

На правах рукописи



Ильиных Андрей Степанович

**ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИХ ОСНОВ
ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ШЛИФОВАНИЯ
РЕЛЬСОВ В УСЛОВИЯХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ**

Специальность 05.02.07 – Технология и оборудование механической
и физико-технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Саратов – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Сибирский государственный университет путей сообщения»

- Научный консультант:** **Аксенов Владимир Алексеевич** – доктор технических наук, профессор
- Официальные оппоненты:** **Евсеев Дмитрий Геннадьевич** – доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет путей сообщения», заведующий кафедрой «Технология транспортного машиностроения и ремонт подвижного состава»
- Гузеев Виктор Иванович** – доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет), заведующий кафедрой «Технология машиностроения»
- Королев Альберт Викторович** – доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», заведующий кафедрой «Технология машиностроения»
- Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»

Защита состоится «03» октября 2013 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.242.02 при ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.» по адресу: 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, корп. 1, ауд. 319.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.».

Автореферат разослан «25» июня 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

А.А. Игнатьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Российские железные дороги – одна из крупнейших железнодорожных магистралей мира, являющаяся ключевым звеном транспортной системы нашей страны.

Наиболее дорогостоящим и ответственным элементом железнодорожного пути, состояние которого в первую очередь определяет бесперебойное и надежное движение поездов, являются рельсы. Для поддержания рельсового хозяйства в исправном состоянии ежегодно требуется более 3 миллионов тонн новых рельсов. В современных условиях эксплуатации железных дорог с ростом скоростей движения и грузонапряженности потребность в новых рельсах с каждым годом только возрастает, поэтому задача продления жизненного цикла рельсов имеет огромное значение для путевого хозяйства железнодорожной отрасли.

Перспективным направлением в решении данной проблемы является технология шлифования рельсов с применением рельсошлифовальных поездов, позволяющая производить механическую обработку головки рельсов без их демонтажа в условиях железнодорожного пути.

Перечень дефектов рельсов, удаляемых шлифованием с применением данной технологии, достаточно обширен и включает: волнообразные износы, механические повреждения, смятия и отслоения металла. При этом, одной из главных целей шлифования является формирование поперечного профиля рельсов. Периодическая корректировка профиля шлифованием позволяет обеспечить наилучший контакт колеса с рельсом, равномерно распределить внутренние напряжения по поверхности рельса и тем самым продлить его эксплуатационный ресурс на 15...20 %.

Эксплуатационные свойства рельсов определяются противодействием образованию и развитию трещин, контактно-усталостных дефектов и износа, возникновение которых в значительной степени зависит от качества профилирования головки рельса. В соответствии с нормативно-технической документацией, точность формируемого поперечного профиля рельсов и шероховатость обработанной поверхности являются основными критериями, определяющими качество выполнения работ по шлифрованию рельсов. Формирование поперечного профиля рельса осуществляется несколькими абразивными инструментами, одновременно работающими по схеме плоского шлифования торцом круга (на рельсошлифовальных поездах типа РШП-16 – 8 кругов на одну рельсовую нить, РШП-48 – 24 круга, РШП-112 – 56 кругов). С учетом того, что условия работы шлифовальных кругов различны, проблема обеспечения требуемых параметров качества по всей поверхности головки рельса до настоящего времени остается не решенной.

Применение технологии шлифования рельсов в условиях железнодорожного пути усложняется необходимостью закрытия целых перегонов для движения поездов (организация технологических «окон»). Это приво-

дит к значительным убыткам, связанным с ограничением пропускной способности участков пути, задержкой движения и снижением скорости перевозок. Уменьшение этих издержек может быть обеспечено за счет повышения производительности рельсошлифовальных поездов, позволяющей сократить продолжительность «окон».

На основании вышеизложенного, вопрос создания новой высокопроизводительной технологии шлифования рельсов в условиях железнодорожного пути, формирующей повышенные эксплуатационные свойства рельсов за счет обеспечения качества их профилирования является первоочередной и актуальной проблемой для путевого комплекса отрасли.

Степень разработанности темы исследования. На сегодняшний день вопросу шлифования рельсов в условиях железнодорожного пути посвящена одна монография, изданная в Германии в 1992 году под редакцией Хайнца Функе, посвященная общим вопросам профилирования рельсов с применением рельсошлифовальных поездов. Развитием теории шлифования рельсов в России занимались такие ученые как В.Г. Альбрехт, Л.Г. Крысанов, Л.П. Мелентьев, Д.Г. Евсеев, С.Н. Корчак, В.А. Аксенов, Н.М. Султан-Заде, В.В. Райт, В.А. Шаламов и др., а так же научные школы ВНИКТИ и ВНИИЖТ. Проводимые исследования касались различных аспектов рельсошлифования, однако с позиции технологии машиностроения этот процесс рассматривался в единичных случаях, а основная часть работ была нацелена в большей степени на организационно-технические мероприятия. Исследования же направленные на повышение эффективности процесса шлифования рельсов и, в частности, на увеличение производительности рельсошлифовальных поездов и обеспечение качества профилирования рельсов практически не проводились.

Таким образом, создание новой высокопроизводительной технологии шлифования рельсов сдерживается отсутствием научно-методических основ, позволяющих производить анализ процесса шлифования рельсов и оценивать эффективность тех или иных технологий, что еще раз подтверждает актуальность данной работы.

Цель работы – обоснование и разработка научно-методических основ высокопроизводительной технологии шлифования рельсов в условиях железнодорожного пути, формирующей повышенные эксплуатационные свойства рельсов за счет обеспечения качества их профилирования.

Объект исследования – технология шлифования рельсов торцом круга в условиях железнодорожного пути во взаимосвязи с процессом формирования эксплуатационных свойств рельсов.

Предмет исследований – методы и средства технологического обеспечения повышения эффективности процесса шлифования рельсов с применением рельсошлифовальных поездов.

Методы и средства исследований. Работа базируется на основных положениях технологии машиностроения, теории резания и теории разру-

шения. В теоретических исследованиях использованы также численные методы аналитической и дифференциальной геометрии, теоретической механики, теории вероятностей и математического анализа.

Экспериментальные исследования основаны на методах механических испытаний металлов на циклическую прочность, износостойкость и трещиностойкость, металлографии и методов определения физико-механических свойств металлов и микрогеометрических параметров обработанной поверхности. Экспериментальные исследования проводились на оборудовании общего и специального назначения, включая оригинальные разработки. Все используемое оборудование прошло калибровку и метрологическую аттестацию в ФГУП «СНИИМ».

Научная новизна работы состоит в решении актуальной научной проблемы – разработке научно-методических основ высокопроизводительной технологии шлифования рельсов в условиях железнодорожного пути, позволивших сформировать комплекс научно обоснованных технических и технологических решений, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие железнодорожной отрасли и экономики страны в целом за счет повышения эффективности эксплуатации, содержания и ремонта железнодорожного пути. Новыми научными результатами работы являются следующие:

- разработан комплекс математических моделей процесса шлифования рельсов учитывающих особенности обработки в условиях железнодорожного пути, заключающиеся в упругой подвеске шлифовальных головок и большой протяженности обрабатываемой поверхности, позволяющих использовать глубину резания в качестве управляемого параметра механической обработки через усилие прижатия шлифовального круга к рельсу;
- разработана модель формообразования поперечного профиля головки рельса несколькими инструментами, работающими по схеме плоского шлифования торцом круга, учитывающая технологическое наследование после обработки каждым абразивным кругом;
- выявлены закономерности изменения эксплуатационных свойств головки рельса после шлифования по критериям циклической трещиностойкости, контактно-усталостной прочности и износостойкости в зависимости от параметров качества поверхности;
- предложен и обоснован метод обеспечения повышенных эксплуатационных свойств рельсов за счет формирования требуемой шероховатости на отдельных участках головки рельса, воспринимающих различные виды нагружения в процессе эксплуатации;
- разработана технология высокопроизводительного процесса шлифования рельсов в условиях железнодорожного пути, результаты теоретических и экспериментальных исследований рациональных условий осуществления этого процесса, обеспечивающего повышенные эксплуатационные свойства рельсов.

Практическая ценность работы. По результатам проведенных исследований разработаны:

- высокопроизводительный технологический процесс шлифования рельсов в условиях железнодорожного пути, обеспечивающий повышенные эксплуатационные свойства рельсов за счет формирования требуемой шероховатости обработанной поверхности, определяемой в зависимости от условий эксплуатации рельсов. Новый технологический процесс позволил увеличить эксплуатационный ресурс рельсов до 30...40%, снизить эксплуатационные расходы на 15...20 % за счет экономии абразивного инструмента, расходных материалов и топлива;

- рабочее оборудование рельсошлифовального поезда для реализации высокопроизводительного технологического процесса, позволяющее увеличить рабочую скорость рельсошлифовального поезда с 6...8 км/ч до 12...15 км/ч при величине съёма металла 0,25...0,30 мм/ход. Реализация разработанной технологии с помощью нового рабочего оборудования позволяет повысить эффективность выполнения работ по следующим критериям: увеличение производительности шлифования рельсов в 2...2,5 раза, сокращение в 1,5...2 раза времени производства работ в «окно»;

- автоматизированная система проектирования технологических процессов шлифования рельсов в условиях железнодорожного пути. Её применение позволяет реализовать принципиально новый подход в планировании технологических воздействий, выборе режимов и условий шлифования, заключающийся в обеспечении повышенного уровня эксплуатационных свойств рельсов с максимальной производительностью, за счет обеспечения качества профилирования рельсов.

Реализация результатов работы. Проведена модернизация рабочего оборудования рельсошлифовального поезда РШП-16К под технологию высокопроизводительного шлифования рельсов в условиях железнодорожного пути. В ходе модернизации реализована возможность обеспечения угла атаки $1,5^\circ$ шлифовальному кругу, а также изменения его частоты вращения в диапазоне $3600 \div 6000$ об/мин с увеличением мощности привода шлифовальной головки с 15 до 25 кВт. Конструктивные особенности РШП-16К позволили технологически реализовать рабочую скорость до 12 км/ч, что превышает штатную рабочую скорость поезда в 2 раза.

Компактность, мобильность и высокая производительность модернизированного рельсошлифовального поезда позволили в значительной степени расширить область его применения.

Используемые при модернизации технические и технологические решения защищены патентами на изобретения и полезные модели (RU 2391458 C1; RU 61722 U1; RU 84856 U1). Результаты исследований внедрены на предприятиях и в филиалах ОАО «РЖД». Общий экономический эффект от использования результатов составляет 16 млн. рублей в год на один рельсошлифовальный поезд типа РШП-16 (по ценам 2011 года).

Результаты работы используются в учебном процессе на кафедре «Технология транспортного машиностроения и эксплуатация машин» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Положения, выносимые на защиту:

- научно-методические основы высокопроизводительной технологии шлифования рельсов в условиях железнодорожного пути;
- комплекс моделей процесса шлифования рельсов в условиях железнодорожного пути выявляющие взаимосвязи параметров технологического процесса;
- модель формообразования поперечного профиля головки рельсов шлифованием несколькими абразивными инструментами, работающими по схеме плоского шлифования торцом круга;
- результаты экспериментальных и теоретических исследований выявляющих закономерность формирования шероховатости обработанной поверхности и её взаимосвязь с параметрами технологического процесса;
- результаты экспериментальных исследований выявляющих закономерности изменения эксплуатационных свойств отшлифованных участков головки рельса по критериям циклической трещиностойкости, контактно-усталостной прочности и износостойкости;
- методику проектирования технологических процессов шлифования рельсов в условиях железнодорожного пути;
- высокопроизводительный технологический процесс шлифования рельсов и результаты теоретических и экспериментальных исследований рациональных условий осуществления этого процесса;
- результаты модернизации рабочего оборудования рельсошлифовального поезда для реализации высокопроизводительного технологического процесса и результаты его промышленных испытаний.

Апробация работы. Материалы диссертации и основные результаты работы докладывались и обсуждались на научно-технических конгрессах, конференциях и симпозиумах международного и российского уровней, в том числе: «Вузы Сибири и Дальнего Востока – Транссибу» (Новосибирск, 2002), «Технологические процессы и материалы в машиностроении и приборостроении» (Москва, 2003), «Современные технологии – железнодорожному транспорту и промышленности» (Хабаровск, 2003), «Актуальные проблемы развития транспорта России: стратегические, региональные, технические» (Ростов-на-Дону, 2004), «Современные проблемы машиностроения» (Томск, 2004), «Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте» (Красноярск, 2005), «Прогрессивные технологии в транспортных системах» (Оренбург, 2005), «Современные технологии в машиностроении» (Пенза, 2010), «Симпозиум по трибофатике МСТФ 2010» (Минск, 2010), «Политранспортные системы» (Красноярск, 2011).

