1989. – 520 с.

144. **Рахчеев, В. Г.** Математическая модель влияния неплоскостности торца колец конических подшипников на формирование дорожек качения при шлифовании / Ю. П. Самарин, А. Н. Филин, В. Г. Рахчеев, Д. А. Лапенков // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки, 1999. - № 7. - С. 163-169.

145. **Рахчеев, В. Г.** Технология полировки рабочих поверхностей деталей из деформируемых алюминиевых сплавов / В. Г. Рахчеев, А. Б. Пашенцев, А. Н. Журавлев // Тяжелое машиностроение, 2005. - № 6. - С. 42.

146. **Рахчеев, В. Г.** Повышение эффективности суперфиниширования фасонных поверхностей прецизионных деталей / В. Г. Рахчеев, К. Ю. Лукьянов, А. Н. Журавлев // Тяжелое машиностроение, 2006. - № 1. - С. 42-43.

147. **Рахчеев, В. Г.** Повышение точности шлифования рельсов в пути на основе синхронизации износа рабочей поверхности абразивного круга / В. Г. Рахчеев, А. С. Лысак // Вестник СамГУПС, 2009. - № 6-2. - С. 153-157.

148. **Рахчеев, В. Г.** Моделирование процесса шлифования рельсов пути / А. С. Лысак, В. Г. Рахчеев // Вестник СамГУПС, 2009. - № 6-2. - С. 146-153.

149. **Рахчеев, В. Г.** Моделирование напряженно-деформированного состояния контактирующих поверхностей опор качения / К. Ю. Лукьянов,

А. Б. Пашенцев, В. Г. Рахчеев // Вестник транспорта Поволжья, 2009. - № 2 (18). - С. 49-57.

150. **Рахчеев, В. Г.** Современные шлифовальные инструменты: монография / В. Г. Рахчеев [и др.]. - Москва: Машиностроение, 2009. - 205 с.

151. **Рахчеев, В. Г.** Перспективный метод шлифования рельсов / И. И. Малинина, В. Г. Рахчеев // В сборнике: Передовые методы организации, содержания и ремонта пути на грузонапряженных участках. Материалы III Международной студенческой научно-практической конференции. Московский государственный университет путей сообщения, филиал в Н. Новгороде; редактор: Н. В. Пшениснова. 2015. - С. 73-76.

152. **Рахчеев, В. Г.** Способ обеспечения точности формы головки рельса при шлифовании / Н. Г. Тропанова, В. Г. Рахчеев, С. В. Кириченко // Вестник транспорта Поволжья, 2018. - № 5 (71). - С. 96-100.

153. **Ребиндер, П. А.** Поверхностно-активные вещества. – Москва: Знание, 1961. – 46 с.

154. **Ребиндер, П. А.** Поверхностные явления в дисперсных системах // Физико-химическая механика: избр. тр. – Москва: Наука, 1979. – 384 с.

155. **Рейхарт, В. А.** Почему ломаются рельсы // Путь и путевое хозяйство / В. А. Рейхарт, Т. П. Дудкина. - 1996. - №8. - С. 2 - 4.

156. **Редько, С. Г.** Процессы теплообразования при шлифовании металлов. – Саратов: Изд-во СГУ, 1967. – 215 с.

157. **Рыбаков, В. А.** Влияние формы абразивных зерен на технологические факторы при прессовании изделий и физико-механические свойства абразивно-керамических черепков // Абразивы / С. Г. Воронов, Р. Г. Козинцева. - 1966. – № 4. – С. 20 – 24.

158. **Саутвилл, К. Б.** Высокопористые шлифовальные круги // Режущие инструменты. Эксперсс-инф. – 1975. – № 36. – С. 17 – 24.

159. **Сегерлинд, Л.** Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд. – Москва: Мир, 1979. – 392 с.

