

Казахский агротехнический университет им. С.Сейфуллина

УДК 629.4.027.434/5

На правах рукописи

**САРСЕМБАЕВА ТОЛКЫН ЕРЖАНОВНА**

**Исследование плазменного упрочнения цельнокатаных колес для  
повышения технического уровня обработки и их качества  
по международному стандарту ИСО 1005-6**

6D073200 – Стандартизация и сертификация

Диссертация на соискание степени  
доктора философии (PhD)

Научные консультанты  
доктор технических наук,  
профессор  
А.Т. Канаев

кандидат технических наук,  
доцент  
П.А. Тополянский  
(Санкт-Петербург)

Республика Казахстан  
Нур-Султан, 2021

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ</b> .....	4
<b>ОПРЕДЕЛЕНИЯ</b> .....	6
<b>ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ</b> .....	8
<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	9
<b>1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ И МЕХАНИЗМЫ ИЗНАШИВАНИЯ ТРУЩИХСЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ</b> .....	13
1.1 Механизмы изнашивания трущихся поверхностей.....	16
1.1.1 Виды и характеристика изнашиваний.....	16
1.2 Закономерности изнашивания сопряженных деталей и изделий....	18
1.3 Способы повышения износостойкости материалов.....	23
1.4 Традиционные технологии повышения износостойкости колес.....	25
1.5 Инновационные технологии повышения износостойкости колес... Выводы по первому разделу.....	28 36
<b>2 МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ</b> .....	38
2.1 Исследования структур методами оптической и электронной микроскопии.....	38
2.2 Методы измерения микротвердости и определения механических свойств.....	39
2.3 Методы испытания на изнашивание.....	42
2.4 Механические и рентгенографические методы определения остаточных напряжений..... Выводы по второму разделу.....	43 44
<b>3 ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНО-ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА КОЛЕСНОЙ СТАЛИ</b> .....	46
3.1 Использование метода активного эксперимента для выбора режима плазменной обработки.....	46
3.2 Определение модели оценки качества цельнокатаной колесной стали.....	48
3.3 Исследование влияния скорости нагрева и охлаждения при плазменной закалке на параметры упрочненной зоны.....	51
3.4 Исследование условий формирования градиентно-слоистой структуры в колесной стали..... Выводы по третьему разделу.....	60 68
<b>4 ВЛИЯНИЕ ГРЕБНЕВОГО КОНТАКТА И СООТНОШЕНИЯ ТВЕРДОСТИ КОЛЕСА И РЕЛЬСА НА ИЗНОС</b> .....	70
4.1 Влияние гребневого контакта с рельсом и профиля поверхности катания на изнашивание колес.....	70
4.2 Исследование влияния повышения твердости пары трения «колесо-рельс» на износ.....	74

4.3	Определение оптимального соотношения твердости колеса и рельса снижающего интенсивность износа.....	78
4.4	Влияние внутренних факторов на износостойкость.....	81
	Выводы по четвертому разделу.....	84
<b>5</b>	<b>ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ В СОЧЕТАНИИ С ОБЪЕМНОЙ ЗАКАЛКОЙ НА ИЗНОСО И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ.....</b>	<b>86</b>
5.1	Сравнительное исследование влияния способов объемно-термической обработки на механические свойства колес.....	86
5.2	Исследование влияния плазменной обработки в сочетании с объемной закалкой на износ и трещиностойкость колес.....	92
5.3	Влияние параметров плазменной обработки на характер распределения остаточных напряжений в колесной стали.....	96
	Выводы по пятому разделу.....	101
	<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>103</b>
	<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....</b>	<b>110</b>
	<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А – Патент Республики Казахстан на полезную модель.....</b>	<b>118</b>
	<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б – Подтверждение участия в научных проектах.....</b>	<b>119</b>
	<b>ПРИЛОЖЕНИЕ В – Акт об использовании в учебном процессе результатов НИР.....</b>	<b>126</b>
	<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Г – Фотографии микроструктур по сечению упрочненной зоны.....</b>	<b>129</b>
	<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Д – Акты испытания.....</b>	<b>134</b>

## НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящей диссертации использованы ссылки на следующие стандарты:

СТ РК 1.9-2003. Государственная система стандартизации Республики Казахстан. Порядок применения международных, региональных и национальных стандартов и нормативных документов по стандартизации, метрологии, сертификации и аккредитации.

ГОСТ 7.12-93. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая запись. Сокращение слов на русском языке. Общие требования и правила.

СТ РК ИСО 1005-6-2007. Подвижной состав железных дорог. Часть 6. Безбандажные колеса для тяговых и прицепных вагонов. Технические условия поставки.

ГОСТ 8.417-81. Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы физических величин.

ГОСТ 1497-84. (ИСО 6892-84, СТ СЭВ 471-88). Металлы. Методы испытаний на растяжения.

ГОСТ 9454-78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах.

ГОСТ 9450-76. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников.

ГОСТ 9013-59. Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу.

ГОСТ 9012-59. (ИСО 410 – 82, ИСО 6506-81). Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю.

ГОСТ 2999-75. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу.

ГОСТ 1778-70. Сталь. Металлографические методы определения неметаллических включений.

ГОСТ 5639-82. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна.

ГОСТ 23.002-78. Обеспечение износостойкости изделий. Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения.

ГОСТ 25.501-78. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы испытаний на контактную усталость.

ГОСТ 3225-80. ГОСТ 398-2010. Бандажи черновые для локомотивов железных дорог широкой колеи. Типы и размеры.

ГОСТ 11018-87. ГОСТ 11018-2011. Колесные пары тягового подвижного состава железных дорог колеи 1520 мм.

ГОСТ 8233. Контроль микроструктуры.

ГОСТ 10791-2011. Колеса цельнокатаные. Технические условия.

ГОСТ 27674-88. Трение, изнашивание и смазка.

ГОСТ Р ИСО/МЭК 90003-2014. Разработка программных продуктов.  
Руководящие указания по применению ИСО 9001:2008 при разработке программных продуктов.

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В настоящей диссертации применяют следующие термины с соответствующими определениями:

**Качество** – это совокупность характеристик объекта, относящихся к его способности удовлетворять установленные и предполагаемые потребности.

**Фазовый состав стали** – химический состав, атомно-кристаллическое строение всех фаз, образующихся в стали.

**Структура** – форма, размеры, относительное количество и характер взаимного расположения составляющих частиц всех фаз, а также дефектов строения стали.

**Градиентно-слоистые структуры** – структуры, формирующиеся при непрерывном охлаждении, при котором не разграничиваются процессы образования чистых структур. К сталям и сплавам придают новые, ранее неизвестные, физико-механические свойства, в т.ч. высокие эксплуатационные.

**Поверхность катания** – рабочая поверхность обода, которая соприкасается с рельсом во время перемещения.

**Одноточечный контакт** – выкружка на колесе контактирует с выкружкой на головке рельса.

**Двухточечный контакт** – поверхность катания обода и гребня колеса контактирует с головкой рельса и его боковой гранью.

**Конформный контакт** – форма контакта области гребня колеса и зоны рабочей выкружки, при которой профили колеса и рельса имеют подобные очертания.

**Контактная усталость** – усталостные повреждения, вызываемые циклическими воздействиями в зонах контакта колеса и рельса.

**Выкрашивание** – дефект колеса контактно-усталостного происхождения, заключающийся в отделении мелких частиц металла и трещин, зародившихся в поверхностном слое.

**Тонкий гребень** – дефект колеса, состоящий в том, что гребень колеса изношен до предельной величины.

**Тонкий обод** – дефект колеса, состоящий в том, что в результате обточек и изнашивания толщина обода становится меньше допустимой.

**Вышербины** – дефекты колеса, состоящие в выкрашивании металла с поверхности катания до предельной глубины и размеров вследствие контактно-усталостных процессов и возникновения дефектов термомеханического происхождения.

**Навары** – дефект колеса, вызванные образованием на поверхности катания наплывов из смеси материалов тормозной колодки, рельса и колеса.

**Ползун** – дефект колеса, вызванный скольжением колеса по рельсу при торможении. Ползун возникает при торможении, когда колесо блокируется и скользит по рельсу без вращения.

**Наплыв** – пластическое течение металла в зоне выкружки рельса или наружной боковой поверхности обода колеса, сопровождающийся разрывом металла внутри обода.

**Прокат** – истирание колеса или рельса в процессе износа.

**Смятие головки рельса** – уплощение или уширение головки рельса, которое может включать раздавливание всей головки.

**Колесная пара** – уникальный механизм, который обеспечивает восприятие вертикальной нагрузки, направляющую функцию и передачу тяговой и тормозной энергии.

## ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

$A_{c1}$	– нижняя критическая температура
$A_{c3}$	– верхняя критическая температура
ГРС	– гребнерельсосмазыватель
{110}	– плоскости скольжения
$\langle 111 \rangle$	– направления скольжения
$\lambda$	– величина относительного проскальзывания
$\rho$	– максимальное давление на площадке контакта
$\sigma_B$	– временное сопротивление
$\sigma_T$	– предел текучести
$\Psi$	– относительное сужение
$\delta$	– относительное удлинение
HRC	– твердость по Роквеллу
HB	– твердость по Бринелю
KCU	– ударная вязкость
$q$	– тепловой поток в материал
$a$ ,	– коэффициент температуропроводности
$I$	– коэффициент теплопроводности
$\tau$	– время
HV	– твердость по Виккерсу
$h$	– толщина изношенного слоя
$\vartheta$	– относительная скорость
$I_h$	– линейная интенсивность изнашивания
$I_g$	– массовая интенсивность изнашивания
$\dot{L}$	– путь трения
$f$	– коэффициент трения
$\mu$	– коэффициент Пуассона
$d$	– диаметр пятна нагрева
$E$	– модуль нормальной упругости



## ВВЕДЕНИЕ

### **Общая характеристика работы.**

Диссертационная работа посвящена исследованию процессов повышения износостойкости цельнокатаных железнодорожных колес в паре трения «колесо-рельс» с использованием плазменной обработки, приводящей модернизации структуры поверхностного слоя стали при неизменном химическом составе, структуры и свойств центральных слоев обрабатываемого изделия.

### **Актуальность темы.**

Анализ современного состояния колесных пар грузовых вагонов, поступающих в плановые виды ремонта и текущий отцепочный ремонт показывает, что основной причиной обточек колес является износ поверхности катания.

По этому дефекту обтачивается до 50% колес. Значительное количество колес (до 35%) выходит из строя по тормозным и тепловым повреждениям. При больших нагрузках и высоких скоростях движения тонкие поверхностные слои нагреваются до температур, превышающих критические точки ( $A_{c1}$ ,  $A_{c3}$ ) и при последующем ускоренном охлаждении возможно образование твердого, в то же время хрупкого, мартенсита, что приводит к растрескиванию поверхностных слоев. Эти данные показывают, что повышение износостойкости поверхности катания (гребня и обода колеса) железнодорожных колес с использованием инновационной плазменной обработки является актуальной.

Аргументируется это тем, что, с одной стороны, повышение износостойкости элементов колесных пар является важной проблемой железнодорожного транспорта, являющегося ведущей отраслью экономики страны, с другой стороны, имеется острая необходимость в том, что для повышения износостойкости и эксплуатационного ресурса колесных пар необходимо создать технологический участок по плазменному упрочнению колесных пар, позволяющий ремонтным депо достигнуть гарантированное снижение интенсивности их износа.

Привлекательность и перспективность плазменной технологии упрочнения обусловлено универсальностью ее параметров, доступностью, экологичностью и экономической эффективностью использования. При этом, не изменяя общего химического состава материала и его физико-механических свойств во внутренних слоях, такая обработка легко вписывается в технологический процесс ремонта колес, малозатратна, достаточно производительна и, являясь финишной операцией, позволяет эффективно увеличить эксплуатационную стойкость и служебный ресурс вагонных колесных пар.

**Целью работы** является повышение качества и эксплуатационного ресурса колесных пар поверхностной плазменной обработкой.

**Для достижения поставленной цели были определены и решены следующие основные задачи:**

– исследование особенностей формирования градиентно-слоистой структуры при сверхбыстрых скоростях нагрева и охлаждения ( $\sim 6000^\circ\text{C}$ ) и кратковременностью воздействия на металл ( $\sim 10^{-2}$ - $10^{-3}$  с);

– исследование влияния режимов дифференциальной обработки элементов колеса (обода, диска и ступицы) на его трещиностойкость и надежность;

– изучение влияния поверхностной плазменной обработки в сочетании с предварительной объемной закалкой колеса.

– исследование влияния распределения остаточных напряжений в ободе колеса на повышение износо и трещиностойкости;

– рекомендации по оптимальному диапазону твердости колеса и рельса и глубине упрочненной зоны, обеспечивающей повышение эксплуатационного ресурса колесных пар.

#### **Новизна работы:**

1. Показано, что повышение износостойкости металла при использовании плазменной обработки связано с образованием в упрочненном поверхностном слое неоднородной градиентно-слоистой структуры, состоящей из отпущенного мартенсита и феррито-цементитной смеси различной степени дисперсности.

2. Определено, что сверх высокие скорости нагрева и охлаждения при плазменной закалке приводит к сильному измельчению фазовых и структурных составляющих поверхностного слоя стали и соответствующему повышению ее физико-механическими и служебных свойств.

3. Показано, что сочетание предварительной объемно-термической обработки колеса с поверхностно-плазменной закалкой приводит к существенному улучшению как износостойкости, так и контактно-усталостной прочности (трещиностойкости).

#### **Практическая новизна работы**

Техническая новизна диссертационной работы состоит в том, что принято решение о выдаче патента на полезную модель РК «Способ и устройство для плазменной обработки железнодородного колеса» (Приложение А) согласно заявке от 18 декабря 2019 года № рег. 4808.

#### **Практическая значимость работы:**

– установлена оптимальная глубина упрочненной зоны (1,5-2,0 мм) с поверхностной твердостью  $\sim 840$ - $860$  HV и обеспечивающая гарантированное повышение эксплуатационного ресурса колесных пар в 2,0-2,5 раза;

– определено оптимальное соотношение твердости колеса и рельса в паре трения «колесо-рельс», которое находится в диапазоне 1,22-1,86 и существенно снижает интенсивность износа. Показано, что оптимальный диапазон твердости колеса находится в интервале HV554-877, а соотношение  $HV_{\text{к}}/HV_{\text{р}}$  находится в пределах 1,22-1,86. Установлено, что увеличение твердости свыше 900-950HV может привести к трещинообразованию и интенсивному износу рельса.

Упрочнение гребней колеса на низкую твердость 277-481 неэффективен, так как износостойкость улучшается незначительно;

– показано, что оптимальное распределение остаточных напряжений (сжимающих в поверхностном слое переходом в растягивающие в промежуточный и центральный слои) достигается при мощности плазменной струи 15 кВт, скорости упрочнения 10-15 мм/с, ширине закаливаемой дорожки 25-30 мм.

#### **Методологическая база и метрологическое обеспечение исследований**

Методологической базой исследований является идея осуществлении глубокой связи между структурой и физико-механическими, технологическими, служебными свойствами металлических материалов. Исследования выполнены на основе патентно-информационного поиска и проведения экспериментальных работ в лабораторном и опытно-производственном масштабе. При этом использованы как традиционные, так и современные методы научного исследования. Метрологические (измерительные) работы выполнялись на контрольно-измерительных приборах высокого класса точности, поверенных в соответствии с нормативными документами.

Объект исследования – обод и гребень цельнокатаных колес после различных видов упрочняющей термической обработки.

Предмет исследования – выявление возможности повышения износостойкости колесных пар поверхностным плазменным упрочнением их контактной (рабочей) поверхности.