Работа в целом обсуждена на сетевых школах ОАО «РЖД» по освоению передового опыта содержания рельсового хозяйства и эксплуатации рельсошлифовальных поездов (2008-2010 гг.), объединенных научных семинарах кафедры «Технология транспортного машиностроения и эксплуатация машин» и НИЛ «Технология транспортного машиностроения и ремонт подвижного состава» СГУПС (Новосибирск, 2008-2012), расширенном заседании кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонт подвижного состава» МГУПС (МИИТ) (Москва, 2012); межкафедральном семинаре машиностроительного факультета СГТУ им. Ю.А. Гагарина (Саратов, 2013).

Личный вклад автора. Основой диссертации послужили теоретические, экспериментальные исследования и производственные испытания. Диссертант внес определяющий вклад в постановку, обоснование и осуществление программ исследований. Он является автором основных положений научно-методических основ, а также идей и выводов, изложенных в работе, что подтверждается публикациями и патентными документами.

В диссертации обобщены результаты экспериментальных исследований, выполненных автором самостоятельно и вместе с сотрудниками научной группы. Некоторые работы выполнены в рамках договоров и при участии следующих организаций: ОАО «РЖД» его филиалы и структурные подразделения, ОАО «Калужский завод «Ремпутьмаш», ЗАО «Эра-сиб», ПИФ «Элкон», ООО «Festo-РФ», ООО «Siemens» и др.

Автор принимал непосредственное участие в разработке моделей и методик, проведении экспериментов, обработке результатов и их интерпретации, создании экспериментальных установок и опытно-промышленного оборудования, внедрении их в производство. Автору принадлежит также написание статей и докладов. Результаты теоретических исследований, представленные в диссертации, принадлежат автору и выполнены на основе личного научного творчества.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 47 печатных работ, в том числе: 15 публикаций в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 7 патентов на изобретения и полезные модели.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, общих выводов и приложений. Общий объем работы составляет 331 страницу машинописного текста, содержит 89 иллюстраций и 27 таблиц. Приложения на 97 листах. Список цитируемой литературы включает 149 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы, сформулированы цель работы, научная новизна, указаны положения, выносимые на защиту. Дается общая структура и характеристика работы. Приведены сведения о практической ценности и реализации результатов работы.

Первая глава посвящена анализу состояния вопроса, целям и задачам исследования. Подробно рассмотрены технологические процессы и применяемое для шлифования рельсов оборудование. На современных рельсошлифовальных поездах реализована схема плоского шлифования торцом круга, которая применяется в стационарных условиях на станках. Проведен детальный обзор современного состояния отечественных и зарубежных работ в области совершенствования технологического процесса шлифования рельсов. Установлено, что в настоящее время на железных дорогах мира широко используются рельсошлифовальные поезда, скорость выполнения работ которыми колеблется от 3 до 8 км/ч, а характер выполнения работ сводится к продолжительности технологических «окон», числу проходов и величине съема металла.

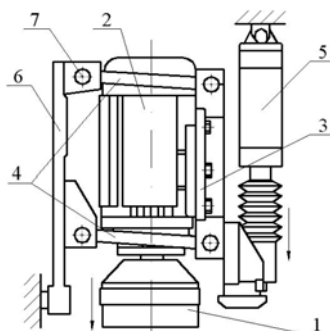
Большой вклад в изучение вопроса повышения эффективности процесса абразивной обработки сделан Е.Н. Масловым, Б.Г. Лурье, Л.Н. Филимоновым, С.Н. Корчаком, А.В. Королёвым, П.П. Переверзевым, Л.В. Худобиным, Д.В. Исаковым и другими учеными. Разработанные ими теоретические модели и полученные эмпирические зависимости могут быть применены для оценки эффективности различных видов шлифования в стационарных условиях. При этом особую ценность представляют исследования на основе теории резания единичным зерном. Учитывая специфику шлифования рельсов в условиях железнодорожного пути применение этих моделей затруднительно, а в некоторых случаях невозможно.

Анализ работ посвящённых различным аспектам теории и практического применения технологии шлифования рельсов показал, что наряду со схожестью схем шлифования рельсов в условиях железнодорожного пути и шлифования на станках, существуют принципиальные отличия, вносящие существенные изменения в процесс обработки рельсов и влияющих на качество выполняемых работ.

Во-первых, шлифование рельсов проводится за счет силового замыкания кинематической цепи «абразивный круг – обрабатываемая поверхность» (рис. 1). Каждый отдельный шлифовальный круг прижимается к головке рельса пневмоцилиндром через приводной электродвигатель, закреплённый на подmotorной плите. Оси вращения параллелограммной подвески закреплены к торцевой плите блока шлифовальной тележки. Такая конструкция обеспечивает постоянную перпендикулярность оси вращения круга относительно продольной оси рельса. При этом усилие прижатия шлифовального круга к рельсу определяется давлением в пневмоцилиндре, которое автоматически регулируется в зависимости от токовой нагрузки на обмотках электродвигателя.

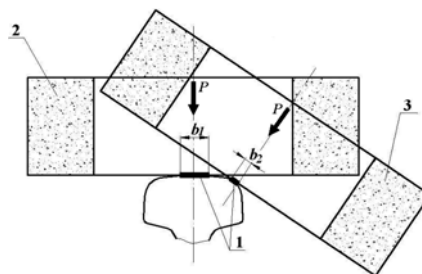
Во-вторых, условия резания каждого отдельно работающего круга значительно различаются в зависимости от угла наклона шлифовальной головки (рис. 2). Так при обработке поверхности катания одним кругом захватывается большая зона, чем при обработке рабочего скругления голов-

ки рельса. То есть на различных участках головки рельса формируются дорожки шлифования различной ширины, и на этих участках действует различная удельная нагрузка на единичное зерно.



1 – абразивный круг; 2 – электродвигатель; 3 – подmotorная плита; 4 – параллелограммная подвеска; 5 – пневмоцилиндр; 6 – плита блока; 7 – ось.

Рис. 1. Схема крепления шлифовальной головки



b_1, b_2 – ширина дорожки шлифования; $b_1 > b_2$; 1 – дорожка шлифования; 2 – обработка поверхности катания; 3 – обработка скругления.

Рис. 2. Схема формообразования профиля рельса

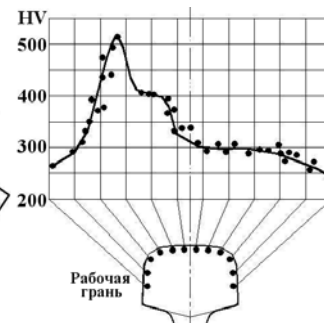


Рис. 3. Твердость по профилю рельса после наработки 450 млн. т брутто

В-третьих, существенные различия в работу абразивного инструмента вносят значительные изменения физико-механических свойств рельсов. В процессе эксплуатации в пути значительно изменяются свойства по сечению головки рельса. Прежде всего, происходит резкое изменение твердости (рис. 3). Повышение твердости на отдельных участках головки рельса способствует ужесточению условий работы шлифовальных кругов.

Указанные отличия приводят не только к различной производительности и неодинаковому износу шлифовальных кругов, но и разному качеству обработанной поверхности, которое в дальнейшем будет характеризовать различные эксплуатационные свойства отдельных участков головки рельса. Мировой опыт эксплуатации рельсошлифовальных поездов показывает, что вопрос повышения производительности и обеспечения качества выполняемых работ при шлифовании рельсов до сих пор остается актуальным, при этом отсутствие сведений о динамике изменения параметров технологического процесса в значительной степени сдерживает создание новых высокопроизводительных технологий.

В связи с этим большое значение имеет вопрос установления и анализа параметров технологического процесса абразивной обработки с учетом специфики шлифования рельсов в условиях железнодорожного пути и их влияния на эксплуатационные свойства рельсов.

На основе вышеизложенного сформулированы следующие **задачи исследований**:

1. Формирование научно-методических основ высокопроизводительной технологии шлифования рельсов в условиях железнодорожного пути включающих в себя:

- разработку комплекса математических моделей позволяющих определять численные значения параметров технологического процесса и устанавливать их количественную взаимосвязь;

- разработку модели формообразования поперечного профиля головки рельсов шлифованием несколькими абразивными инструментами, работающими по схеме плоского шлифования торцом круга;

- экспериментально-теоретическое определение взаимосвязи режимов шлифования с параметрами качества обработанной поверхности и эксплуатационной стойкостью рельсов;

- разработку методики проектирования технологических процессов шлифования рельсов обеспечивающих требуемое качество их профилирования.

2. Разработка высокопроизводительной технологии шлифования рельсов обеспечивающей требуемые значения параметров качества и эксплуатационной стойкости рельсов.

3. Создание системы автоматизированного проектирования технологических процессов шлифования рельсов.

4. Разработка оборудования и комплектующих рельсошлифовального поезда для реализации высокопроизводительной технологии шлифования рельсов.

5. Промышленная апробация разработанной высокопроизводительной технологии шлифования рельсов и оборудования для её реализации.

Вторая глава содержит результаты теоретических исследований процесса шлифования рельсов с созданием комплекса математических моделей учитывающих особенности обработки в условиях железнодорожного пути, заключающихся в упругой подвеске шлифовальных головок и большой протяженности обрабатываемой поверхности.

Технологический процесс шлифования рельсов характеризуется группами показателей представленных на рисунке 4. Для формирования научно-методических основ необходимо учесть все указанные параметры и их взаимосвязь на основе сочетания теоретических и экспериментальных исследований.

Анализ процесса шлифования рельсов осуществляли с использованием детерминированных моделей, основанных на теории резания единичным абразивным зерном. Данные модели более упрощенные и менее точные по сравнению со стохастическими моделями, но при этом позволяют в полной мере оценить взаимное влияние факторов и понять, какие из них и в какой степени возможно и целесообразно изменять для повышения эффективности процесса шлифования рельсов.

При вероятностном анализе связь факторов с результативным показателем является неполной, корреляционной, т.к. изменение аргумента может дать несколько значений прироста функции в зависимости от сочетания других факторов, определяющих данный показатель.

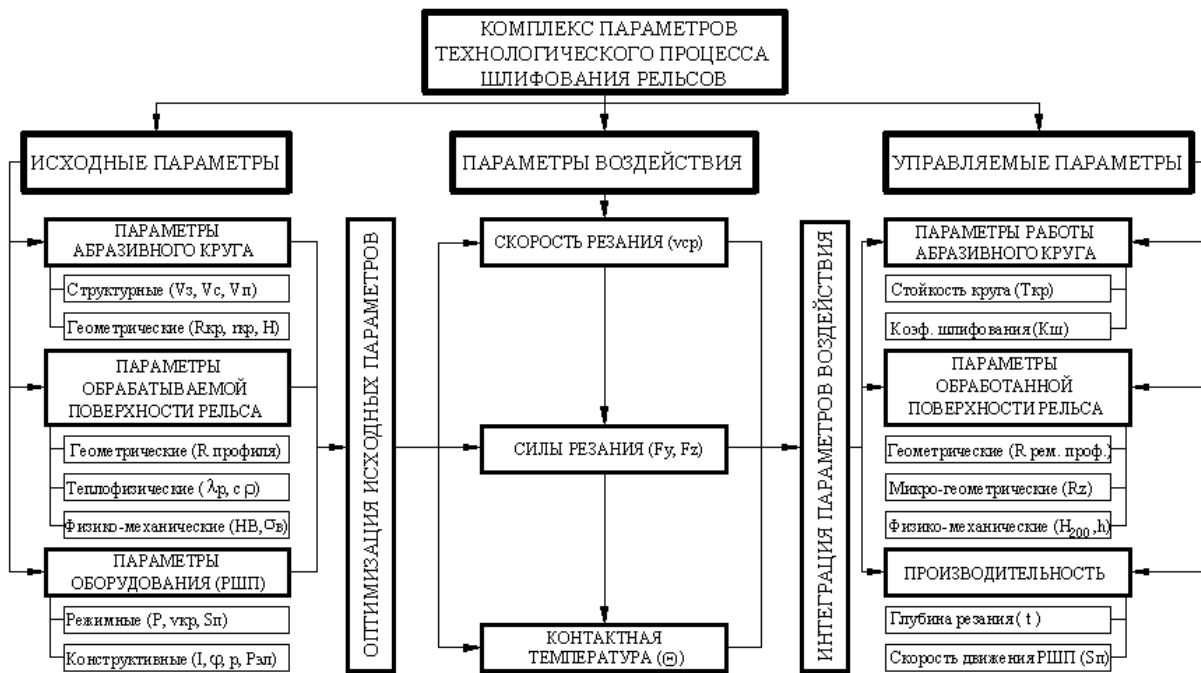


Рис. 4. Комплекс параметров технологического процесса шлифования рельсов

Основным параметром, определяющим эффективность процесса шлифования, является глубина среза единичным абразивным зерном. Для её нахождения воспользуемся известной формулой определяющей объем металла, удаляемого за проход шлифовальным кругом: $V = B \cdot L \cdot t$, где B – ширина дорожки шлифования, мм; L – длина обрабатываемого участка пути, мм; t – глубина резания шлифовальным кругом, мм.