160. **Сипайлов, В. А.** Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности – Москва. – 1978. - 167 с.
161. **Сиротин, В. П.** специальность 05.03.01. Исследование влияния строения и конструкции шлифовальных кругов на их режущую способность и качество поверхностного слоя шлифуемых деталей: диссертация кандидата технических наук / Сиротин Владимир Петрович – Одесса, 1980. – 270 с.
162. **Славин, А. В.** Модель оптимизации вариантов инновационно-технологических решений по выбору абразивного инструмента // Технология машиностроения / А. В. Славин, С. А. Крюков, Н. В. Байдакова. – 2009. – № 10. – С. 43 – 45.
163. **Сотоо, М.** Прочность шлифовальных кругов / ВЦП. – № Ц-11807; пер. с англ. // Кикай то Когу. – 1972. – Т. 16. – № 2. – С. 1 – 18.
164. **Спиридонов, А. А.** Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. Москва: Машиностроение, 1981, - 184 с.
165. **Старков, В. К.** Элементная модель строения абразивного инструмента // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы / В. К. Старков, С. С. Големи. Шлифабразив - 2005: сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф. – Волжский, 2005. – С. 7 – 9.
166. **Степанов, Ю. С.** Высокоэффективные способы шлифования / Ю. С. Степанов, Б. И. Афанасьев, О. В. Болдин. Фундаментальные и прикладные проблемы технологии машиностроения: Мат-лы Межд. науч.-техн. интернет конф. // Под общ. ред. В. А. Голенкова, Ю. С. Степанова. – Орел: ОрелГТУ, 2002. – С. 32 – 37.
167. **Стратиевский, И. Х.** Абразивная обработка: сборник / И. Х. Стратиевский, В. Г. Юрьев, Ю. М. Зубарев. – Москва: Машиностроение, 2010. – 352 с. – ISBN 978-5-94275-522-5.
168. **Строение керамики и его влияние на свойства. Неорганические материалы:** Т. 6 / Л. Е. Адушкин, В. С. Бакунов, И. Я. Гузман, Д. Н. Полубояринов. – 1970. – № 4. - С. 753 – 758.

169. **Теклин, В. Г.** Шлифование рельсов в пути // Ж.-д. трансп. за рубежом. Сер. 4. Путь и путевое хозяйство. Проектирование и стр-во: ЭИ / ЦНИИТЭИ МПС, 1994. - Вых. 2. - С. 1-5.

170. **Улучшенная технология шлифовки рельсов** // Путь и путевое хозяйство, 1994. - № 5. - С. 40-43.

171. **Улучшенные технические критерии шлифования рельсов** // Ж.-д. мира, 1997. - № 11. - С. 61-65, 80.

172. **Управление надежностью бесстыкового пути.** / В. С. Лысюк, В. Т. Семенов, В. М. Ермаков, Н. Б. Зверев, Л. В. Башкатова. Москва, 1999. - 373 с.

173. **Управление техническим состоянием пути** / Н. И. Карпущепко, В. А. Грищенко, Г. К. Щенотин [и др.]. Новосибирск, 1995. - 205 с.

174. **Федорова, Е. Д.** О некоторых способах повышения прочности зерна нормального электрокорунда для силового шлифования // Абразивы. – Москва, 1972. – № 10. – С. 20.

175. **Фефелов, В. Н.** Экспериментальные исследования процесса профильного шлифования // Материалы науч. - технич. конф. «Наука и молодежь XXI века». - Новосибирск, 2004. - С. 143 - 144.

176. **Фефелов, В. Н.** Экспериментальное определение эксплуатационных характеристик работы абразивного инструмента // Тезисы докладов студенческой конф. СГУПС «Дни науки-2005». / В. Н. Фефелов, Д. В. Томилов - Новосибирск, 2005 - С. 64

177. **Фефелов, В. Н.** Совершенствование технологического процесса шлифования рельсов за счет оптимизации параметров абразивного инструмента // Тезисы докладов студенческой конф. СГУПС «Дни науки-2004». - Новосибирск. 2004 - С. 83

178. **Филимонов, Л. Н.** Стойкость шлифовальных кругов. – Л.: Машиностроение, 1973. – 136 с.

179. **Филиппов, И. А.** Повышение эффективности процесса шлифования рельсов в пути за счет улучшения эксплуатационных

показателей абразивного инструмента // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. - Новосибирск, 2002. - 137 с.

180. **Функе, О. Х.** Шлифовка рельсов // Пер. с немецкого А. И. Козырева, под ред. И. В. Бирюкова, В. В. Лядова. Москва, 1992. - 167 с.

181. **Хостикоев, М. З.** Резервы повышения эффективности шлифования // Технология, организация и экономика машиностроительного производства / М. З. Хостикоев, Н. А. Никитина: реф. сб. – Москва, 1983. – № 6. – С. 3 – 4.

182. **Худобин, Л. В.** Шлифование композиционными кругами / Л. В. Худобин, Н. И. Веткасов. – Ульяновск: УлГТУ, 2004. – 256 с.