**Обоснованность и достоверность** полученных результатов, выводов и рекомендаций, изложенных в диссертации, подтверждены:

– использованием исходных положений, базирующихся на принципах теоретического и прикладного материаловедения;

– корректной постановкой решаемых задач, достаточным объемом проведенных экспериментов и современных методов испытаний металлических материалов;

– удовлетворительной сходимостью результатов лабораторных и промышленных исследований.

**Связь данной работы с другими научно-исследовательскими работами** Диссертационная работа выполнена по бюджетной программе в рамках грантового финансирования проектов МОН РК по приоритету «Рациональное использование природных ресурсов, переработка сырья и продукции» по теме «Разработка и опытно-промышленное внедрение инновационной технологии плазменного упрочнения вагонных колес» (2015-2017) и по теме «Развитие кластера железнодорожного машиностроения в Казахстан внедрением инновационной технологии упрочнения колесных пар» (2018-2020) (Приложение Б). Этот факт свидетельствует о том, что тема рассматриваемой диссертации соответствует приоритетным направлениям развития науки, реализуемым в Республике Казахстан.

Положения, выносимые на защиту:

- исследование особенностей формирования градиентно-слоистой структуры при поверхностной плазменной закалке и ее влияния на износ и трещиностойкость колеса;
- экспериментальное определение оптимального соотношения твердости колеса и рельса в паре трения «колесо-рельс»;
- исследование влияния режимов дифференциальной обработки элементов колеса (обода, диска и ступицы) на его трещиностойкость и надежность;
- исследование влияния поверхностной плазменной обработки в сочетании с предварительной объемной закалкой колеса на его надежность;
- количественная оценка распределения растягивающих и сжимающих внутренних напряжений в колесе после плазменной обработки.

Публикации и личный вклад диссертанта По теме диссертации опубликовано 15 научных статей, в том числе 2 с ненулевым импакт-факторами в научных изданиях, 3 статьи рекомендованных ККСОН МОН РК, 7 в материалах международных конференций и других публикациях, в том числе 3 в материалах зарубежных конференций.

**Апробация работы** Основные положения и результаты исследований доложены и обсуждены на XV Международной научно-практической конференции, «Strategiczne pytania swiatowej nauki – 2019» (Пшемысль) доклад на тему «Исследование изменения внутренних напряжений в цельнокатаных железнодорожных колесах после поверхностной плазменной закалки» с получением сертификата участника. Используемые в обучении студентов учебно-методические материалы диссертации доложены на методическом семинаре КАТУ им. С. Сейфуллина по внедрению в учебный процесс (Приложение В) инновационных технологий обучения (Астана, 2018).

**Структура и объем диссертации:** диссертационная работа состоит из введения, 5 разделов, заключения, списка использованной литературы. Основной текст работы изложен на 136 страницах машинописного текста, содержит 32 рисунков, 26 таблиц, список использованной литературы состоит из 116 наименований.

# **1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ И МЕХАНИЗМЫ ИЗНАШИВАНИЯ ТРУЩИХСЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

Железнодорожный транспорт, являющийся ведущей отраслью народного хозяйства Республики Казахстан, вносит огромный вклад в достижение экономического роста страны. Отрасль выполняет большой объем транспортных работ и ежегодно, несмотря на объективные трудности, улучшает показатели своей операционной деятельности. По оценкам отраслевых экспертов, доля железнодорожного транспорта в общем грузообороте единой транспортной системы страны составляет ~ 65-70 %, что свидетельствует о важности и актуальности исследований, направленных на совершенствование эксплуатационных характеристик колесно-рельсовой пары трения, поскольку она является одним из основных и наиболее нагруженных элементов ходовой части железнодорожных тяговых поездов.

В связи с этим важно отметить, что взаимодействие колеса и рельса определяет не только важнейшие технико-экономические показатели железнодорожного транспорта, такие как масса поездов и скорость их движения, надежность и эксплуатационные характеристики службы колесных пар, но и основу эксплуатации железных дорог-безопасность движения поездов. Поэтому исследования проблем взаимодействия пары трения «колесо-рельс» востребованы не только в рамках конкретного вагонного депо, но и в целом на железнодорожном транспорте страны [1].

Условия взаимодействия колеса и рельса оказывают существенное влияние на расход топливно-энергетических ресурсов и тягу поездов, которые непосредственно связаны с условиями сцепления и трения в зоне контакта системы «колесо-рельс». В то же время следует отметить, что требования к показателям взаимодействия колес и рельсов в различных зонах контакта противоречивы. С одной стороны, сцепление колес с рельсами должно быть таким, чтобы было мало сопротивления движению поезда. С другой стороны, для достижения требуемого тягового усилия необходимо обеспечить высокий и стабильный уровень тяги колес с одинаковой поверхностью. Учитывая эти противоречивые требования, важнейшими проблемами являются надежность и долговечность колесных пар, которые во многом определяются их поверхностными свойствами [2, 3].

Как показывает практика, разрушение поверхностного слоя материалов, в частности, колесной стали, происходит вследствие ударного и абразивного износа, контактного трения, коррозии и других технологических факторов.

Проблема износа и коррозии приводит к значительному перерасходу металлических материалов. Разработка технологии износостойкости и химической стойкости поверхности материалов, подвергающихся механическим воздействиям и агрессивной среде, позволит более эффективно использовать эти материалы в различных отраслях промышленности. Поэтому исследования специфики процессов износа и разрушения поверхностного слоя,

существенно отличающегося от объемного разрушения следующими признаками, имеют существенное научное и практическое значение. При объемном нагружении процессы пластической деформации по самой своей дислокационной природе локализуются в определенной части объема материала, где происходит накопление структурных дефектов, концентрация напряжений и зарождение очага разрушения. При поверхностном нагружении процессы пластической деформации и разрушения поверхностных слоев при сохранении их дислокационной природы характеризуются, прежде всего, сложным распределением напряжений по всей зоне контакта. По всему поверхностному слою, в любой его точке, одинаково вероятно, что все слои металла в зоне контакта будут участвовать в пластической деформации и разрушении.

Еще одной особенностью процессов износа и разрушения поверхностного слоя является то, что в процессе износа происходит непрерывное перекрытие циклов пластической деформации и разрушения, когда за следующим циклом следует удаление продуктов износа. Такой динамический характер процесса обуславливает и динамический характер структурных изменений в поверхностном слое. Эти резкие изменения тонкой структуры и структуры поверхностного слоя с внешней средой и образование продуктов износа приводят к высокой концентрации напряжений со сложной схемой их взаимодействия в поверхностном слое металла. В результате действия этих факторов тонкая структура и структура поверхностного слоя могут оказаться в процессе износа совершенно иными, чем исходная структура и структура металла в объеме [4].

В данной диссертации ставится задача улучшения поверхностных свойств металлических материалов на основе экономичного и в то же время наиболее эффективного метода – поверхностной плазменной обработки. Применение плазменной закалки позволяет непосредственно обрабатывать рабочую поверхность, улучшать физико-механические свойства и коррозионную стойкость материала. К преимуществам этого способа можно отнести универсальность обработки, дешевизну технологии закалки, а также полное отсутствие вредных выбросов в окружающую среду. При плазменном тушении не используются токсичные вещества, легко воспламеняющиеся и взрывоопасные газы, что обеспечивает экологическую чистоту и безопасность обработки.

Основным действием плазменной обработки на материал является тепловое воздействие. При этом поверхность образцов мгновенно нагревается до высокой температуры, вплоть до температуры плавления и испарения. Продолжительность воздействия обычно составляет десятки микросекунд, что обеспечивает высокую плотность мощности. После окончания импульсного нагрева температура поверхности резко снижается за счет диффузии тепла в глубину образца.

Современные технологии поверхностного упрочнения высококонцентрированным потоком энергии, в частности плазменная закалка,

характеризуются сверхвысокими скоростями нагрева и охлаждения ( $10^3$ – $10^5$ К/с) и кратковременным воздействием на металл ( $10^{-2}$ – $10^{-4}$ с). Поэтому особое значение имеют неравновесные явления, характеризующиеся одновременными процессами диффузии, структурных и фазовых превращений в поверхностном и приповерхностном слое материала

Следует отметить, что широкое применение большинства известных методов упрочняющей термообработки с высококонцентрированным потоком энергии (лазерный, электронно-лучевой, катодно-ионный), сдерживается высокой стоимостью и сложностью оборудования, его недостаточной надежностью и производительностью, необходимостью использования вакуума, специальных помещений с особыми требованиями, необходимостью квалифицированного технического обслуживания, высокими эксплуатационными затратами. Как отмечалось выше, в этих условиях поверхностная плазменная закалка является рациональной с точки зрения универсальности, доступности, экологичности и экономической эффективности с целью продления срока эксплуатации тяжело нагруженных и, следовательно, износостойких деталей [5,6].

В связи с этим следует отметить, что проблема повышения надежности и долговечности эксплуатации «колесо-рельс», предлагаемая в данной работе, является значимой в экономическом, экологическом и ресурсосберегающем аспектах, как в национальном, так и в международном масштабе, поскольку их первичное производство и утилизация сопровождаются потреблением сырьевых и энергетических ресурсов, а также техногенным загрязнением окружающей среды.

Практика вагоно-ремонтных депо показывает, что скорость износа гребней колес и боковой поверхности головки рельса выше, чем рекомендовано нормативно-технической документацией, все еще высоки обточки колес по тонкому гребню и подрезу, а также сменяемость рельсов по боковому износу головки. Увеличился и выпуск колес подвижного состава из-за дефектов на поверхности катания. Так, по данным АО «Казтемиртранс», которое занимается ремонтом вагонных колес, за последние годы в среднем из 53657 колесных пар на тонком гребне (интенсивный износ) было отсоединено для ремонта 24066 или 45% колесных пар, а с учетом тонкого обода (также интенсивный износ) было оцеплено для ремонта 32982 колесные пары, что составляет 62% от их общего количества.

Важным фактором разработки предлагаемой инновационной технологии является: во-первых, рост цен и соответствующих затрат на производство металлопродукции для колес с высоким энергопотреблением, а также рост затрат на запасные части, текущий и капитальный ремонт колесных пар, связанный с заменой запасных частей; во-вторых, рост цен на энергоносители и транспортных расходов на их доставку.

Аналитический обзор предшествующих научных исследований показывает, что проблемы кинетики фазовых и структурных превращений в металлических материалах при нагреве сверхбыстрым концентрированным

потоком энергии (в частности, при плазменном нагреве) явно недостаточно изучены. Поэтому до сих пор остается много неясностей в структурообразовании при сверх скоростном нагреве и охлаждении, не установлена последовательность структурообразования при полной и неполной закалке, их влияние на физико-механические свойства упрочненных слоев. Особенности формирования так называемой градиентно-слоистой структуры, придающей сталям и сплавам новые, ранее неизвестные физико-механические свойства, в том числе высокие эксплуатационные, практически не изучены.

Все это свидетельствует, с одной стороны, о практической и научной значимости решения задач разработки и внедрения принципиально новой технологии усиления наиболее нагруженных элементов ходовой части подвижного состава, с другой стороны, о соответствии задач, поставленных в проекте Стратегии «Казахстан-2050», Государственной программе индустриально-инновационного развития Республики Казахстан.

## **1.1 Механизмы изнашивания трущихся поверхностей**

### **1.1.1 Виды и характеристика изнашиваний**

Анализ причин отказа машин и механизмов показывает, что в ~ 75 случаях из 100 отказ происходит из-за износа трущихся поверхностей. Механизм этого вида износа заключается в удалении материала с изнашиваемой поверхности либо в виде стружки, либо целых микрочастиц материала, находящихся в сильно наклепанном состоянии. Поэтому повышение износостойкости машин является одним из основных резервов повышения их долговечности, которая характеризуется, как известно, сроком службы с учетом физического и морального износа, а также модернизацией [7, 8].

Долговечность материалов, из которых изготавливаются детали и узлы машин в условиях трения, зависит от трех групп факторов:

- 1) внутренние, определяемые физико-механическими, химическими, эксплуатационными свойствами самих материалов;
- 2) внешние, характеризующие вид трения (скольжение, качение) и режим работы рабочих частей, образующих пары трения. Так, скорость относительного движения, нагрузка и ее приложение, температура, которая возникает при работе или торможении;
- 3) рабочая среда и смазка, используемые для уменьшения сил трения.

Сочетание этих факторов вызывает различные виды износа, которые согласно ГОСТ 23.002-78 «Обеспечение износостойкости изделий. Трение, износ и смазка. Термины и определения».

Процессы износа подразделяются на абразивные, адгезионные (молекулярные), усталостные, коррозионные, кавитационные и эрозионные. Эта классификация охватывает практически все виды износа, которые происходят, и закономерности его возникновения. Износ-это сложное явление, которое многообразно и зависит от этих трех групп факторов [9].

Выше перечисленные виды износа показывают, что износ материалов представляет собой сложный физико-химический процесс, зависящий от



одновременного действия многих выше перечисленных факторов. Кроме того, в реальных условиях эксплуатации машин и механизмов, как правило, наблюдается сразу несколько видов износа, закономерности которого разнообразны.

Мы кратко обсудим характеристики этих видов износа. *Абразивный* износ материала происходит в результате режущего или царапающего действия твердых частиц и (или) абразивных частиц. Абразивные частицы попадают в зону контакта из рабочей среды, а также могут появиться в результате окисления, сколов, схватывания и других видов износа. Этот вид износа характерен для рабочих органов землеройных и грунторезных машин, буровой, горной, дорожной техники, работающих в технологических средах, содержащих абразивные частицы (песок, грунт, буровые породы и др.). Механизм этого вида износа заключается в удалении материала с изнашиваемой поверхности либо в виде стружки, либо целых фрагментарных участков материала, находящихся в сильно наклепанном состоянии. Частицы абразивного износа могут быть минерального происхождения (почва, руда, частицы пыли), могут быть окалиной, наклепанными металлическими продуктами износа, твердыми структурными компонентами одного из контактирующих материалов [9, с. 187].

*Молекулярный (адгезионный)* износ можно рассматривать как последовательное образование и разрушение фрикционных связей, возникающих в результате межатомных и межмолекулярных взаимодействий между связями, покрывающими поверхности твердых тел. Этот тип износа возникает, когда по определенным причинам молекулярная связь, образующаяся на границе раздела, сильнее, чем основной материал, и часто встречается, когда в качестве смазочных материалов используются слоистые вещества (гранит, имеющий слоистую гексагональную решетку и дисульфид молибдена –  $\text{MoS}_2$ ).

*Усталостный* износ (контактная усталость) возникает в результате накопления повреждений и разрушения поверхности под воздействием циклических контактных нагрузок, вызывающих появление так называемых «ямок» окраски. Усталостный износ возникает при трении, качении и скольжении, когда контакт деталей сосредоточен. В частности, колеса и рельсы рассматриваемого железнодорожного подвижного состава работают в условиях усталостного износа. На интенсивность усталостного износа существенно влияет напряженное состояние в зонах фактического контакта твердых тел. В зависимости от напряженного состояния в зоне касания усталостный износ различают на упругие и пластические касания.

Усталостный износ может наблюдаться также в тех случаях, когда в точках контакта поверхностей качения возникают высокие контактные напряжения и при достаточно большом количестве повторных циклов нагружения одного и того же объема металла. Появляются поверхностные или подповерхностные усталостные трещины, которые приводят к сколам или отслаиванию поверхности. Так, в точке контакта железнодорожного колеса с

рельсом удельное давление, как отмечалось, может достигать ~500 МПа при соответствующем высоком напряжении сжатия [10].