Этот же объем удаленного металла представим выражением

$$V = 2a_{cp}^2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot \mu \cdot L \cdot B, \quad (1)$$

где a_{cp} – средняя глубина единичных срезов абразивными зернами, мм; γ – передний угол режущей части абразивного зерна, град; μ – концентрация единичных срезов по длине обработанной поверхности, шт./мм.

Приравняв эти два объема, определили среднюю глубину среза единичными зернами по формуле

$$a_{cp} = \sqrt{\frac{t}{2 \cdot \mu \cdot \operatorname{tg} \gamma}}, \quad (2)$$

в которой определяющим параметром является концентрация единичных срезов по длине обработанной поверхности. Для определения значения μ рассмотрим вариант, когда скорость рельсошлифовального поезда будет равна нулю (рис. 5, а). В этом случае количество единичных срезов будет равно количеству рабочих зёрен, пересекающих ось дорожки шлифования за время τ , которое можно определить по формуле $\mu = \tau \cdot v_{cp} \cdot Z$, где Z – концентрация зерен на рабочей поверхности шлифовального круга, шт./мм².

В случае, когда скорость поезда отличается от нуля, количество срезов за время τ будет таким же, как и в варианте при отсутствии скорости, но распределено на большую длину.

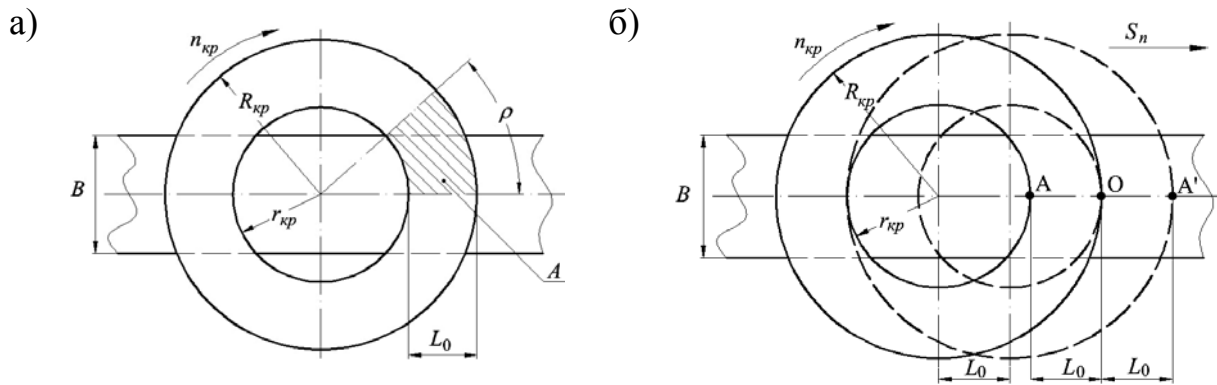


Рис. 5. Схема к определению концентрации единичных срезов μ по длине обработанной поверхности. а) $S_n = 0$; б) $S_n \neq 0$

Учитывая, что полная обработка поверхности осуществляется при перемещении шлифовального круга из т. А в т. А' (рис. 5, б) определили время, за которое рельсошлифовальный поезд проходит расстояние $2L_0$: $\tau_{2L_0} = [120 \cdot (R_{кр} - r_{кр})] / S_n$, где $R_{кр}$ – наружный радиус шлифовального круга, мм; $r_{кр}$ – внутренний радиус шлифовального круга, мм; S_n – рабочая скорость рельсошлифовального поезда (продольная минутная подача), м/мин. С учетом полученных выражений среднюю глубину среза единичными зёрнами определили по формуле

$$a_{cp} = \sqrt{\frac{t \cdot S_n}{80 \cdot \text{tg} \gamma \cdot v_{cp} \cdot (R_{кр} - r_{кр}) \cdot Z}}, \quad (3)$$

где; v_{cp} – средняя скорость движения зёрен, расположенных на разном расстоянии от оси вращения круга, м/с.

В соответствии с исследованиями Е.Н. Маслова максимальную глубину единичных срезов можно определить как $a_{max} = 2a_{cp}$.

Анализ полученной зависимости показал, что влияние режимных факторов на глубину срезов абразивными зёрнами в равной степени одинаково на всем диапазоне их изменения. Увеличение одного из параметров в два раза при постоянных других приводит к изменению a_{cp} в среднем в 1,4 раза. Проведенный кинематический анализ позволил сделать следующие выводы:

1. Увеличение глубины резания и продольной подачи инструмента приводит к повышению интенсивности съема металла за счет увеличения размеров единичных срезов.

2. Повышение скорости вращения шлифовального круга способствует снижению сил резания действующих на единичное зерно, за счет уменьшения размеров удаляемых стружек.

3. Наибольшее повышение эффективности процесса шлифования рельсов торцом круга можно достичь за счет применения повышенных скоростей вращения абразивного инструмента с пропорциональным увеличением интенсивности съема металла при тех же силах резания.

4. Определение рациональных значений возможного повышения режимных параметров шлифования требует рассмотрения кинематики процесса в комплексе с силовой моделью процесса шлифования рельсов.

С точки зрения обеспечения максимальной производительности задача, решаемая силовой моделью, сводится к определению максимально возможной глубины единичного среза $a_{кр}$, превышение которой приводит к вырыванию абразивного зерна из связки шлифовального круга.

Как отмечено в исследованиях А.В. Королева, наиболее опасными являются растягивающие напряжения в связке, которые в большей степени определяются тангенциальной составляющей силы резания, значение которой можно определить, воспользовавшись моделью, разработанной С.Н. Корчаком. Согласно этой модели сила, действующая на единичное абразивное зерно F' , является суммой тангенциальных сил от напряжения пластического сдвига и трения о заднюю поверхность зерна. Эта модель позволяет решить плоскую задачу без учета размера зерна в направлении скорости круга $v_{ср}$. Чтобы рассчитать по ней силу на единичном зерне, необходимо учесть длину режущей кромки. В соответствии с моделью абразивного зерна в виде шара, режущий выступ которого представлен конусом с углом при вершине 2γ , форма поперечного сечения среза будет иметь вид треугольника. При этом соотношение между глубиной и шириной среза устанавливается зависимостью $b_{ср} = 2a_{ср} \operatorname{tg}\gamma$. С учетом сделанных допущений формула для определения тангенциальной составляющей силы резания будет иметь следующий вид:

$$F'_z = 2K_1 \cdot \tau_c \cdot a_{ср}^2 \cdot \operatorname{tg}\gamma, \quad (4)$$

где τ_c – касательные напряжения, при которых происходит сдвиг в зоне деформации, МПа; $K_1 = \sqrt{3} \cdot 25 \cos \beta_1 / \sin \beta$, где β – угол между плоскостью сдвига и линией среза; β_1 – угол между линией среза и направлением равнодействующей от сил пластического деформирования срезаемого слоя.

Критическую нагрузку, вырывающую зерно из связки шлифовального круга, с достаточной степенью точности определили по формуле

$$F'_{св} = \frac{\pi \cdot d_3^2 \cdot \sigma_{св} \cdot K_{сmp}}{8}, \quad (5)$$

где d_3 – диаметр абразивного зерна шлифовального круга, мм; $\sigma_{св}$ – предельная величина напряжений материала связки на растяжение, МПа; $K_{сmp}$ – коэффициент структуры шлифовального круга, учитывающий наличие пор в зоне контакта абразивного зерна со связкой.

Если считать соотношение (4) справедливым для критических значений параметров среза $a_{кр}$ произведем замену в этом соотношении $a_{ср}$ на $a_{кр}$. С учетом принятого допущения приравняли правые части формул (4) и (5), а полученное уравнение решили относительно $a_{кр}$:

$$a_{кр} = \sqrt{\frac{\pi \cdot d_3^2 \cdot \sigma_{св} \cdot K_{сmp}}{16 \cdot K_1 \cdot \tau_c \cdot \operatorname{tg}\gamma}}. \quad (6)$$

Таким образом, получена зависимость, определяющая максимально возможное значение глубины единичного среза, при котором происходит вырывание острого абразивного зерна из связки шлифовального круга.

При шлифовании общая сила резания, действующая на шлифовальный круг, складывается из сил, возникающих при срезе металла единичными зернами, находящимися в зоне контакта шлифовального круга с поверхностью рельса. Выразив площадь взаимодействия шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью через ширину дорожки шлифования B , с учетом выражения (4) получим общую тангенциальную силу, действующую на шлифовальный круг:

$$F_z = \frac{K_1 \cdot \tau_c \cdot t \cdot S_n \cdot B}{15 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot v_{cp}}. \quad (7)$$

В полученной зависимости неизвестными составляющими являются глубина резания t и ширина дорожки шлифования B . Существующие технологические процессы шлифования рельсов не предполагают назначения параметров t и B в качестве исходных данных, что приводит к их самопроизвольному формированию в процессе обработки в зависимости от ряда факторов: усилия прижатия шлифовального круга к рельсу, профиля головки рельса и его физико-механических свойств, режимов обработки и др. Из двух рассматриваемых параметров первоочередную роль играет глубина резания, изменение которой в большей степени влияет как на производительность, так и на качество формируемой поверхности при шлифовании. В связи с этим направление дальнейших исследований сводится к назначению глубины резания.

При шлифовании рельсов основной задачей ставится формирование ремонтного профиля головки рельса за как можно меньшее количество проходов рельсошлифовального поезда. Эта оптимизационная задача может быть решена при обеспечении максимальной глубины резания шлифовальным кругом на каждом отдельно взятом участке профиля.

Максимально возможная глубина резания шлифовальным кругом определена из расчета критической нагрузки на единичное зерно. Для этого приравняли величину $a_{кр}$, рассчитанную из условия прочности закрепления зерна в связке (6) к величине a_{max} , определенное по кинематическим параметрам (3), а полученное уравнение решили относительно t :

$$t = \frac{1,25 \cdot \pi \cdot d_3^2 \cdot \sigma_{св} \cdot K_{ср} \cdot v_{ср} \cdot (R_{кр} - r_{кр}) \cdot Z}{K_1 \cdot \tau_c \cdot S_n}. \quad (8)$$

Полученная формула устанавливает взаимосвязь глубины резания шлифовальным кругом с кинематическими и силовыми параметрами процесса шлифования, характеристикой шлифовального круга и обрабатываемого материала и позволяет рассчитывать глубину резания шлифовальным кругом при работе инструмента в режиме самозатачивания. Величина глубины резания, полученная по данной формуле, позволяет обеспечить мак-

симальную производительность шлифования. При этом полученное значение t является предельно допустимым, а его превышение приведет к катастрофическому износу абразивного инструмента.

Для оценки справедливости полученной зависимости проведен эксперимент, целью которого ставилось сравнение расчетных значений максимально возможной глубины резания t с фактически полученными значениями при шлифовании рельсов. Исследования проводились на шлифовальных кругах, изготовленных с использованием циркониевого электрокорунда на бакелитовой связке пяти различных рецептур производства компании «Абразивные заводы Урала».

Методика проведения эксперимента заключалась в изменении усилия прижатия шлифовального круга к рельсу при постоянной скорости резания и продольной подачи в соответствии со значениями, принятыми в расчете. Усилие прижатия позволяло изменять глубину резания, фактическое значение которой определялось измерением геометрии поперечного профиля головки рельса до и после шлифования.

В качестве критерия, определяющего оптимальность глубины резания, был принят коэффициент шлифования $K_{ш}$, характеризующий отношение объема удаленного металла к объемному износу инструмента. В соответствии с этим для каждого прохода рельсошлифовального поезда было рассчитано значение $K_{ш}$. Значение глубины резания соответствующее максимальному коэффициенту шлифования являлось наиболее эффективным и это значение сравнивалось с расчетным. Результаты эксперимента представлены на рис. 6.

Проведенный эксперимент показал, что для максимального коэффициента шлифования $K_{ш}$ расхождение фактически полученных значений глубины резания t с расчетными значениями $t_{расч}$ в среднем составляет 12 %. В значительной степени на величину указанных расхождений влияет погрешность измерений глубины резания после шлифования.