183. **Хрульков, В. А.** Изменение характеристики круга и процесса шлифования под воздействием смазочно-охлаждающих жидкостей // Разработка и применение смазочно-охлаждающих жидкостей при резании металлов / В. А. Хрульков, Ю. М. Кулаков – Москва, 1966. – С. 58 – 71.

184. **Шаламов, В. А.** Мониторинг эксплуатационных свойств рельсов на основе современных технологий и технических средств / В. А. Шаламов, С. В. Щелоков, И. Я. Пименов // Сборник трудов XV международной науч.-технич. конф. «Проблемы развития рельсового транспорта». Часть 2. Луганск, 2005. - С. 223-227.

185. **Шаламова, О. А.** специальность 05.02.08. Повышение эксплуатационной стойкости рельсов за счет выбора рациональных режимов и условий технологического процесса шлифования. Диссертация кандидата технических наук / Шаламова Оксана Александровна: Новосибирск, 2001, - 125 с.

186. **Швагирев, П. С.** Направления совершенствования процесса плоского торцового шлифования / П. С. Швагирев, С. А. Назаренков // Актуальные проблемы машиностроения: материалы Всерос. науч.-техн. конф. / Владимир. гос. ун-т; под ред. В. Ф. Коростелева. – Владимир, ПУ «РОСТ» ВООО ВОИ, 2011. – С. 91– 93. – ISBN 978-5-93907-061-4.

187. **Шумячер, В. М.** Влияние внешних воздействий на качество пропитывания абразивного инструмента импрегнаторами / В. М. Шумячер,

С. А. Крюков // Материалы и технологии XXI века: сб. матер. Всерос. науч.-техн. конф. – Ч.III. – Пенза, 2001. – С. 43 – 44.

188. **Шумячер, В. М.** Модель взаимодействия абразивного зерна и обрабатываемого материала при шлифовании. Схема стружкообразования / В. М. Шумячер, А. В. Кадильников // Технология машиностроения. – 2007. – № 4. – С. 18 – 21.

189. **Щелачева, Е. Г.** Факторное планирование эксперимента при расчете рецептуры формовочных масс / Е. Г. Щелачева, С. М. Федотова, Г. Ш. Ройтштейн. НИИАШ // Абразивы. – Москва, 1975. – Вып. 1 (127). – С. 13 – 16.

190. **Юркова, Е. О.** специальность 05.02.08. Повышение производительности технологического процесса восстановления служебных свойств рельсов шлифованием за счет оптимизации выбора ремонтных профилей. Диссертация кандидата технических наук / Юркова Елена Олеговна: Новосибирск, 2001, - 138 с.

191. **Якимов, А. В.** Прерывистое шлифование / А. В. Якимов. – Киев; Одесса: Вища школа, 1986. – 176 с.

192. **Якобсон, М. О.** Шероховатость, наклеп и остаточные напряжения при механической обработке. - Москва, 1956. - 292 с.

193. **Якубовский, Е. С.** О методах обработки поверхности абразивных материалов и синтетических алмазов для улучшения их смачиваемости / Е. С. Якубовский, Ф. И. Эйдельштейн, А. А. Ломова // Абразивы и алмазы. – 1966. – № 2 – С. 9 – 14.

194. **Ящерицын, П. И.** Повышение эксплуатационных свойств шлифованных поверхностей. - Минск, 1966. - 145 с.

195. **Ящерицын, П. И.** Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах / П. И. Ящерицын, М. Л. Еременко, Е. Э. Фельдштейн. – Минск: Вышэйшая школа, 1990. – 512 с.

196. **Ящерицын, П. И.** Повышение качества шлифовальных поверхностей и режущих свойств абразивно-алмазного инструмента / П. И. Ящерицын, А. Г. Зайцев. – Минск: Наука и техника, 1972. – 480 с.
197. **Bauman, H. N.** Petrology of Fused Alumina Abrasives / American Ceramic Society Bulletin, 1956. - № 10. – V. 35.
198. **Gilman, J.J.** Physic and Chemistry of Ceramics, Gordon and Breach. – New York, 1963. – P. 240.
199. **Kezdi, A.** Handbuch der Bodenmechanik. VEB – Verlag: Berlin, 1969. - S. 97 – 101.
200. **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.
201. **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.
202. **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.