*Кавитационный* износ возникает в результате поверхностного износа при относительном движении твердых тел в жидкости. Правильнее было бы назвать этот вид износа кавитационно-абразивным, так как он возникает в результате совместного действия абразива в жидкости и кавитационных явлений. В кавитационных условиях работают пропеллеры, гидротурбины, детали машин, подвергнутые принудительному водяному охлаждению, трубопроводы для перекачки жидкости. Следует отметить, что в условиях внешнего трения или смазки (колеса, колесные ленты локомотива и рельсы) этот вид износа маловероятен [9, с. 184].

*Коррозионный* износ возникает при образовании продуктов химического взаимодействия металла с внешней средой. Разрушение происходит в поверхностных слоях в результате электродных (химических) процессов. Этот вид износа широко распространен в деталях, работающих в средах, содержащих агрессивные вещества. Виды этого износа – окислительная и фреттинг-коррозия [9, с. 185].

*Эрозионный* износ возникает в результате воздействия потока жидкости или газа на поверхность детали (гидро-и газэрозионный износ) [9, с. 186]. Износ также может быть электроэрозионным, возникающим в результате воздействия разрядов при прохождении электрического тока.

Следует отметить, что на практике часто встречается несколько видов износа, отмеченных выше. Абразивно-усталостно-адгезионный износ наиболее распространен в подвижных сопряжениях, работающих в условиях граничной смазки и внешнего трения. Другие виды износа являются частным случаем этого сложного вида износа [11].

## 1.2 Закономерности изнашивания сопряженных деталей и изделий

Известно, что причиной изнашивания сопряженных деталей является работасил трения. Сила трения – $F$ :

$$F = fp \quad (1.1)$$

где  $P$  – нормальная сила (нагрузка),  $H$ ;

$f = A(\mu \cdot v/P)$  – коэффициент трения (безразмерная величина);

$A$  – коэффициент;

$\mu$  – динамическая вязкость;

$v$  – относительная скорость.

Под действием сил трения происходит многократное деформирование участков контактной поверхности, их упрочнение и размягчение, тепловыделение, структурные изменения, развитие процессов усталости, окисления и др. Сложность процессов, происходящих в зоне контакта, привела к появлению различных теорий внешнего трения. Молекулярно-механическая (адгезионно-деформационная) теория трения наиболее полно объясняет

силовое взаимодействие твердых тел [9, с. 186;12].

Эта теория исходит из дискретности контакта трущихся поверхностей. Когда твердые тела вступают в контакт с шероховатыми поверхностями, более жесткие микрошероховатости вводятся в менее жесткое контртело. Относительное скольжение микрошероховатостей сопровождается интенсивной деформацией поверхностных слоев. Деформация микрошероховатости самого поверхностного слоя меньше. На величину деформации поверхностных слоев существенно влияет напряженное состояние в зоне контакта, которое зависит от геометрической формы микрошероховатостей, приложенной к ним нормальной нагрузки и механических свойств взаимодействующих тел.

Когда микрошероховатость движется перед ней, из деформированного материала поверхностного слоя возникает волна, некоторые части которой подвергаются сложным растягивающим и сжимающим напряжениям. Из-за микрошероховатости материал находится в растянутом состоянии.

Поверхностные слои материала характеризуются наличием различных типов включений и повышенным содержанием структурных дефектов (вакансий, дислокаций, микротрещин) на единицу объема. Их интенсивная деформация приводит к миграции дислокаций в отдельные области, которые могут служить центрами образования микропор и трещин [9, с. 187].

Полосы течения, возникающие в более деформированных участках поверхности трения, являются зонами повышенной концентрации дислокаций. Дислокации, перемещаясь внутри полос трения, накапливаются на границах зерен, включений, пересечении этих полос и т.д. Взаимодействие дислокаций в очагах кластера приводит к разрыхлению поверхностных слоев и появлению микропор [9, с. 188].

Микропоры, образующиеся в процессе трения в поверхностных слоях, соединяются, что приводит к появлению микротрещин. Распространяясь и взаимодействуя друг с другом, микротрещины вызывают появление трещин, которые, в свою очередь, приводят к износу материала.

Когда трение происходит в смазочных материалах, процесс усталостного разрушения также может быть значительно затронут смазкой. Экспериментальные доказательства усталостной природы износа были получены в многочисленных исследованиях [13].

Используя положение об усталостном характере износа поверхностных слоев, можно рассчитать износостойкость узла трения в зависимости от параметров, характеризующих его работу (шероховатость поверхности, приложенная нагрузка, механические свойства, взаимодействующие материалы, условия работы).

Для характеристики изнашивания поверхностей трения используют интегральные интенсивности изнашивания:

- линейную –  $I_h$ ;
- массовую –  $I_g$ ;
- энергетическую –  $I_w$  [14-16].

Причем:

$$I_g = \rho \cdot I_h \quad (1.2)$$

$$I_w = I_h \cdot A_\alpha / F \quad (1.3)$$

где  $\rho$  – плотность;

$A_\alpha$  – номинальная площадь касания;

$F$  – сила трения.

Под интегральной линейной интенсивностью изнашивания понимают отношение толщины изношенного слоя  $h$  к пути трения  $-L$ , из-за которого произошел этот износ:

$$I_h = h/L = V/(L \cdot A_\alpha) \quad (1.4)$$

где  $V$  – объем материала, удаленный в процессе изнашивания с поверхности трения.

Интегральная массовая интенсивность изнашивания:

$$I_g = \Delta P / (A_\alpha / L) \quad (1.5)$$

где  $\Delta P$  – уменьшение массы детали вследствие изнашивания ее поверхности трения;

$I_w$  – интегральная энергетическая интенсивность изнашивания – отношение объема изношенного материала  $V$  к работе сил трения  $T \cdot L$ , вызвавших это изнашивание:

$$I_w = V / (T \cdot L) \quad (1.6)$$

Эти безразмерные характеристики изнашивания удобны для сравнения износостойкости материалов пар трения.

*Молекулярно-механическая* теория трения, как отмечалось выше, исходит из того, что вследствие шероховатости контакт поверхностей происходит в отдельных точках (пятнах) контакта, образованных от взаимного введения микрошероховатостей или их пластического смятия [9, с. 188, 17, 18].

Взаимодействие поверхностей скольжения в этих точках, согласно этой теории, имеет двойственную природу – деформацию и адгезию. Деформационное взаимодействие обусловлено многократным деформированием микрообъемов поверхностного слоя внедренными неровностями. Сопротивление этой деформации называется деформационной составляющей силы трения ( $F_g$ ). Адгезионное взаимодействие связано с образованием адгезионных сварочных мостиков в местах контакта [9, с. 189]. Сопротивление резанию этих мостиков и образованию новых определяет адгезионную составляющую силы трения ( $F_{ад}$ ).

Таким образом, сила трения, а также еще одна важная характеристика трения, коэффициент трения  $f$ , равный, как отмечалось выше,  $f = F/N$ , определяются как сумма двух составляющих:

$$F = F_D \cdot F_{ад}; \quad f = f_D + f_{ад} \quad (1.7)$$

Деформационная составляющая трения растет пропорционально величине относительного внедрения неровностей  $h/R$  ( $h$ -глубина неровностей,  $R$ - радиус внедрившейся неровности). Величина  $h/R$  и соответственно  $F_D$  и  $f_D$  растут с увеличением шероховатости поверхности прикладываемой нагрузки и снижаются с увеличением твердости и модуля упругости материала. Деформационная составляющая коэффициента трения:

$$f_D = 0,4 \cdot \Delta^{1/3} \cdot \alpha_{эфф} [P_C \cdot (1 - \mu^2)/E]^{1/3} \quad (1.8)$$

где  $\Delta$  – комплексный параметр микронеровностей,  $\Delta = R_{max}/R \cdot v^{1/4}$  где  $R_{max}$  – максимальная высота неровности,  $R$  – радиус закругления микронеровности;

$P_C$  – контурное давление;

$\mu$  – коэффициент Пуассона;

$E$  – модуль упругости материала;

$\alpha_{эфф}$  – коэффициент гистерезисных потерь при скольжении микронеровности зависящей от напряженного состояния в зоне касания.

При определении молекулярной составляющей коэффициента трения из общего коэффициента трения необходимо найти значение последнего, соответствующее некоторому контурному давлению, при котором в зонах фактического касания имеют место пластические деформации. Затем, используя формулу (1.9):

$$f = f + 0,5 \cdot \Delta^{1/2} \quad (1.9)$$

определить молекулярную (адгезионную) составляющую коэффициента внешнего трения (1.10):

$$f_{адг} = f - 0,5 \Delta^{1/2} (P_C/HB)^{1/4} \quad (1.10)$$

где  $HB$  – твердость материала.

Эксперименты показывают, что полученное значение адгезионной (молекулярной) составляющей коэффициента трения для этих материалов в дальнейшем может быть использовано для расчета коэффициентов трения при различных нагрузках, обеспечивающих пластические деформации в зонах контакта микрошероховатостей. Во многих случаях, когда металлы трутся без смазки, можно предположить, что суммарный коэффициент трения, найденный при нагрузках, вычисляется по формуле (1.11):

$$f = f_{ад} + 0,9 \left[ \frac{(1-\mu^2)HB}{E} \right]^2 \quad (1.11)$$

будет равен адгезионной составляющей коэффициента трения, так как деформационная составляющая при этом, как указывалось выше, пренебрежимо мала.

Такой метод определения адгезионной составляющей коэффициента трения используются в работах, применительно к конкретному случаю:

$$f_{адг} = f - \frac{31}{R} \sqrt{\frac{N}{HB}}, \quad (1.12)$$

где  $f$  – найденное из экспериментов значение коэффициента трения;

$N$  – нормальная нагрузка:

$$N = 17 \cdot R^2(1 - \mu^2)^2 HB^2/E^2 \quad (1.13)$$

Адгезионная составляющая трения пропорциональна безразмерному параметру  $\tau_0/HB$ , где  $\tau_0$  – прочность на срез адгезионной связи.

При анализе интенсивности износа различают следующие виды взаимодействия поверхностей трения:

- 1) упругое контактирование;
- 2) пластическое деформирование;
- 3) микрорезание;
- 4) схватывание и разрушение поверхностных пленок;
- 5) схватывание и глубинное вырывание.

Скорость износа минимальна при упругом контакте. При пластической деформации скорость износа увеличивается на несколько порядков. Это связано с тем, что участки поверхности под воздействием пластической деформации интенсивно упрочняются и, после того как запас пластичности исчерпан, становятся хрупкими [9, с. 189]. Микрорезание относится к недопустимым механизмам износа, так как вызывает интенсивное разрушение поверхностного слоя. Микрорезка возможна не только за счет заложенных неровностей, но и за счет инородных твердых частиц. Этот вид разрушения поверхности, как отмечалось выше, называется абразивным износом.

Возможны два вида адгезионного взаимодействия: 1) схватывание и разрушение поверхностных пленок; 2) схватывание металлических поверхностей, сопровождающееся заклиниванием, т.е. глубинным вырыванием.

При первом типе взаимодействия разрез адгезионных связей происходит вдоль оксидных или адсорбированных пленок, которые всегда покрыты трущимися поверхностями. Скорость образования оксидных пленок обычно высока, чему способствуют высокие температуры, развивающиеся на поверхности трения. Разрушение поверхности путем срезания оксидных пленок называется окислительным износом, оно относится к коррозионно-механическому способу воздействия на износ. Это наиболее благоприятный вид износа, при котором процессы разрушения локализуются в тончайших

поверхностных слоях [9, с. 189]. Схватывание металлических поверхностей происходит между поверхностями трения, свободными от пленок, например, при разрушении пленок пластической деформации в местах контакта. В зависимости от условий трения, при которых пластическая деформация разрушает оксидные пленки, различают два типа схватывания: холодное и термическое. Холодное схватывание развивается при низких скоростях скольжения и высоких давлениях, в условиях незначительного фрикционно

Термическое схватывание развивается при высоких скоростях скольжения и давлениях, которые вызывают интенсивный нагрев и размягчение поверхностных слоев. Механизм изнашивания при схватывании заключается в том, что между очищаемыми участками образуются адгезионные связи, которые сильнее прочности одного из материалов пары трения. Разрез происходит в менее прочном материале на глубине от точки схватывания. На одной поверхности трения образуются углубления, на другой – оторванные частицы, которые вновь захватывают и бороздят трущиеся поверхности, вызывая их интенсивное разрушение, а иногда и за счет большого тепловыделения и сварки. Сварка является наиболее опасным видом износа, который является основной причиной выхода из строя многих узлов трения [19, 20].

### **1.3 Способы повышения износостойкости материалов**

Молекулярно-механическая теория трения определяет два основных метода повышения износостойкости материала:

- увеличение твердости трущейся поверхности;
- снижение прочности адгезионной связи.

Повышение твердости трущейся поверхности направлено на то, чтобы затруднить пластическую деформацию и исключить микрорезание поверхностей трения, обеспечить по возможности, как отмечалось выше, упругое деформирование участков контакта.

Снижение прочности адгезионной связи необходимо для предупреждения схватывания металлических поверхностей. Наиболее эффективно эта цель достигается разделением поверхностей трения жидким и твердым смазочным материалом. При использовании жидкой смазки, когда поверхности разделены несущим гидродинамическим слоем, коэффициент трения минимален (0,005-0,01), а износ практически отсутствует. Этот метод используется, в основном, в сопряжениях различных деталей и пар машин (механизмов). Твердая смазка обеспечивает более высокий коэффициент трения (0,02-0,15). Она используется для узлов трения, работающих при повышенных и высоких температурах, других экстремальных условиях. Из твердых смазочных материалов наиболее широко, как отмечалось выше, применяют графит и дисульфид молибдена ( $\text{MoS}_2$ ), имеющих слоистое строение [21, 22].

Следует отметить, что использование смазочных материалов, однако, не гарантирует от схватывания. Твердые смазочные материалы постепенно изнашиваются. Условия жидкостной смазки нарушаются из-за

неблагоприятных режимов работы механизмов. Большие контактные напряжения и нагрев способны разрушать тонкую масляную пленку и вызывать схватывание.

В этих условиях крайне важно обеспечить совместимость трущихся пар. Под совместимостью понимается свойство материалов предотвращать схватывание при работе без смазки или в условиях нарушения сплошности масляного слоя.

Сопротивление схватыванию закаленных сталей значительно выше, чем у нормализованных и отожженных сталей. Именно по этой причине закаленные стали являются основным материалом для одной из сопряженных пар трения [9, с. 185].

Производительность многих узлов трения зависит от скорости развития поверхностного усталостного скола [9, с. 187].

Скол поверхности характерен для материалов, используемых в узлах трения качения, подверженных высоким циклическим контактными нагрузкам [9, с. 186].

Эти нагрузки, действующие на небольшие участки поверхности, вызывают процессы образования усталостных трещин в приповерхностном слое, их развитие вглубь слоя и отделение частиц с образованием перекрашивающих ям [9, с. 188].

Сопротивление материала сколу поверхности, называемое контактной выносливостью, характеризуется пределом контактной выносливости  $\sigma_R$ , который, как и при объемной усталости, определяется экспериментально по кривой усталости [9, с. 189].

Увеличение контактной выносливости, как и при объемной усталости, основано на увеличении сопротивления поверхностного слоя развитию пластической деформации [23].

Деформация поверхностных слоев вызывает накопление в них дефектов в виде повышенной концентрации вакансий, дислокаций, разрыхлений, микротрещин, что приводит к разрушению этих слоев вследствие контактно-фрикционной усталости.

Из теории усталостного износа следует, что интенсивность развития поверхностных трещин при трении сильно зависит от растягивающих напряжений, возникающих в них. Особенно интенсивный износ происходит при напряжениях, близких или приближающихся к пределу текучести материала поверхностных слоев. Отсюда следует, что разрушение поверхностных слоев более мягкой трущейся пары будет происходить во много раз интенсивнее, чем более твердых и жестких [9, с. 189].