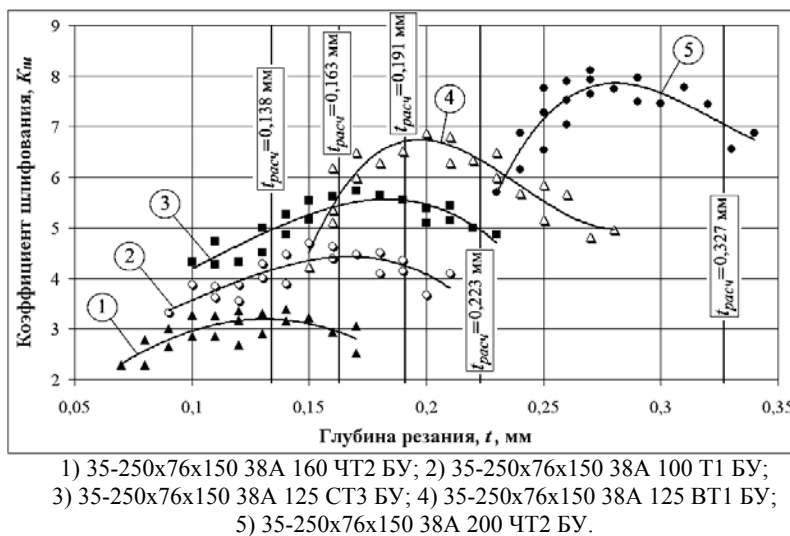


Рис. 6. Влияние глубины резания на коэффициент шлифования

При шлифовании рельсов глубина резания может задаваться и контролироваться за счет усилия прижатия шлифовального круга к рельсу. На рельсошлифовальных поездах этот контроль осуществляется по токовой нагрузке на электродвигателе шлифовальной головки. Это принципиальное отли-

чие от процесса шлифования на станках требует установления зависимости между силой резания F_z и силой тока I на обмотках электродвигателя. Мощность на валу электродвигателя можно определить по двум направлениям: исходя из характеристик электрического тока: $P_{эл} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \cdot \eta$; с учетом момента сопротивления на валу электродвигателя: $P_{об} = F_z \cdot v_{cp}$.

Приравняв значения $P_{эл}$ и $P_{об}$ и решив полученное уравнение относительно I , определим необходимую токовую нагрузку, обеспечивающую заданную силу резания:

$$I = \frac{F_z \cdot v_{cp}}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi \cdot \eta}, \quad (9)$$

где U – линейное (межфазовое) напряжение, В; φ – угол сдвига фаз между фазовым напряжением и фазовым током; η – КПД электродвигателя.

Для оценки справедливости полученной зависимости произвели сравнение расчетных и экспериментальных данных, которое показало, что среднее относительное отклонение расчетных значений от фактических составляет 10,28 %, что обеспечивает приемлемую точность полученных результатов.

Разработанный комплекс моделей процесса шлифования рельсов в условиях железнодорожного пути учитывающих особенности нестационарной обработки, заключающиеся в упругой подвеске шлифовальных головок и большой протяженности обрабатываемой поверхности позволил выявить взаимосвязи параметров технологического процесса и использовать глубину резания t в качестве управляемого параметра механической обработки через усилие прижатия шлифовального круга к рельсу.

Третья глава посвящена разработке методики формообразования поперечного профиля головки рельса при многоинструментальной обработке по схеме плоского шлифования торцом круга.

Полученный во второй главе результат позволяет подойти к решению задачи по определению ширины дорожки шлифования B , которая, наряду с глубиной резания, является основополагающей при формообразовании головки рельса. Для её определения в качестве исходных данных примем геометрические параметры фактического поперечного профиля рельса, расчетную глубину резания и обрабатываемый участок головки рельса, определяемый углом наклона φ шлифовальной головки. Для определения фактического поперечного профиля головки рельса использовался специально разработанный рельсовый профилометр, позволяющий производить измерения в полярной системе координат (RU 85632 U1; RU 39699 U1). При этом измеренный профиль рельса представляется массивом точек с координатами $(R_i; \varepsilon_i)$, а геометрию профиля можно описать уравнением:

$$R = f(\varepsilon), \quad (10)$$

где R – радиус-вектор измеряемой точки профиля, мм; ε – полярный угол в измеряемой точке, град.

Для определения ширины дорожки шлифования рассмотрим участок поперечного профиля рельса в полярной системе координат (рис. 7).

Для начала необходимо знать в какой именно точке головки рельса произойдет контакт со шлифовальным кругом, т.е. необходимо определить координаты точки К с учетом угла наклона φ шлифовальной головки.

Торцевую поверхность шлифовального круга представим прямой $m-m$, касательной к профилю рельса в точке К. С учетом того, что искомые координаты одновременно принадлежат касательной и профилю рельса, их значения определяются совместным решением нормального уравнения прямой $m-m$ с уравнениями параметризации координат точки К, полученных в соответствии с выражением (10):

$$\begin{cases} x_K \cos \psi + y_K \sin \psi - (x_K / \cos \varepsilon_K) \cdot \cos(\psi - \varepsilon_K) = 0 \\ x_K = f(\varepsilon_K) \cos \varepsilon_K \\ y_K = f(\varepsilon_K) \sin \varepsilon_K \end{cases} \quad (11)$$

При работе шлифовальный круг врезается в поверхность рельса на заданную глубину t , которую можно определить по нормали к обрабатываемой поверхности, отложив из точки К отрезок КN равный значению t .

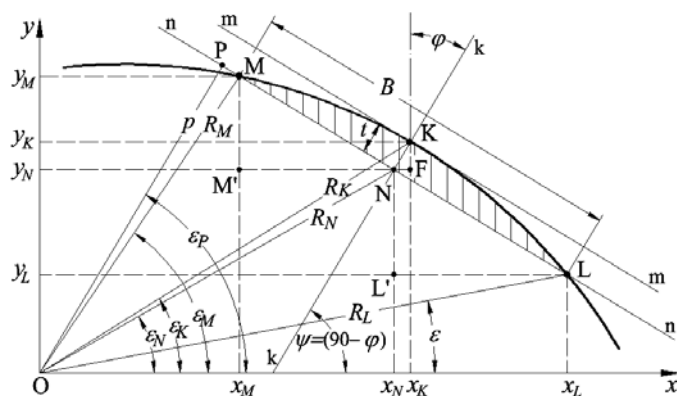


Рис. 7. Схема к определению ширины дорожки шлифования

Таким образом, задача определения ширины дорожки шлифования сводится к нахождению координат точек М и L, которые одновременно принадлежат секущей $n-n$ и профилю рельса, т.е. значения координат точек М и L можно определить совместным решением нормального уравнения прямой $n-n$, с уравнениями параметризации координат этих точек:

для точки М:

$$\begin{cases} x_M \cos \psi + y_M \sin \psi - R_N \cos(\psi - \varepsilon_N) = 0 \\ x_M = f(\varepsilon_M) \cos \varepsilon_M \\ y_M = f(\varepsilon_M) \sin \varepsilon_M \end{cases}$$

для точки L:

$$\begin{cases} x_L \cos \psi + y_L \sin \psi - R_N \cos(\psi - \varepsilon_N) = 0 \\ x_L = f(\varepsilon_L) \cos \varepsilon_L \\ y_L = f(\varepsilon_L) \sin \varepsilon_L \end{cases} \quad (13)$$

Совокупность данных о ширине дорожки шлифования в зависимости от глубины резания на каждом отдельном участке профиля дает возможность определения и назначения последовательности формирования ремонтного профиля рельса.

Ремонтный профиль рельса в нормативной документации представлен координатами шести точек и радиусами скруглений отдельных участков (рис. 8). Т.е. весь профиль можно описать пятью системами уравнений (для каждого из пяти участков) общий вид которых представлен системой (14).

$$\begin{cases} x = x_R + R_{np} \cos \vartheta \\ y = y_R + R_{np} \sin \vartheta \end{cases} \quad (14)$$

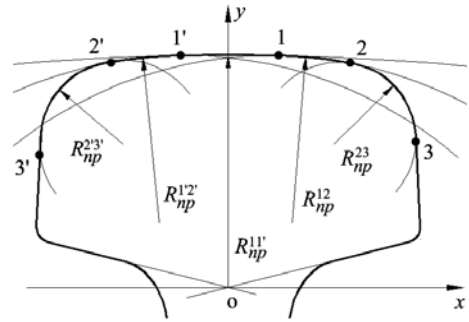


Рис. 8. Ремонтный профиль рельса

Для построения модели формирования ремонтного профиля рельса рассмотрим его участок совместно с фактическим профилем, описываемым уравнением (10) (рис. 9). Обобщенный моделирующий алгоритм формообразования профиля рельса представлен на рисунке 10.

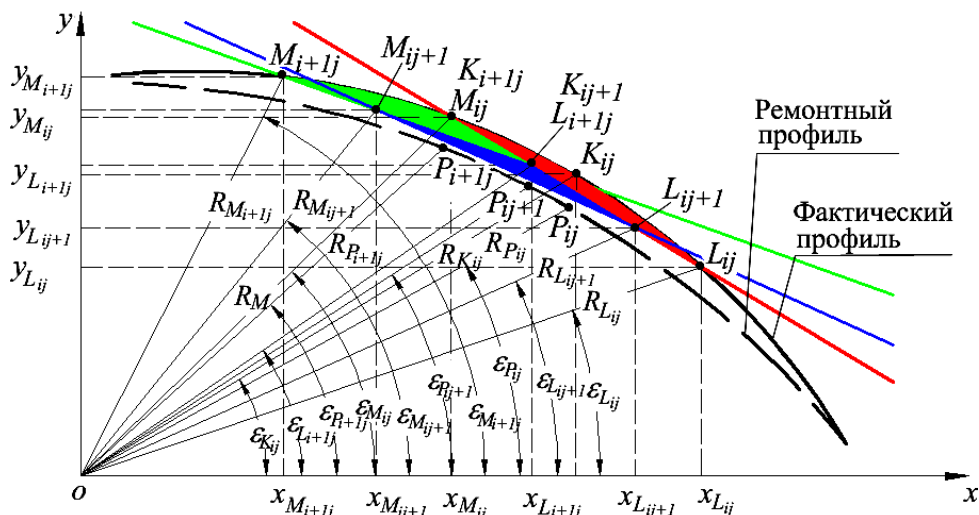


Рис. 9. Схема формообразования поперечного профиля рельса

Начальной точкой для формирования профиля примем точку фактического профиля рельса, координаты которой совпадают с координатами какой либо точки ремонтного профиля. Значения этих координат определяются в блоках 1-3 в соответствии с выражениями (8) и (12). Предположим, что в соответствии с полученными координатами контакт первого шлифовального круга с поверхностью рельса произойдет в точке K_{ij} (рис. 9). Для этой точки в блоке 4 определяется требуемое значение угла наклона шлифовальной головки (рис. 10). С учетом полученного значения глубины резания $t_{расч}$ для данной точки в блоках 5-7 определяются координаты точек M_{ij} и L_{ij} и значения ширины дорожки шлифования которые формируют базу данных в блоке 9.

Для последующего абразивного круга точкой контакта с рельсом будет являться точка M_{ij} , координаты которой описываются в блоках 10 и 11.

Сравнение координат ремонтного профиля с фактическим осуществляется в блоках 8 и 14 создающих циклы: i – по периметру профиля, j – по

глубине, которые в конечном итоге определяют необходимое количество проходов рельсошлифовального поезда.