203. **Moser, M.** Untersuchung der Phasergrense Zwischen Elektrokorun Korpern und Keramischen Bindemitteln bei keramisch gebundenen Schleifwerkzeugen. – Bericht der KDR, 1972, Bd. 49. - № 410. – S. 343 – 346.

ПРИЛОЖЕНИЯ



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«ПРОИЗВОДСТВЕННО-КОММЕРЧЕСКАЯ ФИРМА «СИМС»
тел. +79272678071; E-mail: sims-samara63@mail.ru
Юр. адрес 443063, г. Самара, Промышленный район, ул. Сердобская, д.5, офис 14,15,16
ИНН 6316023502; КПП 631901001;
р/с 40702810354120100573 ПОВОЛЖСКИЙ БАНК ОАО "СБЕРБАНК РОССИИ" г. Самара;
к/с 30101810200000000607; БИК 043601607



УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ООО «ПКФ» «СИМС»

А.А. Алексеев

2023г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Максимова Ильи Сергеевича

На использование композиционных шлифовальных кругов для торцевого шлифования рельсов
36 150x63x51 14А (Патент RU 2 697 542 С1 РФ.)

Комиссия в составе зам.генерального директора ООО «ПКФ» «СИМС» Тренкина В.М., доктора технических наук, профессора кафедры «Железнодорожный путь и строительство» ФГБОУ ВО «Самарский государственный университет путей сообщения» Рахчеева В.Г., старшего преподавателя кафедры «Железнодорожный путь и строительство» Максимова И.С. составили настоящий акт о том что, результаты научных исследований, полученные соискателем ученой степени кандидата технических наук Максимовым И.С., в процессе выполнения диссертационной работы были использованы ООО «ПКФ» «СИМС» при выполнении профильного шлифования рельсов и элементов стрелочных переводов.

Испытания проводились на шлифовальном станке СЧР-А предназначенного для профильной механической обработки по поверхности катания и боковым граням головок железнодорожных рельсов.

Режимы шлифования:

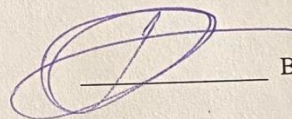
Показатели работоспособности	Базовый	Предлагаемый
Скорость шлифовального круга, м/с	50	50
Стойкость кругов до появления прижогов на поверхности рельсов, ч	7,6	13,8
Уменьшение шероховатости обрабатываемой поверхности, R_z (мкм)	80	46

В результате испытаний установлено что, модифицированные абразивные круги по сравнению с базовыми обладают более высокой стойкостью - 35-55%, снижают шероховатость обработанной поверхности рельсов в 1,55-1,8 раза.

Рекомендовать к использованию композиционные шлифовальные круги, для торцевого шлифования рельсов ООО «ПКФ» «СИМС», которые ограничены внутренней и внешней окружностями и образованы чередующимися режущими элементами двух типов с различной твердостью и зернистостью абразива, первый тип режущих элементов представляет собой основу, выполненную из абразивных зерен на керамической наноструктурированной связке, а второй тип из абразивных зерен на бакелитовой связке, при этом указанные элементы выполнены в виде сегментов.

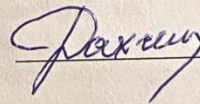
Ожидаемый экономический эффект от внедрения в производство композиционных шлифовальных кругов для торцевого шлифования рельсов составит 485600 руб. в год.

Зам. генерального директора
ООО «ПКФ» «СИМС»



В.М. Тренькин

Научный руководитель
Д.т.н., профессор, профессор
кафедры «Железнодорожный путь и строительство»
СамГУПС



В.Г. Рахчеев

Исполнитель
Старший преподаватель
кафедры «Железнодорожный путь и строительство»
СамГУПС



И.С. Максимов

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ
(СамГУПС)

ул. Свободы, 2 В, г. Самара, 443066, тел. (846) 262-41-12,
255-67-00, ж.д. 2-44-34, факс: 262-30-76,
e-mail: rektorat@samguips.ru
ИНН 6318100463; КПП 631801001,
УФК по Самарской обл. (4208 СамГУПС, л/с 20426УЗ4880)
в Отделении Самара г. Самара, БИК 043601001,
р/с 40501810836012000002

от _____ 20__ г. № _____
На № _____ от _____ 20__ г.