Процесс усталости настолько сложен и разнообразен, что довольно сложно сформулировать конкретные принципы разрушения конструкции или выбора состава стали для обеспечения наибольшей усталостной стойкости [9, с. 186]. Принимая во внимание тот факт, что предел выносливости связан с характеристиками прочности и пластичности при статическом растяжении определенными соотношениями, можно сделать вывод о благоприятном



влиянии таких структурных изменений, которые вызывают одновременное повышение прочности и пластичности материала. Эти изменения могут быть созданы известными методами термической и термомеханической обработки, приводящими к измельчению зерна или образованию развитой субструктуры [9, с. 187]. Такие структурные изменения способствуют гомогенизации скользяния и уменьшению локальных перенапряжений, связанных с мощными дислокационными кластерами [24-26].

Для конструкционных сталей предложены следующие зависимости, позволяющие по известным механическим свойствам:  $\sigma_T, \sigma_B, \psi$  определить предел выносливости:

$$\sigma_{-1} = 0,35 \sigma_T + 12,2 \text{ Па} \quad (1.14)$$

$$\sigma_{-1} = 0,45 \sigma_B + 12,2 \text{ Па}$$

$$\sigma_{-1} = 0,25 \sigma_T (1 + 1,35 \psi) \text{ Па}$$

где  $\sigma_T$  – предел текучести;

$\sigma_B$  – временное сопротивление (предел прочности);

$\psi$  – относительное сужение.

Наиболее управляемыми способами повышения износостойкости, наряду с введением в зону контакта третьего тела с заданными характеристиками, являются традиционные технологии термического упрочнения и инновационные технологии плазменного, магнитно-плазменного и лазерного упрочнения.

Как следует из предыдущего анализа, износостойкость сталей основана на прочности поверхностного слоя металла. Определяющим фактором в этом случае является локальная прочностная характеристика-твердость стали. Поэтому все методы снижения износа, так или иначе, направлены на повышение твердости поверхностного слоя изделия.

Кроме того, в соответствии с центральным принципом прикладного материаловедения, согласно которому все свойства материалов определяются их структурой, установлено, что при одинаковой поверхностной твердости стали со структурой мартенсит + карбиды обладают большей износостойкостью, чем стали с такой же твердостью, но без избытка карбидов. При той же твердости сталь с крупнозернистой структурой обладает меньшей износостойкостью, чем сталь с мелкозернистой структурой, так как сопротивление хрупкому разрушению меньше у первых (крупнозернистых сталей). В этой связи отметим, что как традиционные, так и инновационные технологии повышения износостойкости ориентируются на указанный центральный принцип материаловедения [27-29].

#### **1.4 Традиционные технологии повышения износостойкости колес**

Традиционными методами повышения износостойкости цельнокатаных колес являются различные виды упрочняющей термической обработки. Существующие в настоящее время методы упрочняющей термической

обработки цельнокатаных колес можно разделить на три принципиально различных технологических процесса: нормализацию, упрочнение поверхности обода с последующим отпусканием и объемное упрочнение с упрочнением всех элементов колеса с последующим отпусканием [30, 31].

Процесс нормализации колес, заключающийся в охлаждении их от температуры выше  $A_{с3}$  на спокойном воздухе, обеспечивает перлитную структуру с пластинчатой структурой карбидной фазы во всех элементах колеса. В этом случае в диске колеса образуется больше дисперсных карбидов. В ободе, который имеет большее поперечное сечение и, следовательно, меньшую скорость охлаждения, чем в диске, образуются более грубые структуры.

При нормализации цельнокатаных колес из углеродистой стали (0,5-0,7%С) вокруг зерен перлита образуется ферритная сетка, которая оказывает вредное влияние на величину ударной вязкости, усталостной прочности и износостойкости. Твердость таких колес после нормализации находится на уровне 200-220 НВ. Процесс нормализации цельнокатаных колес практически не приводит к образованию температурного градиента в ободе, а потому происходит равномерное охлаждение всех элементов колеса, благодаря чему в них не образуются значительные остаточные напряжения. Однако в связи с тем, что нормализация не обеспечивает высоких прочностных свойств, этот процесс не получил широкого применения.

Наиболее распространенным видом термического упрочнения цельнокатаных колес является упрочнение поверхности катания обода колеса путем распыления на него воды из форсунок (распылителей) кольцеобразного охлаждающего устройства. Обычно это делается на специальном горизонтальном столе (колесо вращается в горизонтальном положении).

В процессе закалки колес, вращающихся в горизонтальном положении, вода подается на весь коньковый круг из сопел кольцевого охладителя. За этим следует выпуск всего колеса в шахтных печах. Этот процесс обеспечивает повышение прочности при качении обода колеса, но имеет ряд существенных недостатков:

1) упрочнение обода колеса происходит путем отвода тепла через поверхность катания (упрочненный слой составляет 30-35 мм);

2) возникающий при таком упрочнении большой температурный градиент в ободе приводит к возникновению значительной величины остаточных напряжений, обуславливающих низкую конструктивную прочность колес при ударном нагружении, а также к существенному короблению колес (0,6-1,2 мм);

3) наличие в цельнокатаном колесе больших остаточных напряжений (особенно растягивающих) снижает их надежность вследствие понижения сопротивления возникновению и распространению трещин на поверхности катания обода от тепла трения тормозных колодок;

4) процесс упрочнения колес на горизонтальных столах приводит к образованию у поверхности катания обода (на глубине до 10 мм) продуктов

отпуска мартенсита с карбидами зернистого типа, имеющих более низкую износостойкость и контактную прочность, чем продукты распада аустенита с пластинчатым строением карбидной фазы;

5) при данном процессе упрочнения практически исключена возможность регулировать скорость охлаждения различных слоев обода (особенно внутренних), что затрудняет получение заданного комплекса свойств колес различного химического состава.

Процесс вертикального упрочнения обода колеса имеет ряд преимуществ перед упрочнением на горизонтальных столах: благодаря трехстороннему отводу тепла от обода обеспечивается его практически непрерывное упрочнение и значительное упрочнение боковых граней; снижается уровень остаточных напряжений во всех элементах колеса за счет уменьшения градиента температуры в ободе, а также уменьшается величина его коробления; при этом упрочнении во всех слоях обода образуются пластинчатые продукты распада аустенита, обеспечивающие более высокую износостойкость и контактную усталостную прочность.

Параметры закалки колес из углеродистых марок стали следующие: температура закалки 480-520°C; продолжительность закалки – 2 часа; охлаждение после закалки-на воздухе. Следует отметить, что в производстве железнодорожных колес широко применяется закалка обода при вращении колеса, как в горизонтальном, так и в вертикальном положении.

Объемное упрочнение цельнокатаных колес осуществляют путем погружения нагретого до температуры закалки колеса в масляный бак. Упрочнение всех элементов колеса при объемном упрочнении значительно повышает весь комплекс свойств обода, диска и ступицы. Однако объемное упрочнение цельнокатаных колес погружением в масло имеет ряд недостатков.

Из-за разницы в поперечных сечениях и в отношении размера поверхности к объему металла в ободе, диске и ступице при закалке в масле эти колесные элементы охлаждаются с разной скоростью: при максимальной скорости охлаждается диск, а при значительно меньшей скорости охлаждаются обод и ступица. В зависимости от этого прочность диска выше. В то же время условия эксплуатации цельнокатаных колес определяют необходимость упрочнения металла обода до более высоких значений для повышения износостойкости и усталостной стойкости. Степень упрочнения диска должна обеспечивать высокую вязкость, пластичность, эластичность и усталостную прочность.

При упрочнении колес средние скорости охлаждения их различных элементов не должны слишком сильно отличаться, чтобы избежать возникновения больших значений остаточных напряжений. Для снижения величины остаточных напряжений в закаленных цельнокатаных колесах применяют отпуск. Уровень остаточных напряжений определяется температурой отпуска [32-34].

## 1.5 Инновационные технологии повышения износостойкости колес

Для обоснования выбора плазменного упрочнения поверхностного слоя рассмотрим краткий сравнительный анализ возможностей таких инновационных методов снижения износа, как термообработка с индукционным нагревом, поверхностная закалка с помощью электронного пучка, термообработка с использованием лазеров и плазменная обработка.

### *Термическая обработка с индукционного нагрева*

Термическая обработка цельнокатаных колес с индукционным нагревом была предложена исходя из следующих соображений.

Износ обода колеса в процессе эксплуатации допускается на 56 мм, после чего колесо выводится из эксплуатации. Повышенная твердость необходима только в той части обода колеса, которая подвержена износу, поэтому нагрев колеса на эту глубину может осуществляться индукцией при использовании токов промышленной частоты (50 Гц). При этом нагревается только 30-35% металла от общего веса колеса, в то время как при печном нагреве – все колесо, весящее около полутонны. Таким образом, расход тепла на нагрев для термообработки (закалки) снижается в три раза

Индукционный нагрев колеса длится 6-8 минут. За это время колесо не успевает образовать окалину, обезуглероживания не происходит, а рост зерен аустенита не происходит. Температуру во время индукционного нагрева можно регулировать с большой точностью. Все это способствует повышению твердости и износостойкости закаленного слоя, исключает потери металла в виде окалины, позволяет сохранить точные размеры круга после механической обработки.

Выбор оптимальной толщины армированного слоя определяется условиями работы детали. При работе изделия только на износ или в усталостных условиях толщина упрочненного (закаленного) слоя принимается равной 1,5-3,0 мм; в условиях высоких контактных нагрузок и возможного повторного шлифования 4-5 мм.

Закалочное охлаждение колеса после кратковременного индукционного нагрева должно быть интенсивным, для чего используется душевое устройство (распылитель). В качестве охлаждающей среды используется промышленная вода, как наиболее технологически удобное и дешевое средство. Интенсивность такого охлаждения определяется расходом воды, частотой и размерами отверстий в распылителе, длиной струи и углом их падения на охлаждаемую поверхность. Регулируя эти параметры, можно изменить коэффициент теплопередачи от  $0,9 \cdot 10^4$  до  $20 \cdot 10^4 \text{Вт}/(\text{м}^2\text{К})$ .

После закалки с индукционным нагревом колеса подвергают отпуску при температуре  $500^\circ\text{C}$ , часто самозапуску. В этом случае охлаждение после закалки осуществляется не полностью, тогда в колесе остается определенное количество тепла, нагревающего закаленный слой до температуры закалки. Анализ распределения механических свойств по сечению обода колес, прошедших термообработку прокаткой, печным и индукционным нагревом, показывает, что значения предельной прочности и предела

пропорциональности у колес, закаленных индукционным нагревом, выше, чем у колес, закаленных прокаткой и печным нагревом на глубину 35-40 мм. На большей глубине эти значения примерно одинаковы [35-37].

#### *Поверхностная закалка посредством электронного луча*

Основой поверхностной закалки с помощью электронного пучка является преобразование кинетической энергии электронного потока в тепловую энергию при взаимодействии с поверхностью нагретого изделия.

Обработка проводится в вакууме пучками с энергией электронов 20-400 Кэв, генерируемыми электронными пушками.

Преимущества: электронная пушка является распространенным и не очень дорогим источником энергии. Генерируемые лучи имеют высокий коэффициент поглощения материала около 90%. Пушки имеют практически неограниченную мощность – до 1 МВт и высокий результирующий КПД (рассчитанный от электросети до ввода энергии в обрабатываемый материал). Лучи эффективно и легко управляются электромагнитными линзами и отклоняющими системами. Камеры, в которых осуществляется обработка, и сами пушки в большинстве случаев не требуют толстостенной радиационной защиты.

Основным недостатком закалки с помощью электронного пучка является необходимость вакуумирования (до  $10^{-2}$ - $10^{-3}$  Па) рабочей камеры электронно-лучевых установок с обрабатываемыми продуктами. Обработка крупногабаритных изделий сложна. Малая глубина проникновения в обрабатываемый материал является недостатком при поверхностном упрочнении сталей на глубину около 1 мм. Электронно-лучевые установки дешевле лазерных. Электронно-лучевой нагрев наиболее эффективен, если луч направлен нормально к закаленной поверхности, если необходимо обработать внутренние поверхности, то луч может отклоняться магнитным полем и направляться на поверхность изделия под острым углом (до  $25$ - $30^\circ$ ). Концентрацию мощности при электронно-лучевом нагреве можно регулировать в широком диапазоне (от  $10^2$  до  $10^9$  Вт/м<sup>2</sup>). Достижимая производительность закалки составляет 3 см<sup>2</sup>/спри глубине обработки 1,0-1,5 мм. Этот метод применяется для обработки кулачков, толкателей, роторов, коленчатых валов, крепежных деталей, рабочих поверхностей подшипников ит.п.[10,с.234;38, 39].

#### *Термическая обработка с использованием лазеров*

Лазеры обладают широким спектром возможностей, к которым относятся: высокая концентрация энергии в пучке, достигающая  $10^9$  Вт/см<sup>2</sup>, что позволяет плавить и испарять самые тугоплавкие вещества; практически безинерционное управление лазерным лучом, что позволяет повысить скорость и точность обработки материалов и полностью автоматизировать процесс.

Лазеры обладают высокой точностью фокусировки луча, что минимизирует зону нагрева и исключает температурные деформации; способностью обрабатывать в труднодоступных местах со сложными и прецизионными формами швов и разрезов; способностью передавать лазерный луч без потерь на значительные расстояния с использованием оптической

системы распределения по рабочим зонам; способностью обрабатывать любые материалы, в том числе и те, которые не поддаются традиционным методам обработки.

Скорость нагрева при лазерной обработке достигает 1000С/с. Глубина теплового воздействия обычно не превышает 0,7-0,8 мм. Диаметр пятна от лазерного луча на обрабатываемой поверхности находится в пределах 1,5-5,0 мм. Благодаря локальному нагреву очень короткой продолжительности, окружающие участки металла остаются холодными и после окончания пучка обеспечивают интенсивный теплоотвод. Скорость охлаждения за счет отвода тепла к холодному металлу достигает 6000-7000°С/с и нет необходимости в дополнительном охлаждении. Причем следует отметить, что закалка с охлаждением в металлическое тело возможна только в том случае, если толщина обрабатываемого изделия значительно (не менее чем в 4 раза) превышает глубину закаленного слоя.

Очень высокие скорости нагрева и охлаждения, недостижимые при традиционных методах термообработки, обуславливают ряд конструктивных особенностей и, соответственно, свойств стали после лазерной обработки. Обычно для всех сталей твердость обработанной лазером поверхности выше, чем после закалки традиционными методами.

В то же время лазерные системы имеют ряд недостатков, главным из которых является их низкая эффективность, связанная со значительными потерями энергии излучения при отражении от обрабатываемого объекта – металлы с гладкой поверхностью поглощают лишь 3-7% лазерного излучения. Для повышения абсорбционной способности необходимо применять специальные покрытия, в которых используются оксиды металлов, фосфаты, суспензии мелкозернистых металлов с углеродным порошком, вакуумные металлические пленки и др.

Другим недостатком является неравномерное поглощение энергии поверхностью, что связано с необходимостью использования поглощающих покрытий, а также с тем, что излучение непосредственно поглощается очень тонким поверхностным слоем, а затем передается за счет теплопроводности, что значительно ограничивает глубину модифицированного слоя.

Достижимая производительность закалки составляет 1 см<sup>2</sup>/с на 1 кВт мощности излучения при глубине обработки 50 мкм. Максимальная мощность технологических лазеров, используемых для тушения, составляет 10 кВт, но стоимость мощных установок высока. Этот метод используется для обработки изделий различной формы. Ограничения формы обрабатываемых поверхностей определяются только тем, что выходной оптический тракт лазера имеет значительные размеры, а падение луча на поверхность должно быть перпендикулярным, т.е. обрабатываться могут только относительно открытые поверхности [40-43].