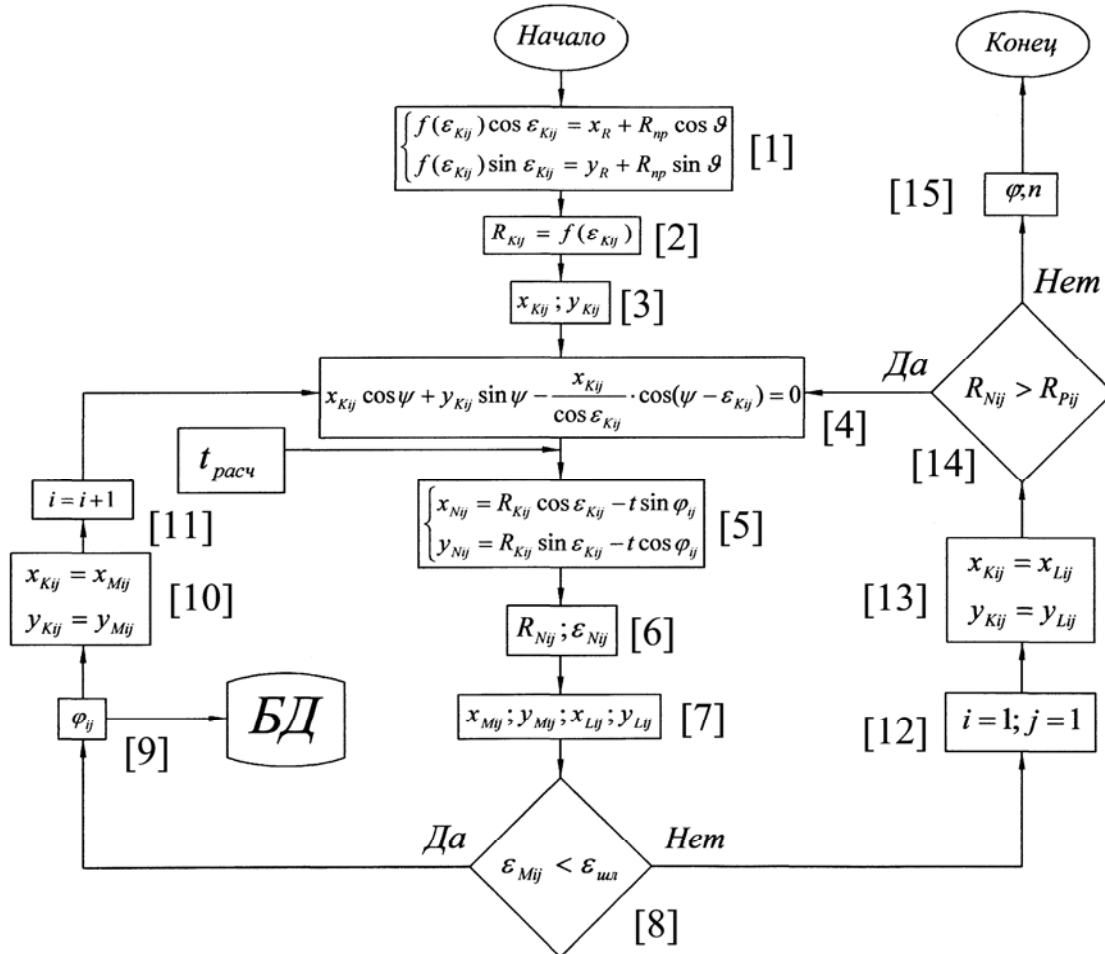


Рис. 10. Моделирующий алгоритм формообразования профиля рельса

Представленная модель формообразования поперечного профиля рельсов шлифованием несколькими инструментами, работающими по схеме плоского шлифования торцом круга, учитывающая технологическое наследование после обработки каждым абразивным кругом, позволяет повысить точность формообразования головки рельса, минимизировать количество проходов рельсошлифовального поезда и производить нормирование выполняемых операций.

Четвертая глава посвящена экспериментальным исследованиям взаимосвязи режимов и условий шлифования с эксплуатационными свойствами обработанной поверхности рельсов.

Рассмотрены причины и механизм образования дефектов в головке рельсов, а также влияние различных факторов на параметры усталостной прочности и износостойкости. Показано, что первостепенную роль в зарождении и дальнейшем развитии усталостных трещин в головке рельсов играют параметры качества поверхности. При обработке шлифованием формируется качественно новый уровень физико-механических свойств поверхности, который в значительной степени влияет на усталостную

прочность, износостойкость и общую долговечность рельсов. Основными параметрами качества поверхности, которые регламентируются нормативно-технической документацией по шлифованию рельсов, являются шероховатость и наличие прижогов на обработанной поверхности. В совокупности эти параметры определяют физическое состояние поверхности рельса после механической обработки.

Определение истинного влияния режимов шлифования рельсов на формирование шероховатости обработанной поверхности осуществлялось на основе экспериментальных данных. Зависимость шероховатости R_z от исследуемых факторов представлена линейным уравнением регрессии:

$$R_z = 193 \cdot t + 34 \cdot d_3 + 0,15 \cdot S_n - 0,44 \cdot v_{cp} - 16, \quad (15)$$

где t – глубина резания, мм; d_3 – средний диаметр абразивного зерна шлифовального круга, мм; S_n – рабочая скорость рельсошлифовального поезда (продольная минутная подача), м/мин; v_{cp} – средняя скорость движения зёрен, расположенных на разном расстоянии от оси вращения круга, м/с.

На основе экспериментальных данных проведен дисперсионный анализ, в ходе которого определена значимость регрессионного уравнения и его коэффициентов. Адекватность уравнения регрессии оценили средней ошибкой аппроксимации, которая составила 2,9 %.

Формирование математических моделей и последующий анализ температурных полей, применительно к процессу абразивной обработки базировались на анализе реальной физической картины взаимодействия поверхности обрабатываемого рельса с источниками теплообразования и фактических данных о свойствах материала, коэффициентах теплоотдачи и т.д. и разрабатывались на основе работ В.А. Аксенова.

Выбор и обоснование метода расчета температурных полей в материале проводился, исходя из положения, что источник теплоты является внешним, а его распространение в твердом теле подчиняется известному уравнению Фурье:

$$c\rho \frac{dT}{d\tau} = \frac{d}{dx} \left(\lambda \frac{dT}{dx} \right) + \frac{d}{dy} \left(\lambda \frac{dT}{dy} \right) + \frac{d}{dz} \left(\lambda \frac{dT}{dz} \right) + c\rho \left(V_x \frac{dT}{dx} + V_y \frac{dT}{dy} + V_z \frac{dT}{dz} \right). \quad (16)$$

Шероховатость поверхности и температура в зоне резания формируют остаточные напряжения в поверхностных слоях обработанной поверхности, которые в значительной степени определяют её эксплуатационные свойства.

Оценка остаточных напряжений основывалась на модели, предложенной профессором А.Ю. Албагачиевым. Согласно предложенной модели, суммарные остаточные напряжения определяются как

$$\sigma_{\text{сум}} = -\sigma_{\text{сил}} \pm \sigma_{\text{тем}} \pm \sigma_{\text{стр}}, \quad (17)$$

где $\sigma_{\text{сил}}$ – силовые остаточные напряжения; $\sigma_{\text{тем}}$ – температурные остаточные напряжения; $\sigma_{\text{стр}}$ – остаточные напряжения от структурно-фазовых превращений.

Рассмотрев на основе представленных моделей формирования параметров качества поверхности возможность увеличения производительности шлифования рельсов, можно сделать следующий вывод: наиболее благоприятным направлением повышения эффективности профильного шлифования рельсов является увеличение рабочей скорости поезда, т.к. это приводит к снижению теплового воздействия на рельс при обработке и уменьшению остаточных напряжений в поверхностном слое (рис. 11). С увеличением глубины резания наблюдается обратный эффект.

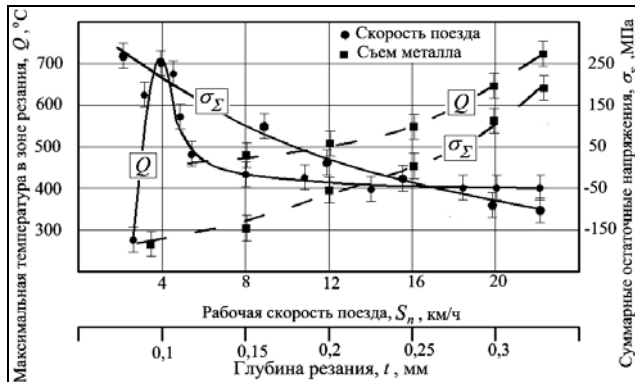


Рис. 11. Влияние режимов шлифования рельсов на температуру в зоне резания и остаточные напряжения в поверхностном слое

вания осуществлялось по критерию трещиностойкости, усталостной прочности и износостойкости. Исследования проводились на специально разработанных установках. Схемы и условия проведения исследований представлены в табл. 1.

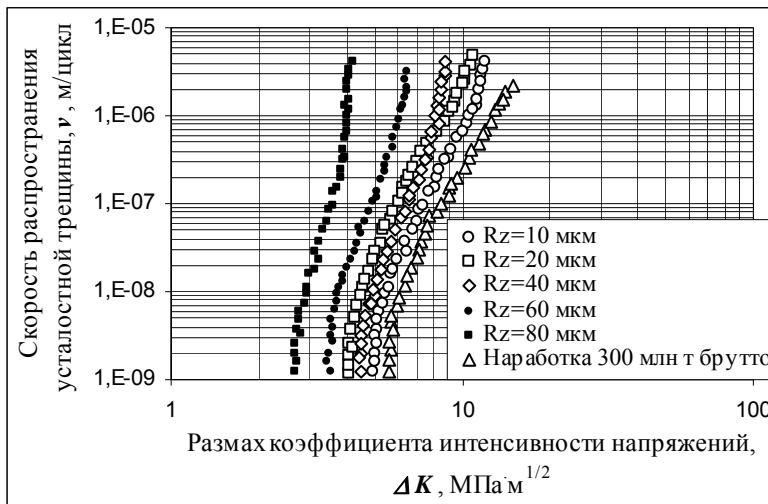


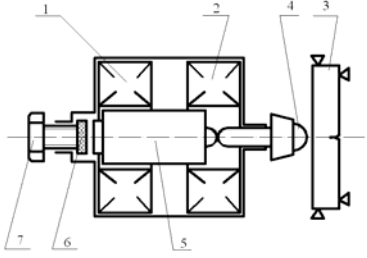
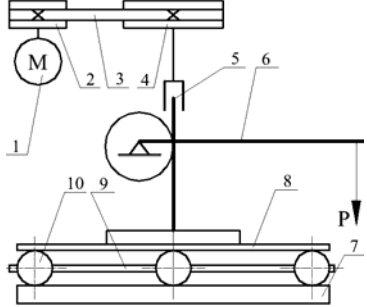
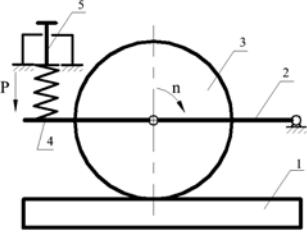
Рис. 12. Влияние шероховатости обработанной поверхности головки рельса на кинетические диаграммы усталостного разрушения растягивающих напряжений, наведенных в поверхности сильным местным нагревом и повышенной шероховатостью.

Представленные модели позволили выявить закономерность формирования шероховатости обработанной поверхности с учетом силового и температурного воздействия и её взаимосвязь с параметрами технологического процесса позволяющую реализовать управление качеством поверхности при шлифовании рельсов.

Определение эксплуатационных свойств поверхности катания рельсов после шлифования

Анализ результатов испытаний на циклическую трещиностойкость (рис. 12) показал, что увеличение микронеровностей после шлифования приводит к снижению циклической трещиностойкости. При этом грубое шлифование ($R_z=80$ мкм) может снизить трещиностойкость рельсов на 70...80 %, что можно считать результатом влияния остаточных

Испытания по оценке эксплуатационных свойств
обработанной поверхности головки рельсов

Вид испытаний	Схема проведения испытаний	Условия проведения испытаний	Цель испытаний	Критерии оценки
Ударно-циклическая трещиностойкость	 <p>1 – катушка прямого хода, 2 – катушка обратного хода, 3 – образец, 4 – индентор, 5 – боек, 6 – амортизатор, 7 – подвижный упор</p>	Испытание образцов из рельсовой стали по принципу «пульсирующий контакт», со схемой нагружения – трехточечный изгиб	Оценка пределов циклической трещиностойкости, определение кинетики зарождения и распространения усталостных трещин шлифованной поверхности	Количество циклов до начала развития трещины, скорость роста усталостной трещины, количество циклов до полного разрушения образца
Контактно-усталостная прочность	 <p>1 – электродвигатель, 2 – шкив ведущий, 3 – ремень, 4 – шкив ведомый, 5 – шпиндель, 6 – нагрузочное устройство, 7 – образец, 8 – обойма, 9 – сепаратор, 10 – индентор</p>	Испытание образцов из рельсовой стали методом обкатки шариками по схеме качения без проскальзывания, с созданием значительной контактной нагрузки, с сохранением постоянного пятна контакта	Определение пределов контактной выносливости, оценка кинетики развития питтингов на шлифованной поверхности	Количество питтингов, ширина и глубина дорожки катания, в зависимости от количества циклов нагружения. Весовая и металлографическая оценка
Износостойкость	 <p>1 – образец, 2 – рычаг, 3 – индентор, 4 – рычаг, 5 – механизм прижатия индентора к образцу с усилием P</p>	Испытание образцов из рельсовой стали в условиях трения скольжения	Определение сопротивления шлифованной поверхности изнашиванию	Объемный износ образцов, деформация образцов. Весовая и металлографическая оценка

Отмечено, что при определенных режимах шлифования наклеп, формирующийся в процессе механической обработки, в определенной степени нейтрализует действие концентраторов напряжений от полученных микронеровностей, тем самым увеличивая параметры трещиностойкости. Так, ΔK , соответствующее скорости роста усталостной трещины, 10^{-7} м/цикл для шероховатости $R_z=40$ мкм, на 10 % выше значения, соответствующего шероховатости $R_z=20$ мкм.