«УТВЕРЖДАЮ»

Ректор федерального государственного
бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Самарский государственный
университет путей сообщения»
Д.Э.Н., доцент



М.А. Гаранин

2023 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы старшего преподавателя
Максимова И.С., в учебный процесс специальности 23.05.06 «Строительство
железных дорог, мостов и транспортных тоннелей»

Теоретические положения и результаты научных исследований, полученные старшим преподавателем Максимовым И.С., при выполнении диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук, посвященная вопросам исследования процессов механической обработки рельсов композиционными шлифовальными кругами, внедрены в учебный процесс в 2017 - 2023 г.г.

Результаты выполненных исследований используются при чтении лекций и проведении практических, лабораторных работ по дисциплинам: «Рельсовая дефектоскопия», «Метрология, стандартизация и сертификация», «Инновационные технологии в путевом хозяйстве», «Методы и принципы дефектоскопии» для студентов специальности 23.05.06 - «Строительство железных дорог, мостов и транспортных тоннелей», а также при выполнении научно-исследовательских работ студентов в выпускных квалификационных работах.

Применение в учебном процессе новых научных знаний, полученных Максимовым И.С., способствует повышению качества подготовки будущих специалистов инженеров путей сообщения.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2697542

Композиционный шлифовальный круг для торцевого шлифования

Патентообладатель: **Прусов Максим Владимирович (RU)**

Авторы: **Рахчеев Валерий Геннадьевич (RU), Максимов Илья Сергеевич (RU), Галанский Сергей Анатольевич (RU), Мустафин Артур Галимзянович (RU), Денисов Владимир Васильевич (RU), Прусов Максим Владимирович (RU)**

Заявка № 2019104680

Приоритет изобретения 19 февраля 2019 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 15 августа 2019 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 19 февраля 2039 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев

Матрица планирования трехфакторного эксперимента

Определение величины съема припуска $t_{p.c}$ (мкм) в зависимости от физико-механических характеристик композиционного шлифовального круга.

обозначение номер опыта	факторы			выходной параметр
	F	S_t	Z_h	$t_{p.c}$
	x_1	x_2	x_3	y_1
нижний ур.	600	40	1,1	
основной ур.	1000	50	1,4	
верхний ур.	1400	60	1,7	
1	2	3	4	5
1	+1	+ 1	+ 1	28
2	+ 1	+ 1	- 1	19
3	+1	- 1	+ 1	18,4
4	+1	- 1	- 1	18
5	- 1	+1	+1	16,5
6	-1	+1	-1	13,4
7	-1	-1	+1	12,6
8	-1	-1	-1	15
9	+1	0	0	15,8
10	-1	0	0	14,6
11	0	+1	0	16,1
12	0	-1	0	13,5
13	0	0	+1	17,6
14	0	0	-1	16,2

F - зернистость, мкм;

S_t - структура, % абразива;

Z_h - твердость шлифовального круга; мм.

Матрица планирования трехфакторного эксперимента

Определение величины съема припуска $t_{p.c}$ (мкм) в зависимости от технологических режимов обработки рабочей поверхности катания железнодорожных рельсов.

обозначение номер опыта	факторы			выходной параметр
	P_z	$V_{\text{лаб}}$	$V_{\text{кр}}$	$t_{p.c}$
	x_1	x_2	x_3	y_1
нижний ур.	36	5	44	
основной ур.	41	6	51	
верхний ур.	46	7	58	
1	2	3	4	5
1	+1	+ 1	+ 1	17,9
2	+ 1	+ 1	- 1	12,5
3	+1	- 1	+ 1	14,1
4	+1	- 1	- 1	10,5
5	- 1	+1	+1	20,1
6	-1	+1	-1	9
7	-1	-1	+1	13
8	-1	-1	-1	6,5
9	+1	0	0	15
10	-1	0	0	12,8
11	0	+1	0	16,7
12	0	-1	0	18,6
13	0	0	+1	20,1
14	0	0	-1	14,5

P_z - сила резания, Н;

$V_{\text{лаб}}$ - скорость лабораторной установки, км/ч;

$V_{\text{кр}}$ - скорость шлифовального круга, м/с.

Матрица планирования трехфакторного эксперимента

Определение стойкости композиционного шлифовального круга М (ч)
от физико-механических характеристик композиционного шлифовального
круга.