#### *Плазменная закалка поверхности деталей и изделий*

Следует отметить, что широкое внедрение этих методов упрочняющей термообработки с высококонцентрированным потоком энергии, а именно

лазерного, электронного пучка, сдерживается высокой стоимостью и сложностью технологического оборудования, его недостаточной надежностью и производительностью, необходимостью использования вакуума, специальных помещений с особыми требованиями, необходимостью квалифицированного технического обслуживания, высокими эксплуатационными затратами.

В отличие от термической обработки с использованием лазеров и электронного пучка, технология поверхностного плазменного упрочнения металлов, лишенная вышеперечисленных недостатков, успешно развивается в последние годы и все чаще применяется в различных отраслях промышленности. Практика показывает, что для продления срока эксплуатации тяжелонагруженных и, следовательно, износостойких деталей поверхностная плазменная закалка рациональна с точки зрения универсальности, доступности, экологичности и экономической эффективности. Без изменения параметров шероховатости поверхности такая упрочняющая термообработка легко интегрируется в технологический процесс восстановления деталей, являясь чистовой операцией, является малозатратной, достаточно производительной и позволяет эффективно повысить их эксплуатационную долговечность. Важно также, чтобы упрочнялся только поверхностный слой, а сердцевина оставалась вязкой, что обеспечивает повышенную устойчивость как к износу, так и к контактной усталости. Благодаря сильному измельчению зернистой структуры и соответствующему повышению прочностных характеристик материала открывается перспектива замены дорогих легированных сталей и сплавов д.

Сущность процесса плазменной закалки заключается в высокоскоростном нагреве поверхностного слоя металла движущейся плазменной струей и его быстром охлаждении в результате теплопередачи в глубокие слои материала. Закаленная поверхность движется в направлении струи. Охлаждение происходит в основном за счет отвода тепла вглубь металла и, в меньшей степени, конвективного теплообмена с воздухом.

Длительный нагрев поверхностного слоя обеспечивает лучшее использование мощности высокотемпературной струи, увеличение скорости закалки и образование «мягкой» зоны отпуска с высокодисперсной троостит-сорбитовой структурой между закаленным слоем и сердцевиной. Это обстоятельство является важной причиной повышения трещиностойкости поверхностно-упрочненных изделий. В мягкой зоне трещины, возникающие в хрупком затвердевшем слое, ингибируются. Длительный нагрев приводит к плавному изменению структуры и микротвердости по глубине.

Таким образом, из сравнения различных источников высококонцентрированной энергии, используемых для поверхностного упрочнения, видно, что плазменное упрочнение является единственным инновационным методом, который может быть одним из наиболее эффективных и действенных способов повышения эффективности работы нагруженных элементов железнодорожных колес и снижения их материалоемкости. Во многих случаях локальная термообработка технически и экономически оправдана, когда упрочняется только наиболее нагруженная

рабочая поверхность прокатного колеса из стали, оставляя сердечник нетронутым [44-48].

#### *Физические основы плазменных процессов и их особенности*

При нанесении плазменной струи на поверхность обрабатываемого изделия происходят различные физические процессы, влияющие на структуру и свойства материала, поэтому представляется целесообразным кратко остановиться на физических основах плазменной обработки и их особенностях, которые необходимо учитывать при изучении процессов поверхностного плазменного упрочнения.

Плазма-четвертое (после твердого, жидкого и газообразного) агрегатное состояние вещества, это частично или полностью ионизированный газ, образованный из нейтральных частиц, положительных и отрицательных зарядов.

Важнейшей особенностью плазмы является ее квазинейтральность, то есть объемные плотности положительно и отрицательно заряженных частиц, из которых она образуется, практически одинаковы. Следовательно, полный электрический заряд плазмы равен нулю. Наличие свободных электрических зарядов делает плазму проводящей средой, что вызывает ее взаимодействие между магнитным и электрическим полями.

Для того чтобы газ перешел в плазменное состояние, он должен быть ионизирован. В этом случае за счет энергетического взаимодействия электрического разряда от атома газа отделяется один или несколько электронов. Когда электрон отделяется, возникают две заряженные частицы: отделенный электрон и остаточный ион. При разделении одного электрона происходит единичная ионизация, а при разделении нескольких электронов — многократная.

Степень ионизации газа пропорциональна числу атомов, отдавших или поглотивших электроны, и зависит в первую очередь от температуры. Даже слабо ионизированный газ, в котором около 1% частиц находится в ионизированном состоянии, может проявлять некоторые типичные свойства плазмы, такие как высокая электропроводность и взаимодействие с внешним электромагнитным полем.

В ионизированном газе наряду с процессами ионизации непрерывно происходит процесс нейтрализации заряженных частиц, называемый рекомбинацией. Это явление для аргона можно описать выражением:



где Ar — атом аргона;

e — электрон;

$\varphi_i$  — потенциал ионизации;

$\text{Ar}^+$  — положительный ион аргона [49].

Различают низкотемпературную плазму (температура не превышает сотни тысяч К) и высокотемпературную (с температурой выше миллиона К),



что определяется степенью ионизации атомов вещества. Низкотемпературной принято считать плазму температурой  $10^3 - 10^5$ °С и степенью ионизации  $10^{-6} - 10^1$ .

При дуговой ионизации газ пропускается через канал и создается дуговой разряд, тепловой эффект которого ионизирует газ, а электрическое поле создает направленную плазменную струю. Это тепловая ионизационная характеристика дуговых разрядов.

Газ также может ионизироваться под действием высокочастотного электрического поля. Процесс плазменного упрочнения может осуществляться сжатой дугой, столб которой сжимается с помощью сопла плазменной горелки, газового потока или внешнего электромагнитного поля.

Дуга сжимается за счет помещения ее в плазмотрон, стенки которого интенсивно охлаждаются водой. В результате сжатия поперечное сечение дуги уменьшается, а мощность ее количество энергии на единицу площади – увеличивается.

Плазмотроны используют прямое горение дуги между электродом ( - ) и продуктом ( + ) или не прямое замыкание дуги внутри плазмотрона.

Поток плазмообразующего газа, проходящий через узкое сопло, обеспечивает: увеличение эффективной конвективной теплоотдачи от столба дуги к изделию; нагрев и ускорение частиц, вводимых в плазму.

Возможность снижения рабочих токов (при плазменной обработке) без снижения эффективной мощности за счет искусственного увеличения длины дуги и ее напряжения может дать следующие преимущества: повысить стабильность и эффективность теплового и энергетического воздействия плазмы на обрабатываемые продукты; повысить гибкость регулирования режимов, в частности, за счет снижения расхода газа и скорости плазменной струи без снижения тепловой мощности; повысить надежность и КПД работы оборудования при сниженных рабочих токах.

Плазмообразующий газ подбирается с учетом следующих факторов: стоимости, условий химического взаимодействия с обрабатываемым материалом; рабочего напряжения дуги; а также с учетом энергетических характеристик плазмы: теплосодержания и температуры. В качестве плазмообразующего газа выбраны следующие газы: аргон, гелий, азот и водород. Сравнительные характеристики этих газов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнительные характеристики плазмообразующих газов

Параметр	Плазмообразующий газ			
	аргон	Гелий	Азот	Водород
Температура и плазмы, $10^3$ К	14	20	7	5
Теплосодержание плазмы, $10^6$ Дж/м <sup>3</sup>	30	50	45	30
Напряжение дуги, В	30	60	70	110

Для плазменной закалки углеродистых сталей используется аргон, гораздо реже гелий из-за его высокой стоимости. Восстановительная среда может быть создана путем добавления водорода. Дешевый воздух или кислород можно использовать для резки углеродистых сталей.

Использование молекулярных газов (азота, водорода) обеспечивает значительное повышение эффективности теплопередачи от плазмы к обрабатываемому материалу, а за счет высокой напряженности электрического поля в дуге при постоянном токе можно получить большую мощность плазмотрона. Гелиевая или азотная плазма, обладающая наибольшей теплопроводностью, приводит к перегреву плазмотрона, что приводит к снижению эффективности его работы, поэтому эти газы используют в смеси с аргоном.

Плазменные процессы характеризуются большим количеством параметров, которые прямо или косвенно влияют на ход технологического процесса. Это приводит к гибкости процессов, но в то же время создает определенные трудности в выборе оптимальных режимов.

К основным параметрам плазменной обработки относятся такие параметры, как тип газа, диаметр плазмообразующего сопла, скорость движения плазмотрона, расход плазмообразующего газа, расстояние от сопла до изделия.

Для выбора оптимального режима необходимо также учитывать дополнительные параметры, которые, так или иначе, влияют на характеристики процесса. К ним относятся расход защитного газа, геометрические размеры и расположение рабочих частей плазмотрона, состояние обрабатываемого продукта (температура, положение в пространстве, способ фиксации) и оборудования, степень автоматизации процесса.

При плазменной закалке эффективная мощность  $Q_3$  и эффективный радиус  $R_q$  сжатой дуги в аргоне определяется по формуле (1.16) [50]:

$$\begin{aligned} Q_3 &= (0,5 \dots 0,55) I_d U_d & (1.16) \\ R_q &= 1,4d_c, \end{aligned}$$

где  $I_d$  и  $U_d$  – ток и напряжение сжатой дуги;

$d_c$  – диаметр плазмообразующего сопла для диапазона  $d_c = 2 \dots 6$  мм.

Напряжение  $U_d$  для плазменной закалки, проводимой на прямой полярности, рассчитывается по формуле (1.17):

$$U_d = C + 0,03I \quad (1.17)$$

где  $I$  – ток сжатой дуги, А;

$C = 22$  В для прямой полярности.

Влияние основных параметров режима плазменной закалки на эффективную мощность сжатой дуги можно представить в виде:

$$\Delta Q_3 / Q_3 = + 1,15 \Delta I / I - \Delta d_c / d_c + 0,21 \Delta G_{n.э} / G_{n.э} + 0,13 \Delta l_{cu} / l_{cu} \quad (1.18)$$

Как видно из этого уравнения регрессии, параметры режима плазменной закалки по мере ослабления их влияния а эффективную мощность

располагаются в следующем порядке: ток сжатой дуги –  $I$ , диаметр плазмообразующего сопла –  $d_c$ , расход плазмообразующего газа –  $G$  и расстояние между соплом и изделием –  $l_{cu}$

Влияние параметров режима плазменной закалки на размеры зоны закалки показывает следующее.

Связь глубины закалки с параметрами режима при  $d_c=3,8$  мм  $u_s=20$  мм можно представить как:

$$\Delta h/h = +3,58\Delta I/I + 0,65\Delta G_{n.z.}/G_{n.z.} + 0,40\Delta l_{cu}/l_{cu} - 0,16\Delta V/V \quad (1.19)$$

Связь ширины закалки с параметрами режима при  $d_c=3,8$  мм  $u_s=20$  мм представляется в виде:

$$\Delta b/b = +1,83\Delta I/I + 0,34\Delta G_{n.z.}/G_{n.z.} + 0,21\Delta l_{cu}/l_{cu} - 0,07\Delta V/V \quad (1.20)$$

Из этих уравнений регрессии следует, что рейтинг влияния параметров режима на глубину и ширину зоны закалки совпадает и располагается в следующем порядке: ток сжатой дуги, расход плазмообразующего газа, расстояние между соплом и изделием, скорость движения при постоянном диаметра сопла.

Влияние тока сжатой дуги на размеры зоны плазменной закалки почти на порядок сильнее влияния других параметров режима плазменной закалки, следовательно, ток может служить основным регулируемым параметром процесса плазменной закалки. Из этих уравнений регрессии следует, что глубина зоны закалки является более чувствительной характеристикой по сравнению с шириной этой зоны.

Глубина и ширина зоны закалки должны определяться с учетом двух факторов:

- температура нагрева в каждой точке зоны закалки должна быть равной или больше критической для данного материала  $T \geq T_{зак.}$  (для колесной стали  $2T_{зак.} = 850^\circ\text{C}$ );

- скорость охлаждения в каждой точке должна быть не меньше критической скорости охлаждения для данной стали.

К основным параметрам режима плазменной обработки относятся такие параметры, как расход газа, диаметр плазмообразующего сопла, скорость перемещения плазмотрона, расход плазмообразующего газа, расстояние от сопла до изделия [50, с. 220].

С целью предупреждения роста аустенитного зерна, окисления или подплавления закаливаемой поверхности необходимо при выборе режима закалки ограничивать максимальную температуру поверхности металла (для сталей не более  $1100...1200^\circ\text{C}$ ).

В порядке значимости, параметры, по которым необходимо осуществлять выбор оптимальных режимов плазменной закалки, выглядит следующим образом:

- глубина зоны закалки;
- ширина зоны закалки;
- скорость движения, определяющая производительность процесса;
- погонная энергия, в значительной степени определяющая термические деформации изделия;
- скорость охлаждения в зоне закалки, влияющая на структуру закаленной зоны.

### **Выводы по первому разделу**

В результате проведенного научно-патентного поиска были выявлены современное состояние научно-технической проблемы по прогнозированию дальнейших направлений научных разработок для улучшения качества и эксплуатационного ресурса колесных пар тягового подвижного состава поверхностной плазменной обработкой.

1. Износ материалов является сложным физико-химическим процессом, зависящим от одновременного действия многих внутренних и внешних факторов. В реальных условиях эксплуатации работы машин и механизмов, как правило, действуют сразу несколько видов изнашивания, закономерности, протекания которых разнообразны.

2. Основными методами повышения износостойкости материала являются увеличение твердости трущейся поверхности и снижение прочности адгезионной связи.

Увеличение твердости трущейся поверхности направлено на то, чтобы затруднить пластическую деформацию и исключить микрорезание поверхностей трения, обеспечить по возможности упругое деформирование участков контакта. Определяющим фактором при этом является локальная характеристика прочности – твердость стали.

Снижение прочности адгезионной связи необходимо для предупреждения схватывания металлических поверхностей. Наиболее эффективно эта цель достигается разделением поверхностей трения жидкими твердым смазочным материалом.

3. Наряду с традиционными методами повышения износостойкости (нормализации, поверхностной и объемной закалки) в последние годы успешно развиваются и находят применение в различных отраслях промышленности инновационные методы снижения интенсивности изнашивания высококонцентрированным потоком энергии: лазерная, электронно-лучевая и катодно-ионная обработка, плазменная закалка.

4. Широкое внедрение лазерной, электронно-лучевой, катодно-ионной обработки сдерживается высокой стоимостью и сложностью технологического оборудования, недостаточными его надежностью и производительностью, необходимостью использования вакуума и специальных помещений с особыми требованиями, высокими эксплуатационными расходами.

5. Поверхностная плазменная закалка пока единственный инновационный метод, который в настоящее время является одним из наиболее эффективных и

действенных способов увеличения ресурса работы тяжело-нагруженных элементов железнодорожных колес и снижения их материалоемкости. Именно поверхностная плазменная закалка для таких деталей и изделий является рациональным по параметрам универсальности, доступности, экологичности и экономической эффективности. Не изменяя параметров шероховатости поверхности, такая упрочняющая термообработка легко встраивается в технологический процесс повышения износостойкости, является финишной операцией, малозатратна, достаточно производительна и позволяет эффективно увеличить эксплуатационную стойкость деталей и изделий.

За счет сильного измельчения зеренной структуры и соответствующего повышения прочностных характеристик материала открывается перспектива замены легированных дорогостоящих сталей и сплавов дешевыми и недефицитными углеродистыми сталями равной прочности.