Сделанные выводы также подтверждаются результатами испытаний на контактно-усталостную прочность (рис. 13), которые показали, что большое влияние на стойкость к разрушению оказывает поверхностная твердость обрабатываемой поверхности. На графике можно отметить две области. Значения шероховатости, находящиеся в данных областях, обеспечивают повышенную усталостную прочность обработанной поверхности рельсов.

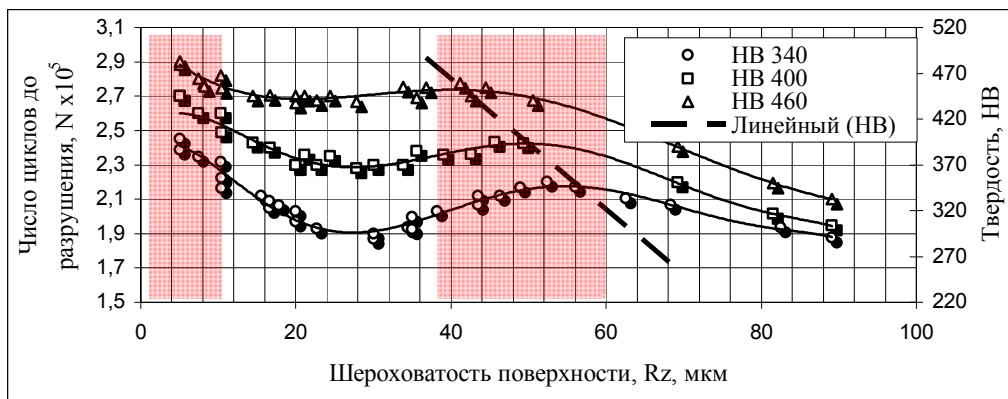


Рис. 13. Влияние шероховатости на усталостную прочность рельсов

Весовая оценка испытаний на износостойкость (рис. 14) показала, что снижение шероховатости на 20 мкм позволяет увеличить износостойкость на 22...24% за счет повышения сжимающих остаточных напряжений и увеличения микротвердости поверхностного слоя.

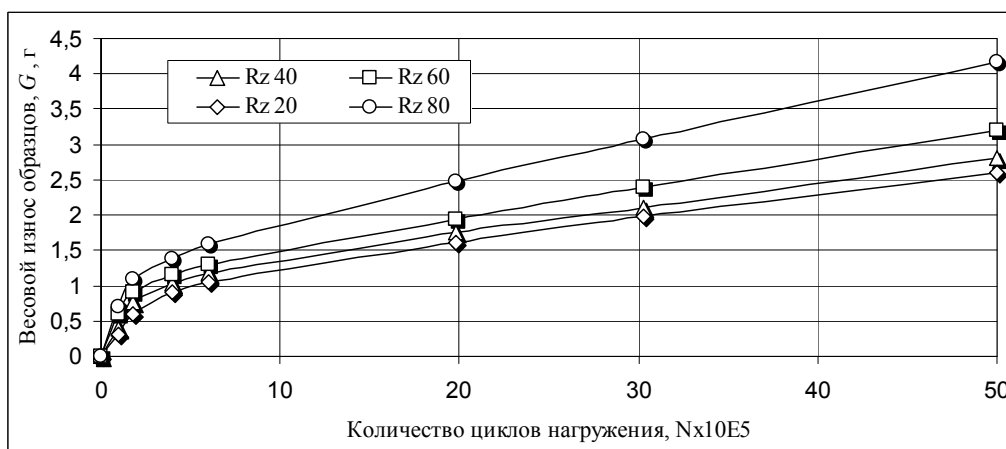


Рис. 14. Влияние шероховатости на износостойкость поверхности рельсов

Проведенные исследования по оценке эксплуатационных свойств отшлифованной поверхности рельсов показали, что для обеспечения повышенной эксплуатационной стойкости рельсов необходимо формировать шероховатость поверхности при шлифовании с учетом их исходной твердости и условий эксплуатации. На основе работ М.Х. Ахметзянова, М.А. Фришмана, Е.П. Бондаренко и др., в которых определяются напряженные состояния головки рельса в процессе работы с учетом вида нагружения в зависимости от кривизны участка пути и его расположения, определены значения шероховатости поверхности, обеспечивающие повышенные эксплуатационные свойства рельсов. В качестве примера в табл. 2 представлены значения требуемой шероховатости участков головки рельса лежащего на внутренней нити кривого участка пути радиусом более 500 м.

Таблица 2

Требуемая шероховатость участков головки рельса лежащего на внутренней кривого участка пути радиусом более 500 м

Условная схема нагрузки на рельс	Участки профиля и их границы по углам наклона шлифовальных головок, φ , град.		Характерный вид разрушения на участке профиля	Рекомендуемая шероховатость на участке профиля, R_z , мкм		
				Твердость участка НВ		
				340 ÷ 400	400 ÷ 460	> 460
	I	-60...-15	---	35...40	35...40	35...40
	II	-15...-10	Износ	16...20	16...20	16...20
	III	-10...-5	Образование поперечных трещин	64...68	54...58	44...48
	IV	-5...-1,5		64...68	54...58	44...48
	V	-1,5...+8	Контактно-усталостное	54...58	48...54	40...44
	VI	+8...+20	---	35...40	35...40	35...40

Таким образом, установлены закономерности изменения эксплуатационных свойств отшлифованных участков головки рельса по критериям циклической трещиностойкости, контактно-усталостной прочности и износостойкости. Это позволило предложить обосновать методы обеспечения повышенных эксплуатационных свойств рельсов за счет формирования требуемой шероховатости на отдельных участках головки рельса, воспринимающих различные виды нагружения в процессе эксплуатации.

В пятой главе рассмотрены теоретико-экспериментальные основы к разработке нового высокопроизводительного технологического процесса шлифования рельсов в условиях железнодорожного пути.

Создание нового технологического процесса определялось тремя направлениями.

Первое направление заключалось в устранении недостатка применяемой схемы шлифования (рис. 15, а), которая характеризуется невозможностью увеличения продольной подачи без снижения износостойкости инструмента. Известно, что производительность шлифования оценивают ве-

личной удаляемого за проход припуска t с площади в единицу времени. При этом весьма важен показатель износостойкости шлифовального круга. Данные два критерия определяют эффективность шлифования.

Теоретический анализ процесса плоского шлифования показал, что при работе шлифовального круга, когда нет продольной подачи S_n , а есть вращение круга ($n \neq 0$) и радиальная подача, обеспечивающая внедрение зерен в обрабатываемый материал на глубину t , все множество режущих абразивных зерен $Z_{общ}$ вступает в работу, обеспечивая максимальный съем металла. При возникновении главного движения резания n и подачи S_n изменится вектор и величина силы сопротивления материала разрушению. Изменившийся силовой характер процесса, изменит и условия резания. Зерна количеством Z , расположенные ближе к периферии круга, будут снимать по циклоидальным дугам стружку сечением m и толщиной t . Зерна же, расположенные ближе к центру вращения круга, работать не будут, чем вызовут рост значений t для зерен Z , расположенных на периферии, и их интенсивный износ по причине механического перенагружения. Таким образом, внешние зерна будут работать в условиях, близких к катастрофическому износу, даже без учета температуры, до которой нагреется связка в зависимости от выбранных режимов резания. Кроме того, с учетом схемы взаимодействия шлифовального круга с рельсом можно сделать вывод, что абразивные зерна, обладающие меньшей потенциальной режущей способностью, проходят в теле металла больший путь, чем зерна, обладающие большей потенциальной режущей способностью.

Для устранения указанных недостатков предложена схема (рис. 15, б), отличие которой состоит в том, что абразивный круг устанавливается под углом к поверхности обрабатываемого рельса с раскрытием навстречу направлению движения рельсошлифовального поезда (угол атаки).

Новая схема шлифования позволяет реализовать равномерное распределение припуска между наибольшим числом абразивных зерен на рабочей поверхности круга, что позволяет существенно снизить износ инструмента и уровень ударных нагрузок, возникающих из-за неровности обрабатываемой поверхности рельса.

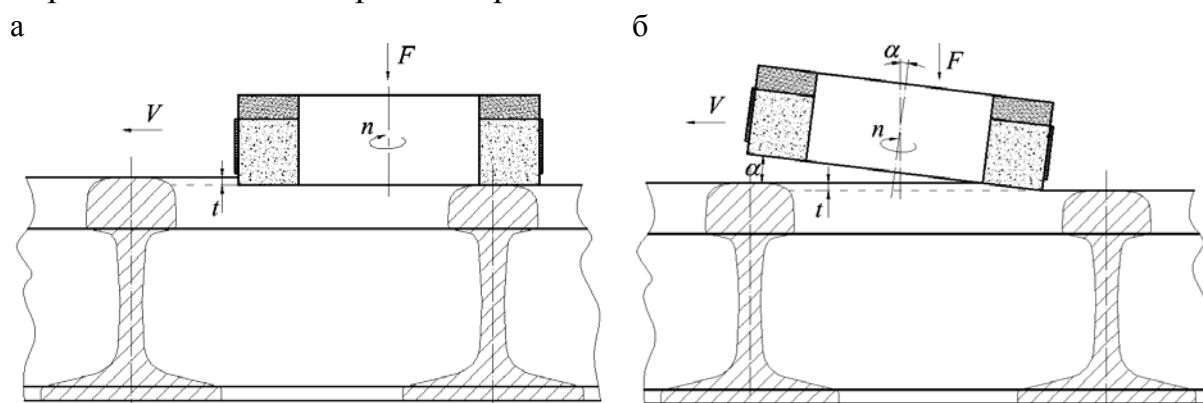


Рис. 15. Схемы шлифования рельсов
а – используемая; б – предлагаемая

Второе направление определялось тенденциями современного машиностроения. В настоящее время одним из наиболее перспективных направлений повышения эффективности процесса шлифования является повышение скорости вращения круга. Результаты фундаментальных теоретических и экспериментальных исследований в области шлифования, полученные в работах отечественных и зарубежных авторов, и накопленный практический опыт показали большое влияние скорости резания на выходные параметры процесса шлифования.

Эффективность применения высокоскоростного шлифования рассмотрена во многих работах, в которых на основании теоретических исследований доказывается, что увеличение скорости круга должно привести к пропорциональному уменьшению силы резания, увеличению съема металла на единицу силы резания и уменьшению шероховатости поверхности. Уменьшение силы резания и шероховатости является следствием уменьшения размеров удаляемых стружек при увеличении скорости круга. Если допустить, что удельная мощность шлифования постоянна, то станет очевидным, что наибольшие преимущества от применения высоких скоростей круга заключаются в пропорциональном увеличении интенсивности съема материала при тех же силах резания.

В настоящее время шлифование рельсов осуществляется торцешлифовальными кругами на бакелитовой связке с рабочей скоростью 47 м/с. Повышение рабочей скорости до 100 м/с с одновременным увеличением продольной подачи позволит увеличить производительность шлифования рельсов в несколько раз. Одним из основных факторов, ограничивающих повышение скорости резания, является прочность шлифовального круга, которая должна обеспечить безопасную его работу.

Третье направление определялось тем, что конструктивно рабочее оборудование существующих рельсошлифовальных поездов не может обеспечить эффективность выполнения работ на всем диапазоне возможных условий шлифования профиля рельсов.

Шкала токовой нагрузки на рельсошлифовальных поездах ограничена значениями 18 и 28 А, Эти значения определяют рабочий диапазон нагрузки электродвигателя. При выходе значений силы тока за рамки указанных границ происходит автоматическое отключение шлифовальных электродвигателей, а система управления работой рельсошлифовального поезда выводит их из работы как неисправные.

Если для принятой марки шлифовального круга оптимальная глубина резания составит $t=0,223$, то из графика (рис. 16) можно увидеть, что эта глубина резания может быть реализована в указанном токовом диапазоне, только если ширина дорожки шлифования находится в пределах 12-18 мм. Превышение значения B свыше 18 мм при максимальной токовой нагрузке 28 А автоматически будет снижать глубину резания за счет увеличения количества активно режущих зерен и снижения сил резания на единичном

зерне. Так, увеличение ширины дорожки шлифования до 24 мм приведет к снижению глубины резания на 25 % относительно оптимального значения t при $B=18$ мм. При этом режущая способность шлифовального круга не будет задействована в полной мере, что в целом будет снижать эффективность выполнения работ.