обозначение номер опыта	факторы			выходной параметр
	F	S _t	Z _h	T
	x ₁	x ₂	x ₃	y ₁
нижний ур.	600	40	1,1	
основной ур.	1000	50	1,4	
верхний ур.	1400	60	1,7	
1	2	3	4	5
1	+1	+ 1	+ 1	10,1
2	+ 1	+ 1	- 1	7,6
3	+1	- 1	+ 1	8,5
4	+1	- 1	- 1	8,3
5	- 1	+1	+1	16,5
6	-1	+1	-1	8,6
7	-1	-1	+1	8,9
8	-1	-1	-1	12,3
9	+1	0	0	9,6
10	-1	0	0	10,6
11	0	+1	0	11,6
12	0	-1	0	10,2
13	0	0	+1	9,6
14	0	0	-1	8,7

F - зернистость, мкм;

S_t - структура, % абразива;

Z_h - твердость шлифовального круга; мм.

Матрица планирования трехфакторного эксперимента

Определение стойкости композиционного шлифовального круга М (ч)
от технологических режимов обработки рабочей поверхности катания
железнодорожных рельсов.

обозначение номер опыта	факторы			выходной параметр
	P_z	$V_{\text{лаб}}$	$V_{\text{кр}}$	T
	x_1	x_2	x_3	y_1
нижний ур.	36	5	44	
основной ур.	41	6	51	
верхний ур.	46	7	58	
1	2	3	4	5
1	+1	+ 1	+ 1	7,5
2	+ 1	+ 1	- 1	6,8
3	+1	- 1	+ 1	8
4	+1	- 1	- 1	8,5
5	- 1	+1	+1	7,8
6	-1	+1	-1	7,7
7	-1	-1	+1	9,4
8	-1	-1	-1	6,9
9	+1	0	0	7,7
10	-1	0	0	8,6
11	0	+1	0	7,5
12	0	-1	0	8,2
13	0	0	+1	7
14	0	0	-1	8,5

P_z - сила резания, Н;

$V_{\text{лаб}}$ - скорость лабораторной установки, км/ч;

$V_{\text{кр}}$ - скорость шлифовального круга, м/с.

Матрица планирования трехфакторного эксперимента

Определение шероховатости обработанной поверхности ($R_{z.p.c}$, мкм) в зависимости от физико-механических характеристик композиционного шлифовального круга.

обозначение номер опыта	факторы			выходной параметр
	F	S_t	Z_h	$R_{z.p.c}$
	x_1	x_2	x_3	y_1
нижний ур.	600	40	1,1	
основной ур.	1000	50	1,4	
верхний ур.	1400	60	1,7	
1	2	3	4	5
1	+1	+ 1	+ 1	51
2	+ 1	+ 1	- 1	50,5
3	+1	- 1	+ 1	49,5
4	+1	- 1	- 1	49,7
5	- 1	+1	+1	20
6	-1	+1	-1	59
7	-1	-1	+1	39,5
8	-1	-1	-1	36,5
9	+1	0	0	53,5
10	-1	0	0	24
11	0	+1	0	34,5
12	0	-1	0	60,5
13	0	0	+1	48
14	0	0	-1	45,5

F - зернистость, мкм;

S_t - структура, % абразива;

Z_h - твердость шлифовального круга; мм.

Матрица планирования трехфакторного эксперимента

Определение шероховатости обработанной поверхности в зависимости
от технологических режимов обработки рабочей поверхности катания
железнодорожных рельсов

обозначение номер опыта	факторы			выходной параметр
	P_z	$V_{\text{лаб}}$	$V_{\text{кр}}$	$R_{z,p.c}$
	x_1	x_2	x_3	y_1
нижний ур.	36	5	44	
основной ур.	41	6	51	
верхний ур.	46	7	58	
1	2	3	4	5
1	+1	+ 1	+ 1	61,5
2	+ 1	+ 1	- 1	56,8
3	+1	- 1	+ 1	65,3
4	+1	- 1	- 1	55,5
5	- 1	+1	+1	62,4
6	-1	+1	-1	64,5
7	-1	-1	+1	54
8	-1	-1	-1	53,2
9	+1	0	0	71
10	-1	0	0	55,5
11	0	+1	0	62,3
12	0	-1	0	55,5
13	0	0	+1	56
14	0	0	-1	71,5

P_z - сила резания, Н;

$V_{\text{лаб}}$ - скорость лабораторной установки, км/ч;

$V_{\text{кр}}$ - скорость шлифовального круга, м/с.