#### *Постановка задач диссертационной работы*

Исходя из представленного в 1 разделе анализа литературных и патентных источников, а также из актуальности, практической ценности темы диссертационного исследования и в соответствии с общепринятыми методиками были выделены следующие основные задачи исследования:

- определить режимы плазменной обработки колес, обеспечивающие существенное снижение интенсивности изнашивания колесной стали марки 2 (ГОСТ 10791-2011);

- исследовать особенности структурообразования при сверхбыстрых скоростях нагрева и охлаждения ( $\sim 6000^\circ\text{C}$ ) и кратковременности воздействия на металл ( $\sim 10^{-2} - 10^{-3}$  с), при поверхностной плазменной закалке;

- исследовать влияние режимов дифференциальной термической обработки элементов колеса (обода, диска и ступицы) на его трещиностойкость и надежность;

- рекомендации по оптимальной глубине упроченной зоны контактной поверхности для повышения эксплуатационного ресурса колесных пар;

- исследовать влияние режимов поверхностной плазменной закалки на распределение остаточных напряжений, способствующее повышению износо- и трещиностойкости.

## 2 МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ

### 2.1 Исследования структур методами оптической и электронной микроскопии

Микрошлифы для исследования готовили по стандартной методике, которая исключает возможное нарушение исходной микроструктуры.

Количественную оценку содержания, вида, морфологии, соотношения и дисперсности структурных и фазовых компонентов проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 5639-82 «Стали и сплавы. Методы обнаружения и определения размера зерен» на оптическом микроскопе Axio Observer D1m Carl Zeiss, который предназначен для изучения фазового состава и структурных особенностей обрабатываемой стали при увеличении от 100 до 1000 раз (рисунок 1).



Рисунок 1 – Оптический микроскоп Axio Observer D1m Carl Zeiss



Рисунок 2 – Электронный растровый (сканирующий) микроскоп JEOLJSM-5910 с анализатором

В соответствии с рисунком 2, электронно-микроскопические исследования проводились на *электронном* микроскопе JEOLJEM 2110 в диапазоне увеличения от 1000 до 50 000 раз. Основными преимуществами используемого метода являются возможность изучения мелких деталей структуры, количественные изменения параметров субструктуры, а также возможность визуального восприятия сложной реальной структуры обрабатываемого материала.

Как известно, просвечивающая электронная микроскопия отличается от световой прежде всего своим разрешением – свойством оптической системы выделять близко расположенные детали исследуемого объекта. В оптических микроскопах он определяется длиной волны света, используемого для освещения. Как отмечалось выше, это существенно ограничивает максимальное увеличение оптического микроскопа. В электронных микроскопах вместо света используются сами электроны, которые в данном случае представляют собой излучение с очень короткой длиной волны [51,52].

## **2.2 Методы измерения микротвердости определения механических свойств**

В работе использованы современные методы исследования структуры и свойств экспериментальных образцов. Исследования проводились в лабораториях материаловедения и нанотехнологий Карагандинского государственного индустриального и Карагандинского государственного технического университетов (Темиртау, Караганда), в Лаборатории металловедения Института металлургии и обогащения (Алматы), в лаборатории «Термомеханическая обработка стали» Института черной металлургии Национальной академии наук Украины (Днепропетровск).

Микротвердость упрочненного слоя измеряли на микрошлифах, вырезанных в поперечном направлении из сегмента с условием сохранения упрочненного слоя на твердомере ПМТ-3 (рисунок 3) при нагрузке 1,962 Н (200 гс) в соответствии с требованиями ГОСТ 9450-2006 «Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников». Это устройство позволяет выбрать область микроструктуры, в которой будет сделано углубление. Из-за малого размера отпечатка измерялась микротвердость отдельных фазовых и структурных компонентов стали. В качестве индентирующего инструмента (индентора) использовалась алмазная пирамида с квадратным основанием и углом у основания  $136^\circ$ . В соответствии с измеренной диагональю отпечатка число твердости вычисляется как частное от приложенной нагрузки на поверхность полученного отпечатка.



Рисунок 3 – Твердомер ПМТ-3

Для измерения макротвердости использовали твердомер BUEHLER MacroMet 5101 (рисунок 4).



Рисунок 4 –Твердомер BUEHLER MacroMet 5101

Прочностные и пластические характеристики определяли на испытательной установке Инстрон, предварительно подготовив образцы по ГОСТ 1497-94 «Металлы. Методы испытаний на растяжение» (рисунок 5).





Рисунок 5 –Разрывная машина Instron 5966

Химический состав образцов определяли с помощью спектрометра искрового Spectrolab производства Германии, который предназначен для анализа химического состава металлов и сплавов с помощью искровой спектрометрии (рисунок 6).

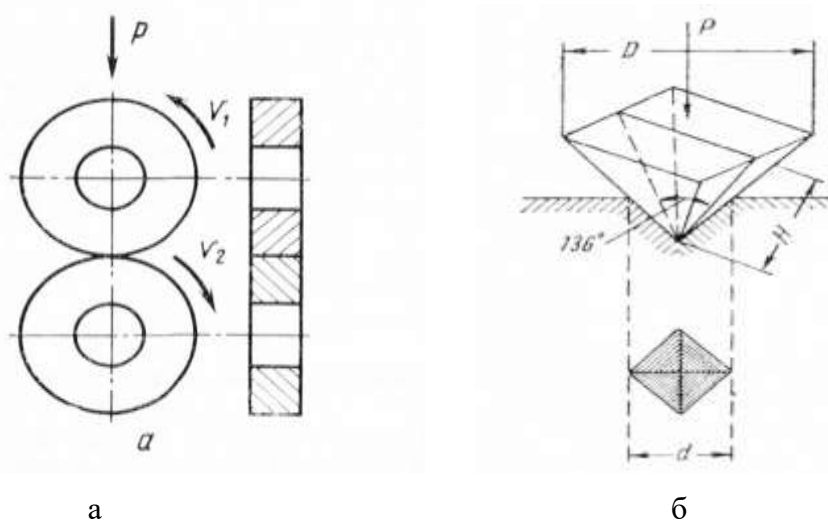


Рисунок 6 – Спектрометр искровой Spectrolab

Анализ производится методом возбуждения электрической искры или дуги между образцом исследуемого металла (сплава) и электродом, в результате которой часть металла испаряется. Прибор имеет возможности определения химического состава сплавов на основе железа, алюминия, меди и цинка с добавлением до 20 элементов (Cr, V, W, S, P, C, Nb, Mo, Ni, Ti, As и др.). Точность определения – четвертый знак включительно после запятой (десяти тысячные).

### 2.3 Методы испытания на изнашивание

Для испытания на износ использовалась машина МИ, на которой пара цилиндрических роликовых образцов может быть испытана при трении качения с различным принудительным проскальзыванием. Схема испытания на износ при прокатке цилиндрических роликов с принудительным скольжением показана на рисунке 7.



а – качение цилиндрических роликов с принудительным проскальзыванием; б – схема определения твердости по Виккерсу

Рисунок 7 – Схема испытания на изнашивание рельсового и колесного (контртела) роликов

Износостойкость исследовали на роликовых образцах диаметром 40 мм и шириной 10 мм, вырезанных из отрезков термообработанного рельса методом объемной закалки в масле при температуре  $\sim 850^{\circ}\text{C}$ . Твердость после термической обработки составляет 351-378 НВ.

Режим испытания на износ: давление (нагрузка) между образцами 70 кг, скорость вращения вала 500 об/мин. Скольжение роликовых образцов составляет 0,5; 0,9 и 13%. В качестве противовеса использовались ролики из колесной стали.

Износостойкость определяли путем взвешивания массы образца до и после испытания. Мерой износа служила потеря массы образца, для чего образец взвешивали до и после испытания с точностью 0,0002 г. После

тщательного протирания войлоком с бензином, затем с техническим спиртом. Потеря массы  $\gamma \cdot m^2 / \tau$ , где  $\gamma$  – потеря массы в граммах,  $m^2$  – поверхность износа;  $\tau$  – время износа [53].

#### 2.4 Механические и рентгенографические методы определения остаточных напряжений

В работе определение и характер распределения остаточных напряжений было оценено рентгеновским и механическим методами. Распределение внутренних напряжений на поверхности и по глубине упрочненного слоя металла колеса изучали рентгеновским методом с использованием рентгеновского дифрактометра ДРОН-1. Метод основан на прецизионном измерении межплоскостных расстояний кристаллической решетки при наличии внутренних напряжений. Это обусловлено тем, что под действием механических напряжений упругие деформации вызывают изменение атомных межплоскостных расстояний в кристаллической решетке, в соответствии с изменением которых меняются углы дифракции рентгеновского излучения. Изменение угла дифракции при наличии механических напряжений приводит к смещению дифракционного пика на регистрируемой дифракционной картине относительно его положения при отсутствии напряжений. По этому смещению прямым образом определяется величина упругой деформации [54, 55].

Из теории дифракции рентгеновских лучей известно, что если длина волны излучения  $\lambda$  и угол падения  $\alpha$  удовлетворяют условию Вульфа-Брэгга:

$$n\lambda = 2d\cos\alpha, \quad (1.21)$$

то падающие лучи отражаются, не проникая вглубь кристалла. (Здесь  $n$  – произвольное целое число,  $d$  – расстояние между двумя соседними атомными плоскостями кристаллической решетки). Рентгеновский метод позволяет определить суммарное напряженное состояние колесав результате воздействия эксплуатационных нагрузок и влияния внутренних остаточных напряжений.

Следует при этом отметить, что точное определение внутренних макроскопических напряжений (напряжений 1 рода), затруднено из-за наличия фазовых напряжений, которые возникают в результате фазовых (структурных) превращений при термической обработке. Возникновение фазовых напряжений, как известно, связанос тем, что фазовые и структурные составляющие сталей (аустенит, феррит, мартенсит и двухфазные структуры - перлит, сорбит) имеют различный удельный объем. При нагреве и охлаждении это приводит к возникновению термических и фазовых напряжений из-за градиента термического расширения и сжатия этих структурных составляющих сталей.

Трудность точного определения остаточных напряжений 1 рода, особенно в таких телах сложной формы, какими являются железнодорожные колеса, приводит к необходимости и целесообразности применения механического

метода для определения характера распределения остаточных напряжений в колесах.

Использование механического метода основано на том, что в металле с остаточными напряжениями существуют области упругих деформаций разного знака. Если срезать (или стравить) с него поверхностный слой, то становится возможным упругое снятие остаточных напряжений, т.е. механические методы определения величины и знака остаточных напряжений основаны на измерении возникающих при этом упругих деформаций. Величина остаточных напряжений могут быть вычислены по деформациям. Поэтому была принята методика исследования распределения остаточных напряжений в ободе колеса, основанная на измерении остаточной деформации, возникающей при его разрезке. О деформации можно судить по изменению длины образца, которую необходимо точно измерить. Замеры производились с точностью до 0,05 мм. Методика разрезки и испытания образцов колес заключалась в следующем. Из обода колеса вырезается исследуемый образец толщиной 5 мм размерами 40x100 мм. Торцы образца необходимо подгонять точно под 90 градусов к его краям.

С наружного края подготовленного таким образом образца снимается слой толщиной 0,5 мм. Для этого использовали ручной настольный отрезной станок Uniton-2 (производства Дании), в котором охлаждение отрезного диска осуществлялось водой с антикоррозионной присадкой. До и после снятия слоя длина образца тщательно измеряется штангенциркулем, а ширина образца – микрометром.

Знак остаточных напряжений определяется по изменению длины образца. Если длина образца увеличилась, значит, удалены слои металла, в которых действовали растягивающие остаточные напряжения. Уменьшение длины образца является показателем того, что удален слой металла, в котором действовали сжимающие остаточные напряжения. Для этого тщательно измеряется длина образца до удаления кромки, а затем после каждого удаления. Поразности длин образца до и после удаления определяется  $\Delta l$ . Площадь поперечного сечения  $F = b \cdot h$  подсчитывается до и после каждого удаления. Поразности соответствующих площадей определяется  $\Delta F$  – площадь поперечного сечения удаленной полосы.

Напряжение в образце:

$$\sigma = E \Delta l / l, \text{ кг/мм}^2 (1.22)$$

где  $E$  – модуль упругости стали,  $E = 21000 \text{ кг/мм}^2$ . По результатам измерений и подсчетов делается заключение о характере и распределения остаточных напряжений [56].

### **Выводы по второму разделу**

Таким образом, во втором разделе представлены методики проведения исследований для выполнения основной цели диссертационной работы –

повышение износостойкости и эксплуатационного ресурса цельнокатаных колес вагонов:

- произведен выбор необходимого для исследований приборов и оборудования;

- методика определения химического состава плазменно-упрочненного слоя образцов с возбуждением спектра на искровом спектрометре SPECTROLAB;

- методы определения механических свойств (прочностных и пластических характеристик), упрочненных различными способами экспериментальных образцов;

- металлографические методы изучения структуры (субструктуры) оптической и электронной микроскопией;

- известная методика определения величины износа упрочненных и неупрочненных экспериментальных образцов и их описание;

- распределение остаточных внутренних напряжений в ободе плазменно-упрочненных образцов с помощью рентгеновского и механического методов и их краткое описание.

### 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНО-ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА КОЛЕСНОЙ СТАЛИ

#### 3.1 Использование метода активного эксперимента для выбора режима плазменной обработки

Для исследования режимов плазменного упрочнения в работе воспользовались методикой планирования и реализации активного эксперимента. Как известно, эта методика позволяет получить ответы на вопросы том, как нужно организовать эксперимент, чтобы наилучшим образом решить поставленную задачу в смысле затрат времени или точности результатов. Кроме того эта методика важна при обработке результатов эксперимента, поскольку позволяет получить максимум информации об исследуемом процессе и сделать обоснованные выводы по результатам эксперимента [57-59].

Из предварительных исследований и известных в литературе данных следует, что *основное влияние* при плазменной закалке на глубину упрочненной зоны, образование плавной переходной структуры, обеспечивающей прочность сцепления упрочненного слоя и основного металла, высокое сопротивление зарождению и развитию трещин *оказывает* сила тока, напряжение электрической дуги, расход плазмообразующего газа в паре с силой тока и частота вращения колесной пары. Предварительные эксперименты показали, что можно обеспечить заданный уровень этих факторов и их изменения в интересующем диапазоне, т.е. это технически осуществимо, поэтому можно считать, что условия для проведения активного эксперимента соблюдаются. При этом такие факторы как расстояние от срезасопла до обрабатываемой поверхности (10-15 мм), диаметр сопла (~3,5 мм), угол встречи плазменной струи с закаливаемой поверхностью (60 град.) не варьировали.

С учетом указанного область определения основных факторов, интервалы их варьирования, условия проведения активного эксперимента и матрица его планирования  $2^{4-1}$  приведены в таблицах 2, 3, 4, 5.