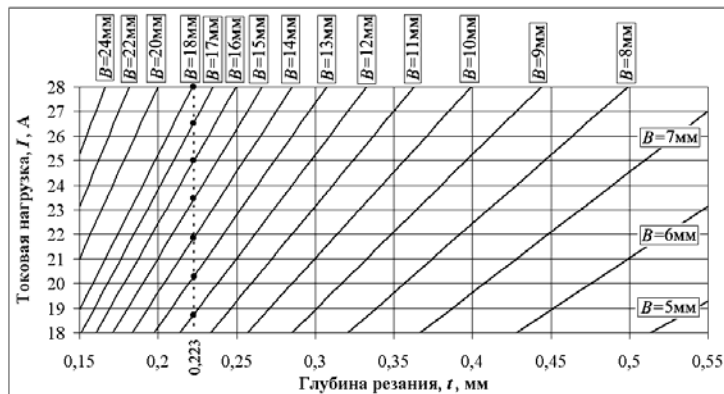


Рис. 16. Зависимость глубины резания от токовой нагрузки электродвигателя

Уменьшение ширины дорожки шлифования приводит к обратному эффекту, связанному со значительным увеличением глубина резания. Так, сьем металла при $I=28$ А, $B=8$ мм составит 0,5 мм, что превышает расчетное значение t на 55 %. При этом будет происходить катастрофический износ инструмента, значительно

снижающий коэффициент шлифования. Это дает объяснение неравномерному износу шлифовальных кругов работающих на различных участках головки рельса. Опыт эксплуатации рельсошлифовальных поездов показывает, что размерный износ шлифовальных кругов профилирующих тележек, где ширина дорожки шлифования составляет порядка 5-10 мм, в 3-4 раза превышает износ кругов сглаживающих тележек, где ширина дорожки шлифования в среднем составляет 20 мм. Устранение этого недостатка возможно изменением штатных режимов шлифования.

Комплексное исследование показателей процесса плоского шлифования торцом круга по трем вышеуказанным направлениям, позволило разработать технологию высокопроизводительного шлифования рельсов в условиях железнодорожного пути, позволяющего по результатам лабораторных исследований повысить производительность шлифования минимум в 2 раза.

Для экспериментов использовались абразивные круги для скоростного шлифования, изготовленные в ОАО «УралНИИАШ» в соответствии с результатами исследований по увеличению прочностных характеристик кругов.

Результаты лабораторных исследований новой технологии шлифования представлены в табл. 3.

Очевидно, что при шлифовании рельсов, так же как и при других видах шлифования, высокие скорости не всегда будут эффективными. Необходимо найти область рационального применения высоких скоростей резания, разработать технологические рекомендации по их применению.

Основные условия и результаты исследований новой технологии шлифования
(усредненные значения)

Диаметр шлифовального круга, мм	Угол продольного наклона круга, град	Глубина резания, мм	Скорость (продольная подача) км/ч, (м/с)	Частота вращения шлифовального круга, об/мин	Контролируемые параметры		
					Температура в зоне резания, °С	Шероховатость обработанной поверхности, мкм	Износ шлифовального круга, мм/час
Новая схема шлифования							
250	1,5	0,3	15	7000	450	40	5
Традиционная схема шлифования							
250	0	0,3	8	3600	600	80	8

Для реализации этой задачи разработаны методика расчетов режимов шлифования и автоматизированная система проектирования технологических процессов шлифования рельсов.

Таким образом, разработана технология высокопроизводительного процесса шлифования рельсов в условиях железнодорожного пути, результаты теоретических и экспериментальных исследований рациональных условий осуществления этого процесса, обеспечивающего повышенные эксплуатационные свойства рельсов.

В шестой главе показана промышленная реализация новой высокопроизводительной технологии шлифования рельсов в условиях железнодорожного пути.

Результаты исследований положены в основу создания опытного образца рабочего оборудования рельсошлифовального поезда для проведения опытно-промышленных испытаний технологии (RU 2391458 C1; RU 61722 U1; RU 84856 U1).

Опытный образец рабочего оборудования рельсошлифовального поезда состоит из одной перепрофилирующей тележки, в которую установлены четыре блока 1. В состав блока входят два приводных электродвигателя 2 со шлифовальными кругами 3 (рис. 17).

В опытном образце реализована возможность установки шлифовальному кругу 3 угла атаки в диапазоне 0-7° посредством механизма наклона электродвигателя 2 за счет поворота эксцентриковой оси 4 крепления подmotorной плиты 5. Также был изменен привод шлифовальных головок для обеспечения частоты вращения шлифовального круга в диапазоне 3500-7000 об/мин. Внесенные изменения в рабочее оборудование дали возможность увеличить рабочую скорость при шлифовании с 8 до 12 км/ч и провести комплекс испытаний с оценкой возможности применения скоростного шлифования в реальных условиях эксплуатации рельсошлифовального поезда.

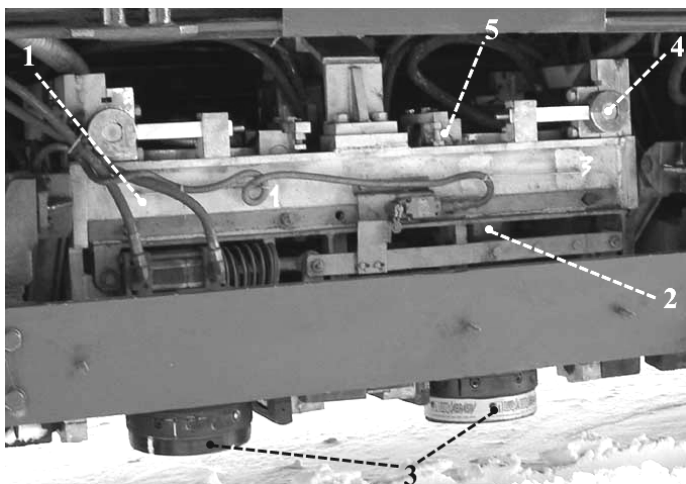


Рис. 17. Общий вид рельсошлифовального блока опытного образца

Опытно-промышленные испытания проводились на полигоне Западно-Сибирской железной дороги, на рельсошлифовальном поезде РШП-48 № 001, на который был установлен опытный образец. На первом этапе испытаний определялся оптимальный угол атаки шлифовального круга. При этом шлифование рельсов производилось с частотой вращения шлифовального

круга 4200 об/мин на различных рабочих скоростях поезда, с различными углами атаки в диапазоне $0 \div 7^\circ$. В ходе испытаний производилось измерение глубины резания, которая была критерием эффективности процесса шлифования. Результаты измерений представлены на рис. 18.

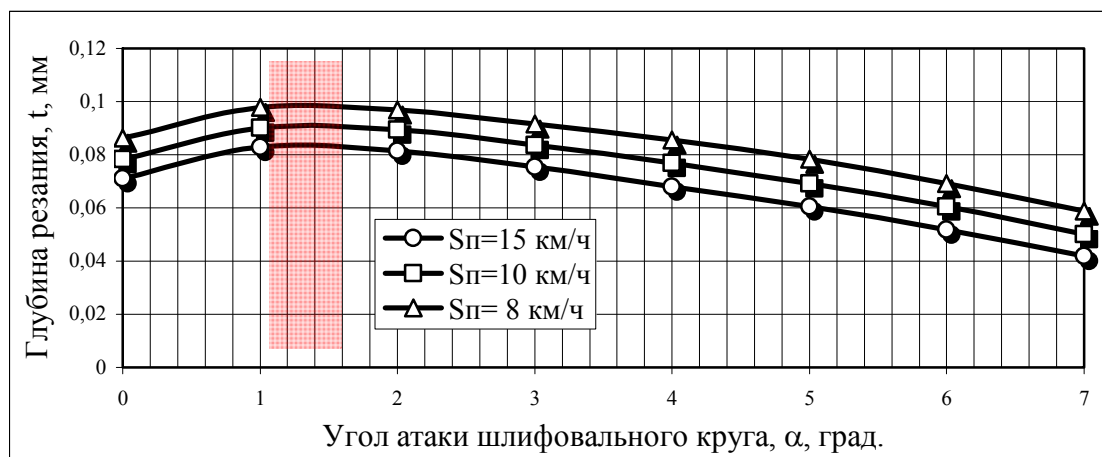


Рис. 18. Влияние угла атаки шлифовального круга на глубину резания

Измерения показали, что изменение продольного угла наклона шлифовального круга значительно влияет на сьем металла. Максимальная глубина резания достигается при угле наклона $1 \div 1,5^\circ$.

На втором этапе испытаний определялась область рационального применения высоких скоростей резания. При этом испытания по исследованию режимов шлифования проводились с постоянным углом атаки круга, который составлял $1,5^\circ$.

Средние значения измерений параметров процесса шлифования представлены на рис. 19.

В ходе испытаний было установлено, что при частоте вращения шлифовального круга 3600 об/мин увеличение рабочей скорости поезда с 8

до 12 км/ч приводит к уменьшению съема металла в среднем с 0.1 до 0.05 мм, т.е. глубина резания уменьшается на 50 %.

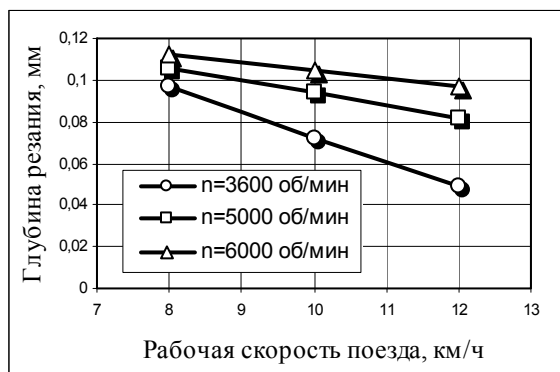


Рис. 19. Динамика изменения глубины резания в зависимости от скорости поезда и частоты вращения шлифовального круга



Рис. 20. Влияние зернистости абразивного инструмента на глубину резания

Увеличение частоты вращения шлифовального круга до 5000÷5200 об/мин позволяет стабилизировать процесс шлифования и увеличивать рабочую скорость поезда до 10 км/ч без потерь в съеме металла. Дальнейшее увеличение рабочей скорости поезда до 12 км/ч приводит к незначительному уменьшению глубины резания до значения 0.1 мм.

Повышение рабочей скорости поезда до 12 км/ч без изменений глубины резания может осуществляться при частоте вращения шлифовального круга 5800÷6200 об/мин.

При относительно невысокой рабочей скорости поезда 8 км/ч влияние частоты вращения шлифовального круга на глубину резания незначительно. Так, с увеличением частоты вращения с 3600 до 6000 об/мин при скорости 8 км/ч съем металла увеличивается на 0,01÷0,015 мм. На скоростях 11÷12 км/ч это влияние более ощутимо, и съем металла может увеличиться на 0,04÷0,05 мм.

Оценка влияния структуры абразивного инструмента проводилась с использованием трех рецептур шлифовальных кругов (рис. 20).

Результаты испытаний показали, что максимальный съем металла достигается при использовании абразивных кругов с максимальной зернистостью. При этом разница в глубине резания с использованием шлифовальных кругов с зернистостью 80 и 120 минимальна, а шероховатость поверхности, получаемая в ходе обработки, отличается на 20...30 мкм по Rz, что в значительной степени влияет на эксплуатационные свойства поверхности катания головки рельса. Это говорит об оптимальности абразивного инструмента с зернистостью 80.

В ходе испытаний отработаны основные режимы шлифования и определены оптимальные параметры технологического процесса скоростного шлифования. Изменение схемы шлифования позволило увеличить съем металла без изменений в интенсивности износа инструмента и каче-

ства шлифования. Реализация преимуществ, полученных при увеличении скорости шлифовального круга, позволила резко повысить эффективность технологического процесса шлифования рельсов в условиях железнодорожного пути.



Рис. 21. Рельсошлифовальный поезд РШП-16К

По результатам испытаний произведена корректировка конструкции рабочего оборудования и технологической документации, на основании которой проведена модернизация рельсошлифовального поезда РШП-16К (рис. 21) под разработанную высокопроизводительную технологию шлифования рельсов в условиях железнодорожного пути. В ходе модернизации на рабочем оборудовании ре-

ализована возможность обеспечения угла атаки $1,5^\circ$ шлифовальному кругу, а так же изменения его частоты вращения в диапазоне $3600 \div 6000$ об/мин с увеличением мощности привода шлифовальной головки с 15 до 25 кВт. Конструктивные особенности РШП-16К позволили технологически реализовать рабочую скорость до 12 км/ч, что превышает штатную рабочую скорость поезда в 2 раза.