Таблица 2 – Область определения основных факторов

Фактор	Область определения
Сила тока, А	240-280
Напряжение электрической дуги, В	110-130
Расход плазмообразующего газа, л /мин	3,0-7,0
Частота вращения колесной пары, мин.	5,0-9,0

Таблица 3 – Интервалы варьирования факторов

Показатели	Сила тока, А	Напряжение электрической дуги, В	Расход плазмообразующего газа, л/мин	Частота вращения колесной пары, мин.
Интервал Варьирования	10	5	1,0	1,0

Таблица 4 –Условия проведения активного эксперимента

Фактор	Сила тока, А	Напряжение электрической дуги, В	Расход плазмы образующего газа, л /мин	Частота вращения колесной пары, мин.
Основной уровень	260	120	5,0	7,0
Интервал варьирования	10	5	1,0	1,0
Верхний уровень	280	130	7,0	9,0
Нижний уровень	240	110	3,0	5,0

Таблица 5 – Матрица планирования эксперимента  $2^{4-1}$ с учетом системы смешивания оценок

Номер эксперимента	$X_0$ ( $X_1X_2$ )	$X_1$ ( $X_2X_3X_4$ )	$X_2$ ( $X_1X_3X_4$ )	$X_3$ ( $X_1X_2X_4$ )	$X_4$ ( $X_1X_2X_3$ )	$X_1X_2$ ( $X_3X_4$ )	$X_1X_3$ ( $X_2X_4$ )	$X_1X_4$ ( $X_2X_3$ )	$Y$
1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	$Y_1$
2	+1	-1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	$Y_2$
3	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	$Y_3$
4	+1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	$Y_4$
5	+1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	$Y_5$
6	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	$Y_6$
7	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	$Y_7$
8	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	$Y_8$

Переход от натуральных значений факторов к кодированным значениям задано формулой (1.23):

$$X_j = (X_j - X_{j0}) / i, (1.23)$$

где  $X_j$  – кодированное значение фактора;

$X_{j0}$  – натуральное значение основного уровня;

$X_j$  – натуральное значение фактора;

$i$  – интервал варьирования.

$$X_1 = X_1 260/10; X_2 = X_2 120 / 5; X_3 = X_3 5/1; X_4 = X_4 7 / 1 (1.24)$$

После выполнения всех необходимых процедур и вычислений получили следующую математическую модель (уравнение регрессии), по которой возможно предсказать направление изменения параметра оптимизации при изменении выбранных факторов:

$$Y = 255,5 + 8,97X_1 + 1,37X_2 - 0,93X_3 + 8,3X_4 - 5,0 X_{12} + 6,55X_{13} + 2,2 X_{14} (1.25)$$

На глубину плазменной закалки – $Y$  положительно влияют: сила тока –  $X_1$ , несколько слабее напряжение электрической дуги –  $X_2$ , частота вращения колеса –  $X_4$ , а также парные взаимодействия силы тока с расходом плазмообразующего газа –  $X_{13}$  и частотой вращения колеса при закалке –  $X_{14}$ .

Отрицательно влияют расход плазмообразующего газа –  $X_3$  и парные взаимодействия силы тока с напряжением плазменной дуги –  $X_{12}$ . Казалось бы совместное влияние сила тока и напряжение плазменной дуги, а также расход плазмообразующего газа должно положительно влиять на параметр оптимизации: но этого неслучилось: коэффициенты при  $X_3$  и  $X_{12}$  отрицательный. Это значит, что оказывает сильное влияние смешанные парные эффекты  $X_{13}$  и  $X_3X_4$ . Обращает на себя внимание сильное влияние парных эффектов  $X_{13}$  (силы тока и расхода плазмообразующего газа) и  $X_{14}$  (силы тока и частоты вращения колеса в процессе плазменной закалки).

Результаты проведенных экспериментов показали, что на глубину упрочненной зоны наибольшее значение оказывает ток электрической дуги, несколько слабее напряжение плазменной струи, парное взаимодействие: сила тока и скорость вращения колесной пары.

Поэтому при проведении исследований плазменному упрочнению подвергали цельнокатаные колеса при следующем режиме:

Ток электрической дуги, А – 275.

Напряжение электрической дуги, В – 120.

Номинальная мощность дуги, кВт – 35.

Диаметр сопла, мм – 3,5.

Расстояние от среза до закаливаемой поверхности, мм 10-15.

Расход защитного газа, л/мин – 3-6.

Частота вращения колесной пары, об/мин – 0,14-0,25 (5,0-7,0 оборотов за минуту).

Конструкция плазмотрона позволяет за один проход обрабатывать поверхность катания обода колеса и внутреннюю зону гребня, т.е. область наиболее подверженная износу. Упрочненная зона имеет вид непрерывной полосы шириной до 60 мм, охватывающей поверхность катания обода и гребня.

### **3.2 Определение модели оценки качества цельнокатаной колесной стали**

При определении основных требований к модели оценки качества продукции руководствовались предупреждающими и корректирующими пунктами системного менеджмента качества по международному стандарту ИСО 9001-2015. Применительно к цельнокатаной колесной стали главной задачей такой модели является установление несоответствий между оценками качества колесной стали до плазменного упрочнения поверхности катания колес и после него. Это позволит характеризовать текущее состояние работы по плазменной обработке колесной стали и путем устранения выявленных несоответствий повысить надежность и долговечность ее эксплуатации [59, с. 117].



Из разработанной модели качества, приведенной на рисунке 8, следует, что параметры колесной стали, полученные после упрочняющей термической обработки, не соответствуют аналогичным параметрам, указанным в ГОСТ 10791-2011. Согласно требованиям (пункты 6.9 и 6.10) ГОСТ 10791-2011 ободья колес подвергаются упрочняющей термической обработке путем закалки и отпуска, структура которой должна представлять собой феррито-цементитную смесь с зернистой формой карбидных частиц, называемую сорбитом отпуска. При этом механические свойства стали колес должны соответствовать значениям: временное сопротивление обода  $\sigma_b=910-1100 \text{ Н/мм}^2$ , твердость обода на глубине 30 мм не менее 255 НВ, ударная вязкость колеса при  $20^\circ\text{C}-\text{KCU}=20 \text{ Дж/см}^2$ .

*Несоответствие 1.* Однако, в сертификате о качестве колесной стали не указан режим упрочняющей термической обработки, хотя согласно техническим требованиям ГОСТ 398-96 все температурные параметры термической обработки колес должны регистрироваться, поскольку об однородности исходной структуры можно судить на основе использованной термической обработки. Это важно потому, что исходная структура влияет не только на процессы структурообразования при плазменной обработке, но и на глубину упрочненного слоя. Известно, что на изделиях с исходной трооститной структурой толщина слоя гораздо больше, чем при исходной перлитной или феррито-перлитной структуре. Объясняется это тем, что разные исходные структуры имеют неодинаковую теплопроводность вследствие различия внутренней межфазной поверхности, отделяющей феррит от карбидов (цементита). Так, межпластиночное расстояние –  $\Delta_0$ , характеризующее сумму толщин двух соседних пластинок феррита и цементита, для структур распада переохлажденного аустенита в области диффузионных превращений составляет: для перлита 0,5-1,0 мкм, для сорбита 0,5-0,25 мкм, для троостита 0,25-0,10 мкм. Как известно, межпластиночное расстояние двухфазных структур в углеродистой стали зависит от степени переохлаждения аустенита относительно равновесной температуры –  $\Delta T$  и оценивается эмпирической формулой (1.26):

$$\Delta_0=(15/\Delta T)10^4 \text{ А, А}=10^{-10} \text{ м} \quad (1.26)$$

Следовательно, общая протяженность границ между пластинками феррита и цементита в структурах трооститного типа существенно больше, чем в перлите или сорбите, что обеспечивают им, при прочих равных условиях, большую глубину упрочненной зоны.

Металлографические исследования показывают, что в структуре бандажной стали, поступающей на плазменное упрочнение, присутствует сетка феррита (Приложение Г), которая при исходной закаленной и отпущенной структуре не должна наблюдаться, что косвенно свидетельствует об отклонении режима термической обработки колесной стали от стандартной.

*Несоответствие 2.* Качество полученной упрочненной зоны после плазменной обработки не соответствует требованиям. Согласно п.6.15 ГОСТ 10791-2011 поверхность колес должна быть без дефектов в виде мелких капель микроплавленного металла и шероховатостей. Это несоответствие происходит вследствие расхождения режимов плазменной обработки. При сверхвысокой скорости нагрева ( $\sim 6000^{\circ}\text{C}/\text{с}$ ), имеющей место при плазменной закалке стали, нарастание теплового потока от высокотемпературной струи к обрабатываемой поверхности должна проводиться в соответствии с теплофизическими свойствами материала. Коэффициент теплопроводности стали 60 (аналог стали марки 2, исследованной в данной работе) при температуре  $100^{\circ}\text{C}$  составляет  $68 \text{ Вт}/(\text{м}^{\circ}\text{C})$  и он уменьшается до  $36 \text{ Вт}/(\text{м}^{\circ}\text{C})$  при температуре  $400^{\circ}\text{C}$ . [60]. Высокая мощность высокоэнтальпийной плазменной струи привела к микроплавлению поверхностного слоя, вызывая шероховатость. Нельзя допускать грубого повреждения поверхности закаливаемой детали, которое при большой мощности плазменной дуги может привести к образованию мелких капель расплавленного металла. Как показывают микроснимки, полученные оптическим микроскопом, зона микроплавления, состоящая из неравновесной мелкодисперсной структуры, близкой к аморфной микроструктуре, выявляется в виде белого не травящегося слоя высокой твердости  $\sim 1690 \text{ HV}$ .

*Несоответствие 3.* Основывается на результатах проведенного исследования и анализа требований к качеству колесной стали после плазменной обработки. Планируемые результаты не соответствуют требуемому качеству после плазменной обработки из-за двух вышеуказанных несоответствий.

Таким образом, задача плазменной обработки колесной стали заключается в том, чтобы идентифицировать и уменьшить несоответствия, которые были выявлены и определены как значительные препятствия к получению качественной поверхности обода и гребня колесных пар.

Разработанная модель оценки качества колесной стали позволит улучшить качество контактных поверхностей пары трения «колесо-рельс», увеличить ее надежность и долговечность.

Принцип непрерывного повышения качества является одним из основных принципов системного менеджмента качества (ИСО 9001-2015). Видно, что модель непрерывного повышения качества колесной стали в совокупности с моделью оценки выполняется в соответствии с циклом непрерывного улучшения РДСА. Цикл РДСА отражает последовательность действий и решений, необходимых для получения требуемого результата. РДСА обеспечивает возможность предварительного планирования и отслеживания последовательности действий, анализируя проблемы, которые могут возникать в ходе выполнения работ.

Модель непрерывного повышения качества колесной стали колесных пар, позволит организовать мероприятия по минимизации несоответствий.

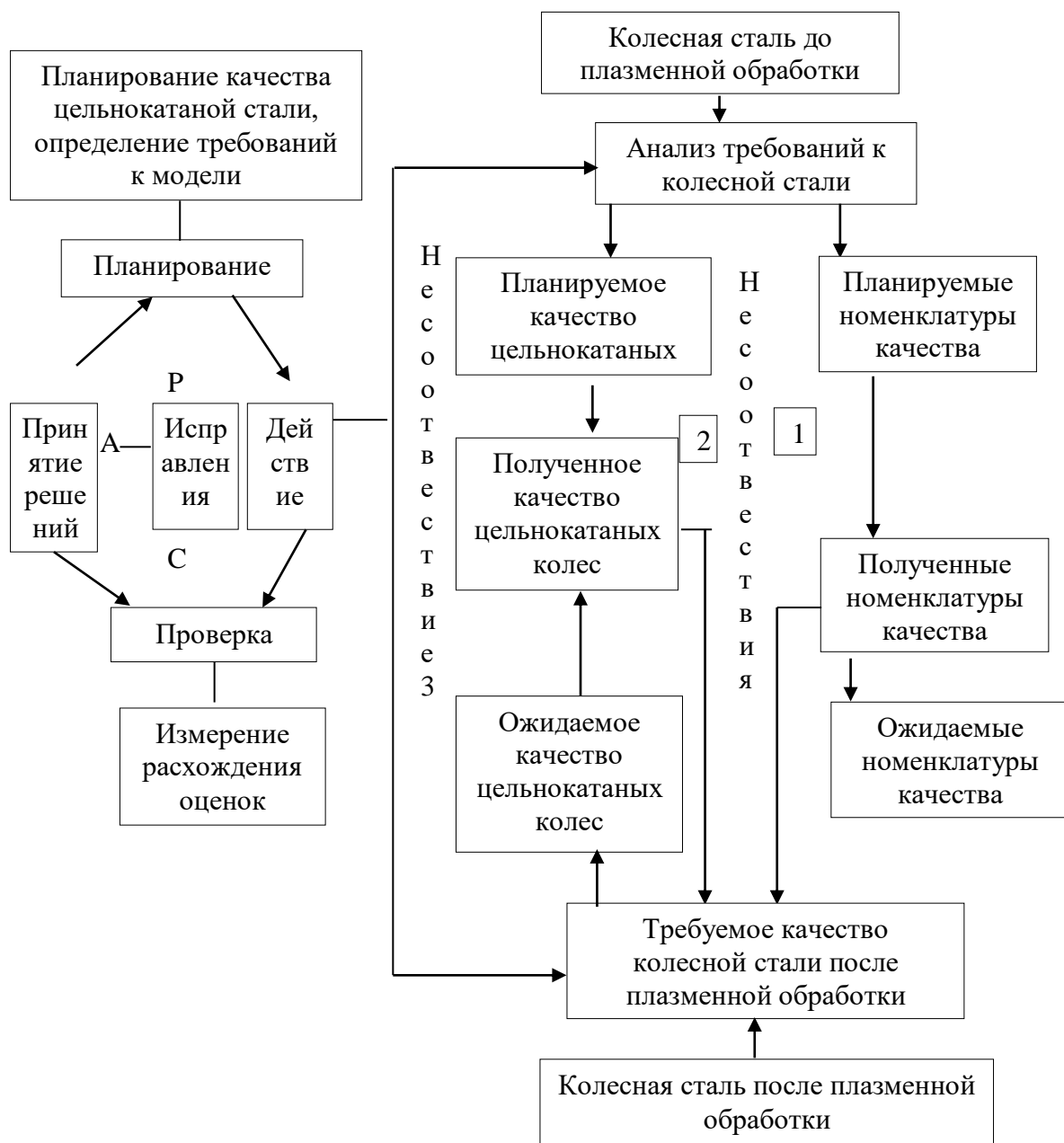
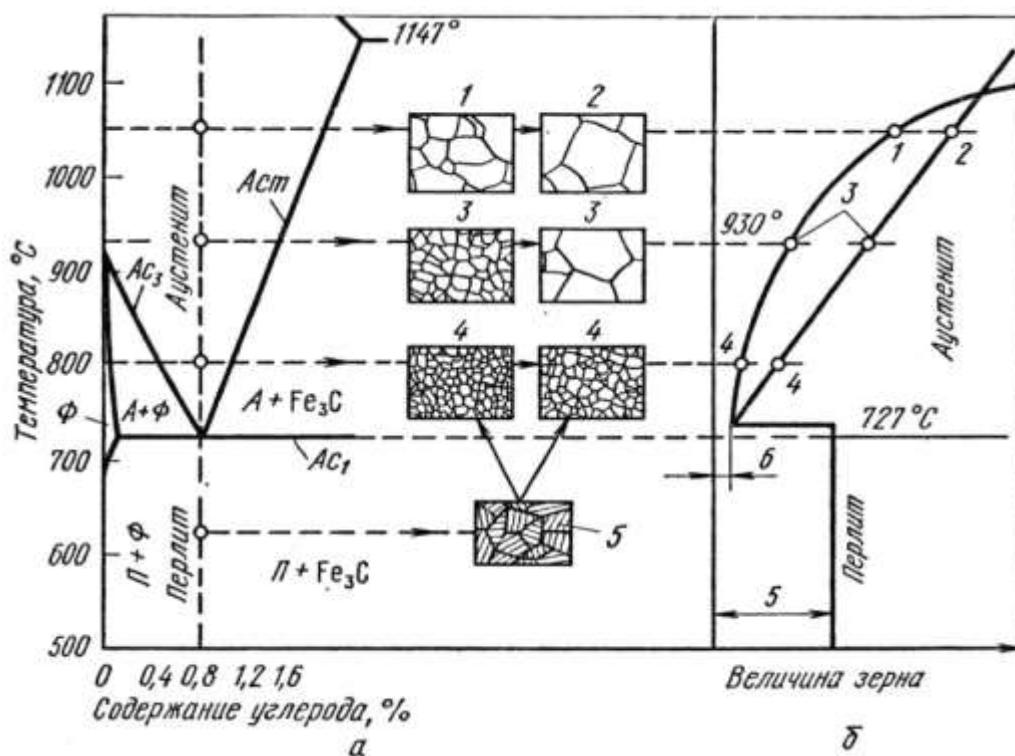


Рисунок 8 – Модель оценки качества колесной стали

### 3.3 Исследование влияния скорости нагрева и охлаждения при плазменной закалке на параметры упрочненной зоны

Рассмотрим физические факторы, позволяющие использовать сверхскоростной нагрев при термической обработке металлов. При использовании большинства видов термической обработки металлов с медленным нагревом для получения неравновесной структуры температура нагрева назначается выше на 30-50°C, критических температур  $A_{c1}$  и  $A_{c3}$ .