После модернизации рельсошлифовальный поезд прошел промышленные испытания на полигоне ПМС-309 Московской Дирекции по ремонту пути – структурного подразделения ЦДРП – филиала ОАО «РЖД» и введен в эксплуатацию на базе РСП-3 Московской Дирекции по ремонту пути – структурного подразделения ЦДРП – филиала ОАО «РЖД», что подтверждается актами внедрения и промышленных испытаний.

Компактность, мобильность и высокая производительность модернизированного рельсошлифовального поезда позволили в значительной степени расширить область его применения.

Реализация разработанной высокопроизводительной технологии шлифования рельсов на рельсошлифовальном поезде РШП-16К позволила увеличить точность формообразования и обеспечить требуемую шероховатость обработанных участков головки рельсов, тем самым повысив качество их профилирования, и сформировать повышенные эксплуатационные свойства рельсов. В целом комплексное внедрение результатов исследований позволило в значительной степени повысить эффективность технологии шлифования рельсов в условиях железнодорожного пути.

В результате практического использования результатов исследований, общий экономический эффект составил 16 млн. рублей в год на один рельсошлифовальный поезд типа РШП-16, по ценам 2011 года.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Обоснованы и разработаны научно-методические основы высокопроизводительной технологии шлифования рельсов в условиях железнодорожного пути, позволившие сформировать технические и технологические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие железнодорожной отрасли и экономики страны в целом за счет повышения эффективности эксплуатации, содержания и ремонта железнодорожного пути за счет обеспечения качества профилирования рельсов.

2. Разработан комплекс математических моделей процесса шлифования рельсов, учитывающих особенности обработки в условиях железнодорожного пути, заключающиеся в упругой подвеске шлифовальных головок и большой протяженности обрабатываемой поверхности. Данные модели учитывают характеристики рельсошлифовального оборудования, параметры шлифовальных кругов, физико-механические свойства рельсов и технологические параметры процесса обработки при определении максимальной производительности с требуемым качеством профилирования рельсов и позволяют использовать глубину резания в качестве управляемого параметра механической обработки через усилие прижатия шлифовального круга к рельсу с экспериментально определенной погрешностью 10...12 %.

3. Разработана модель формообразования поперечного профиля головки рельса несколькими инструментами, работающими по схеме плоского шлифования торцом круга, учитывающая технологическое наследование после обработки каждым абразивным кругом. Данная методика позволяет обеспечить геометрическую точность головки рельса при формировании ремонтного профиля в соответствии с нормативно-технической документацией, минимизировать количество проходов рельсошлифовального поезда и производить нормирование выполняемых операций.

4. Выявлены закономерности изменения эксплуатационных свойств головки рельса после шлифования по критериям циклической трещиностойкости, контактно-усталостной прочности и износостойкости в зависимости от параметров качества поверхности. Полученные численные значения подтверждают возможность управления уровнем эксплуатационных свойств рельсов на основе формирования требуемых параметров качества обработанной поверхности. Изменение шероховатости обработанной поверхности рельсов на 20 мкм приводит к изменению её износостойкости на 22...24 %, трещиностойкости и усталостной прочности на 16...18 %.

5. Предложен и обоснован метод обеспечения повышенных эксплуатационных свойств рельсов за счет формирования требуемой шероховатости на отдельных участках головки рельса, воспринимающих различные виды нагружения в процессе эксплуатации. Для обеспечения повышенной трещиностойкости и контактно-усталостной прочности шероховатость от-

дельных участков головки рельсов формируется в зависимости от их поверхностной твердости и условий нагружения.

6. Разработан высокопроизводительный технологический процесс шлифования рельсов в условиях железнодорожного пути, обеспечивающий повышенные эксплуатационные свойства рельсов за счет формирования требуемых параметров качества обработанной поверхности. Новый технологический процесс позволил увеличить эксплуатационный ресурс рельсов до 30...40 %, снизить эксплуатационные расходы на 15...20 % за счет экономии абразивного инструмента, расходных материалов и топлива.

7. Разработана автоматизированная система проектирования технологических процессов шлифования рельсов в условиях железнодорожного пути. Её применение позволяет реализовать принципиально новый подход в планировании технологических воздействий, выборе режимов и условий шлифования, заключающийся в обеспечении повышенного уровня эксплуатационных свойств рельсов с максимальной производительностью, за счет обеспечения качества профилирования рельсов.

8. Создано рабочее оборудование рельсошлифовального поезда для реализации высокопроизводительного технологического процесса, позволяющее увеличить рабочую скорость рельсошлифовального поезда с 6...8 км/ч до 12...15 км/ч при величине съёма металла 0,25...0,30 мм/ход. Реализация разработанной технологии с помощью нового рабочего оборудования позволяет повысить эффективность выполнения работ по следующим критериям: увеличение производительности шлифования рельсов в 2...2,5 раза, сокращение в 1,5...2 раза время производства работ в «окно».

9. Для реализации результатов исследований проведена модернизация рабочего оборудования рельсошлифовального поезда РШП-16К, что позволило увеличить рабочую скорость при шлифовании в 2 раза, увеличить точность формообразования и обеспечить требуемую шероховатость обработанных участков головки рельсов, тем самым повысив качество их профилирования и сформировать повышенные эксплуатационные свойства рельсов.

Содержание диссертационной работы изложено в 47 научных публикациях. Основные положения и выводы представлены в следующих 30 публикациях:

Публикации в научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Ильиных, А.С. Научно-методические основы высокопроизводительной технологии шлифования рельсов в условиях железнодорожного пути / А.С. Ильиных // Вестник СГТУ. – 2013. – № 1. С. 82-88.
2. Ильиных, А.С. Разработка абразивного инструмента для скоростного шлифования рельсов / А.С. Ильиных // Технология машиностроения. – 2013. – № 3. С. 26-30.
3. Ильиных, А.С. Модернизация рабочего оборудования рельсошлифовального поезда / А.С. Ильиных // Строительные и дорожные машины. – 2013. – № 2. С. 12-18.

4. Ильиных, А.С. Теплофизический анализ процесса плоского шлифования рельсов торцом круга / В.А. Аксенов, А.С. Ильиных // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. Машиностроение. – 2012. – № 33. С. 96-100.
5. Ильиных, А.С. Формирование качества поверхности при плоском шлифовании торцом круга / А.С. Ильиных // Технология машиностроения. – 2011. – № 4. С. 19-22.
6. Ильиных, А.С. Оценка эффективности технологического процесса шлифования рельсов в пути / В.А. Аксенов, А.С. Ильиных // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2007. – № 1. С. 49-57.
7. Ильиных, А.С. Повышение эффективности профильного шлифования рельсов на основе применения новой схемы резания / А.С. Ильиных, В.М. Григорьев // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2007. – № 3 (28). С. 191-195.
8. Ильиных, А.С. Повышение эффективности профильного шлифования рельсов в современных условиях эксплуатации железнодорожного пути на основе применения новой схемы резания / В.А. Аксенов, А.С. Ильиных // Наука и техника транспорта. – 2011. – № 4. С. 86-91.
9. Ильиных, А.С. Скоростное шлифование рельсов в пути / А.С. Ильиных // Мир транспорта. – 2011. – № 3 (36). С. 56-61.
10. Ильиных, А.С. Влияние процесса шлифования на уровень эксплуатационных свойств рельсов / А.С. Ильиных // Научное обозрение. – 2006. – № 2. С. 88-91.
11. Ильиных, А.С. Обеспечение требований охраны труда и безопасности жизнедеятельности за счет реализации технологии скоростного шлифования рельсов в пути / В.А. Аксенов, А.С. Ильиных // Наука и техника транспорта. – 2012. – № 2. С. 102-105.
12. Ильиных, А.С. Изменение параметров показателей поверхности бесстыкового пути при шлифовании / В.А. Аксенов, А.С. Ильиных, А.В. Бугров // Научное обозрение. – 2006. – № 6. С. 49-52.
13. Ильиных, А.С. Режимы стойкости и пределы усталости / А.С. Ильиных, В.М. Григорьев // Мир транспорта. – 2007. – № 1 (17). С. 58-62.
14. Ильиных, А.С. Управление эксплуатационными свойствами бесстыкового пути на основе оптимизации технологии шлифования / А.С. Ильиных, А.В. Бугров // Научное обозрение. – 2006. – № 6. С. 53-57.
15. Ильиных, А.С. Применение профильного шлифования рельсов при ремонте и содержании малообслуживаемого пути на участках с различными условиями эксплуатации / В.А. Аксенов, А.С. Ильиных, А.В. Матафонов // Наука и техника транспорта. – 2013. – № 2. С. 37-40.

Патенты на изобретения и полезные модели

16. Патент на изобретение RU № 2391458 С1 МПК Е 01 В 31/13 31/17. Способ обработки поверхности головки рельса / В.А. Аксенов, А.С. Ильиных, С.В. Щелоков // БИ. 2010. – № 11.
17. Патент на полезную модель RU № 84856 U1 МПК Е 01 В 31/17. Устройство для шлифования длинномерных изделий / В.А. Аксенов, А.С. Ильиных, А.Д. Абрамов, В.В. Банул // БИ. 2009. – № 22.
18. Патент на полезную модель RU № 61722 U1 МПК Е 01 В 31/17. Устройство шлифования длинномерных изделий / В.А. Аксенов, А.С. Ильиных, С.В. Щелоков, В.Н. Фефелов // БИ. 2007. – № 7.
19. Патент на полезную модель RU № 59472 U1 МПК В 24 D 5/02. Шлифовальный круг. / В.А. Аксенов, А.С. Ильиных, С.В. Щелоков // БИ. 2006. – № 36.
20. Патент на полезную модель RU № 39699 U1 МПК 7 G 01 В 5/008. Устройство для измерения геометрических параметров головки рельса / В.А. Аксенов, А.С. Ильиных, В.А. Шаламов // БИ. 2004. – № 22.

21. Патент на полезную модель RU № 85632 U1 МПК G 01 В 5/008. Устройство для измерения геометрических параметров головки рельса. / А.С. Ильиных // БИ. 2009. – № 22.
22. Патент на изобретение RU № 2328719 С2 МПК G 01 N 3/56. Машина для испытания материалов на трение и изнашивание / В.А.Аксенов, А.С. Ильиных, С.В. Щелоков // БИ. 2008. – № 19.

Публикации в других изданиях

23. Ильиных, А.С. Обобщенная математическая модель процесса профильного шлифования рельсов / А.С. Ильиных // Вестник Восточно-Украинского национального университета имени В. Даля. – 2012. – № 5 (176). Ч.2. С. 11-18.
24. Ильиных, А.С. Автоматизированная система проектирования технологического процесса шлифования рельсов / А.С. Ильиных // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций имени М. Тынышпаева. – 2012. – № 4 (77). С. 4-7.
25. Ильиных, А.С. Особенности современной ресурсосберегающей технологии шлифования рельсов в пути / А.С. Ильиных // Политранспортные системы: материалы VII Всероссийской научно-технической конференции. – Красноярск: СГУПС, 2010. С. 249-253.
26. Ильиных, А.С. Совершенствование технологии профильного шлифования рельсов в современных условиях эксплуатации железнодорожного пути / А.С. Ильиных // Труды VI Международного симпозиума по трибофатике – МСТФ 2010. – Минск: БГУ, 2010. С. 89-90.
27. Ильиных, А.С. Влияние процесса шлифования на уровень эксплуатационных свойств рельсов / А.С. Ильиных // Научная жизнь. – 2009. – № 3. С. 11.
28. Ильиных, А.С. Технологические особенности процесса шлифования рельсов в пути и их влияние на эксплуатационную стойкость рельсов / В.А. Аксенов, А.С. Ильиных // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – Новосибирск, 2007. – Вып. 17. С. 216-221.
29. Ильиных, А.С. Исследование показателей качества поверхности рельсов с параметрами усталостного разрушения / А.С. Ильиных, С.В. Щелоков, В.Н. Фефелов // Вестник Восточно-Украинского национального университета имени В. Даля. – 2006. – № 8 (102). С. 185-189.
30. Ильиных, А.С. Снижение эксплуатационных расходов предприятий железнодорожного транспорта на основе оптимизации технологических процессов / О.А. Шаламова, В.Н. Фефелов, А.С. Ильиных // Вестник Восточно-Украинского национального университета имени В. Даля. – 2005. – № 8 (90). С. 220-223.

Подписано в печать 20.06.2013

Бум. офсет.

Тираж 100 экз.

Усл. печ. л. 2,0

Заказ

Формат 60×84 1/16

Уч.-изд. л. 2,0

Бесплатно

Саратовский государственный технический университет

410054, Саратов, Политехническая ул., 77

Отпечатано в издательстве СГТУ 410054, Саратов, Политехническая ул., 77