а – схематическое изображение размера зерна при разных температурах; б - схема роста зерна при нагреве под термообработку; 1 - наследственно мелкозернистая сталь; 2 - наследственно крупнозернистая сталь; 3 - наследственное зерно; 4 - зерно при нагреве под термическую обработку; 5 - исходное зерно; 6 - начальное зерноаустенита

Рисунок 9 – Диаграмма фазового равновесия Fe-Fe<sub>3</sub>C и схема роста аустенитного зерна в углеродистой стали

Из диаграммы состояния Fe-C<sub>3</sub>S, представленной на рисунке 9 видно, что в традиционных способах термической обработки используется только низкотемпературная часть аустенитной области. Температурный интервал до перехода стали в жидкое состояние остается очень большими составляет 400-700°C (в зависимости от химического состава стали, прежде всего, содержания углерода).

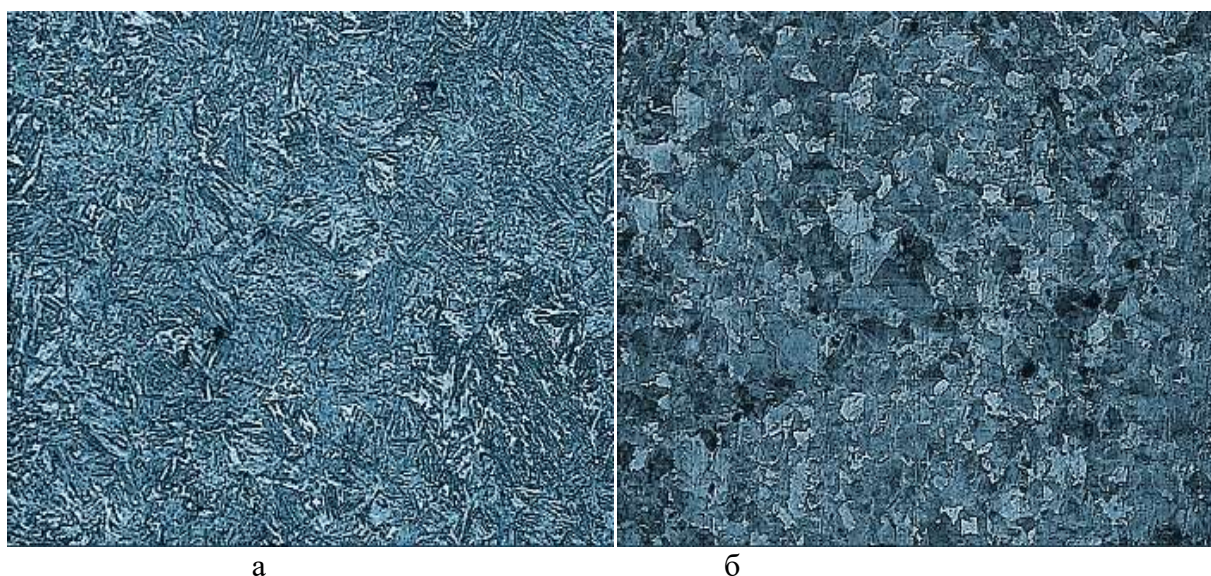
В работах [61,62] на примере образцов из сталей 45, Y8, 40X, 30 ХГСА показано, что нагрев металлов, со скоростью  $v = 10^2-10^4$ °C, вызывает смещение температурфазовых превращений в высокотемпературную область на 50-300°C.

Таким образом, из всего температурного интервала существования аустенитной области, при плазменном нагреве (безоплавления поверхности) используется 1/3 его величины тогда, как при медленном нагреве используется только 1/20 температурного интервала аустенитной области. Наличие большого температурного интервала существования аустенитной области на диаграмме Fe-Fe<sub>3</sub>C является одним из основных факторов, позволяющих использовать сверх скоростную обработку (при помощи плазменной струи (дуги) для широко распространенных марок стали).

Важной особенностью плазменного нагрева является также неоднородность температурного поля нагрева, свойственная всем процессам,

использующим высококонцентрированные источники нагрева. Отсюда происходит усиление термодиффузионных процессов на границе металл-активная среда. Кроме того, использование плазменной дуги позволяет ускорить диффузионные процессы за счет электронного тока (электротермический эффект).

Известно, что размер зерен аустенита, в первую очередь, зависит от отношения скоростей двух элементарных процессов: – возникновения центров (зародышей)  $n$  и скорости их роста  $s$ . Чем больше это отношение, тем меньше начальное зерно образующейся фазы-аустенита (рисунок 9). С повышением температуры наблюдается все большее количественное опережение скорости зарождения над скоростью роста. Поэтому при смещении фазовых превращений в сторону высоких температур, процесс зарождения становится доминирующим над процессом роста зерен. Регулируя скорость нагрева (т.е. количество введенной энергии в поверхностный слой металла) можно получать различные соотношения  $n/s$ . Использование скоростного нагрева позволяет различное состояние аустенита – от крупно зернистого до мелкозернистого (рисунок 10).



а – упрочненной (поверхностной) зоны; б– сердцевины

Рисунок 10 – Микроструктура колесной стали, х 100

Структурными исследованиями методом электронной (JEOLISM-5910) и оптической (Leica Micro systems) микроскопии установлено, фазовые и структурные составляющие стали (аустенит, мартенсит, троостит, бейнит) после плазменной закалки характеризуются сверхмелкозернистым строением, что объясняется быстрыми скоростями нагрева, при которых структурные превращения смещаются в область высоких температур, сильно изменяя кинетику возникновения и роста аустенитных зерен. Это приводит к тому, что по мере смещения аустенитно-мартенситного превращения в область высоких температур все большую роль играет процесс зарождения аустенитных зерен, а

процесс их роста в значительной степени подавляется. В итоге формируется сверхмелкозернистый аустенит (балл зерна 14,  $d_{cp}=22$  мкм по ГОСТ 5639), который при последующем немедленном охлаждении превращается в высокодисперсный мартенсит с комплексом высоких механических свойств.

Влияние скорости охлаждения на характеристики упрочненного слоя при различных режимах поверхностной плазменной закалки исследовали на мобильной сертифицированной установке ручной плазменной закалки УДГЗ-200. Использование установки ручной плазменной закалки УДГЗ-200 обосновано тем, что она имеет определенные преимущества перед автоматизированными установками плазменного упрочнения, заключающиеся в том, что при этом не требуются большие капитальные затраты на приобретение дорогостоящих механизмов в виде суппорта для перемещения плазматрона по поверхности обрабатываемой детали, роботов для манипуляции в процессе работы, автоматов и др. Поэтому ручные процессы в различных технологиях обработки металлических материалов (закалка, сварка, наплавка) продолжают оставаться самыми распространенными на производстве, так как позволяют обрабатывать то, что раньше было недоступно: крупно-модульные шестерни, железнодорожные и крановые колеса, зубчатые и шлицевые соединения, различные режущие инструменты, штампы, и др. Но в то же время следует отметить, что качество ручных процессов в той или иной степени страдает естественными погрешностями при их воспроизведении, определяемых сложностью самих процессов и квалификации работника (термиста, сварщика и др.)

Как известно, быстрое охлаждение в практике традиционной термической обработки обеспечивается помещением разогретой детали в охлаждающую жидкость (воду, масло, смеси солей и щелочей и др.) или подачей жидкости на разогретую поверхность закаливаемого изделия (спрейерное охлаждение). При плазменной закалке деталь или плазматрон перемещается по поверхности обработки со скоростью, обеспечивающей критическую скорость закалки, т.е. ту минимальную скорость охлаждения, при которой высокотемпературная фаза (аустенит) превращается в мартенсит, не распадаясь на феррито-цементитную смесь [63]. В зависимости от скорости перемещения детали (плазматрона) нагрев может быть с микроплавлением или без микроплавления. Как выше отмечалось, в случае с микроплавлением нельзя допускать грубого повреждения поверхности закаливаемой детали, которое, как правило, сопровождается образованием мелких капель расплавленного металла. Важно подчеркнуть, что охлаждение закаливаемой детали идет *сверхвысокой скоростью из-за малого объема разогреваемого металла*, поскольку плазменной нагрев высокоэнтальпийной струей в отличие от других способов нагрева отличается *локальностью*. Такое безпринудительное охлаждение, обеспечивающее закалку теплоотводом в холодные участки закаливаемой детали без подачи на нагретую поверхность охлаждающей жидкости, широко используется для повышения износостойкости таких крупногабаритных и массивных изделий как, шпиндели

тяжелого токарного станка, цельнокатаные железнодорожные колеса, прокатные валки, крупно-модульные шестерни и др. [64].

Скорости охлаждения при нагреве крупногабаритного тела, каким является цельнокатаное вагонное колесо, при режимах, применяемых на установке ручной плазменной закалки УДГЗ-200, исследовали в соответствии с теорией Н.Н. Рыкалина и Фея [65-67].

По формуле  $\omega = q/2\pi\lambda vt^2$  (1.27) рассчитаны скорости охлаждения в точке на оси движения мощного точечного источника теплоты через 1с. Мощность плазменной дуги пропорциональна силе тока и падению напряжения на ней. Напряжение при закалке не регулируется. Остальные параметры плазменной обработки выбраны в диапазонах, типичных для установки УДГЗ-200. Мощность плазменной дуги  $q=IU$ , при этом напряжение постоянное, равное 30В, сила тока варьируется в диапазоне 50-250 А, коэффициент теплопроводности стали постоянный, равен 47 Вт/(м°С), скорость перемещения дуги варьируется в диапазоне 5-40 м/час, время постоянное, равное 1 с. Точные значения вычисленных величин представлены в таблице 6 и чтобы отслеживать закономерности изменения в виде графика (Зависимость скорости охлаждения от скорости перемещения дуги при токе 50, 150 и 250А), рисунок 11.

Таблица 6 – Зависимость скорости охлаждения от скорости перемещения плазменной дуги (скорости упрочнения) при различных значениях силы тока

v, м/ч	v, м/с	$\omega, ^\circ\text{C}/\text{с}$ при I, А				
		50	100	150	200	250
5	0,0014	3631,96	7263,92	10895,88	14527,85	18159,81
10	0,0028	1815,98	3631,96	5447,94	7263,93	9079,91
20	0,0055	924,21	1848,43	2772,64	3696,86	4621,07
30	0,0083	612,24	1224,49	1836,73	2448,99	3061,22
40	0,0111	457,88	915,75	1373,63	1831,50	2289,38

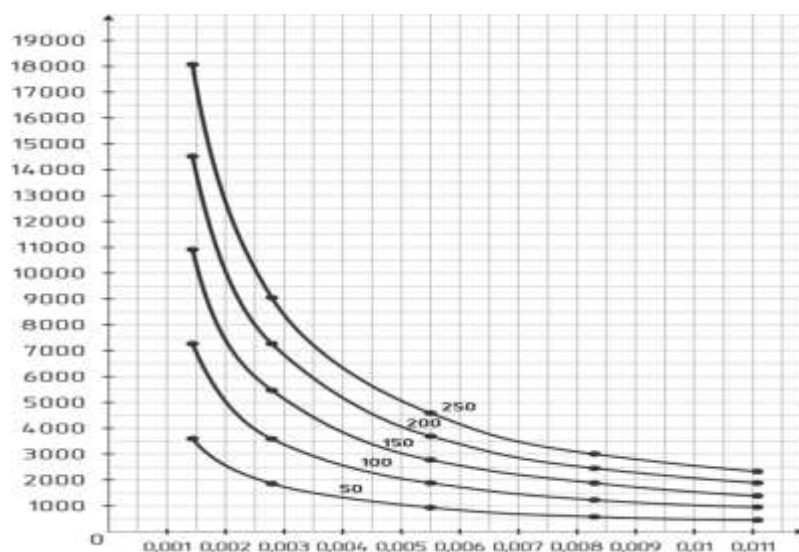


Рисунок 11 – Зависимость скорости охлаждения от скорости перемещения плазмотрона

Как видно из представленных таблицы 6 и рисунка 11, числовые значения скорости охлаждения (18159.81-612.24°C/с) при всех значениях силы тока от 50 до 250 А превышают критическую скорость закалки в воде, составляющую по данным [68] ~ 500°C/с. Исключение составляет скорость охлаждения (меньше 500°C/с) при токе плазменной дуги 50 А и скорости ее перемещения 0,0111м/с, равная, по данным расчета, 457.88°C/с.

Таким образом, можно утверждать, что при скоростном нагреве высокоэнтальпийной плазменной струей массивных деталей практически во всем выбранном диапазоне обработки детали под действием тока дуги и скорости перемещения детали (скорости закалки) обеспечивается критическая скорость охлаждения, необходимая для плазменной закалки. Заметим, что среднеуглеродистые конструкционные стали закаляются даже при существенно меньших скоростях охлаждения.

Научный и практический интерес вызывает влияние варьирования времени охлаждения на изменение скорости охлаждения при плазменной закалке. Скорости охлаждения рассчитывали при значении коэффициента теплопроводности углеродистой конструкционной стали (~ 47 Вт/ (м°C) [69]. Расчет выполнен при следующих исходных данных. Коэффициент теплопроводности стали (~ 47 Вт/ (м°C), сила тока - I (150 А) и напряжение дуги - U (30В) постоянные, мощность дуги  $q = IU=4500$  Вт, скорость перемещения дуги также постоянна и составляет 20 м/ч, время с начала нагрева варьировали от 2 с до 16 с. Расчет проводили по вышеуказанной формуле, результаты приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Зависимость скорости охлаждения от времени

t, с	2	4	6	8	10	12	14	16
$\omega$ , °C/с	94.44	173.61	77.16	43.42	27.78	19.29	14.17	10.85

Как видно из представленных данных расчета, по мере удаления плазменной дуги от рассматриваемой точки скорость охлаждения существенно замедляется. Это свидетельствует о том, что сразу после начала охлаждения температура быстро снижается и времени на распад аустенита по диффузионному перлитному механизму с образованием мягких структур (феррито-цементитной смеси) недостаточно, поэтому переохлажденный аустенит быстро достигает области мартенситного превращения и распада происходит по бездиффузионному мартенситному механизму с образованием твердой структуры мартенсита [70,71].

Для того, чтобы конкретизировать при какой температуре и соответственно времени совершается переход от бездиффузионного мартенситного превращения (быстрое охлаждение) к диффузионному перлитному превращению (медленное охлаждение) произведен расчет для типичного режима закалки. Диапазон времени ограничен 6 с., так как в нем происходит на и более существенное замедление скорости охлаждения (77.16°C/с.)



Исходные данные для расчета: температура нагрева  $T = q/2\pi\lambda vt$ ; коэффициент теплопроводности стали ( $\sim 47$  Вт/ (м<sup>°</sup>С), сила тока - I (150 А) и напряжение дуги - U (30В) постоянные, мощность дуги  $q = IU=4500$ Вт, скорость перемещения дуги также постоянна и составляет 20 м/ч, время сначала нагрева варьировали от 1 до 6 с. Результаты расчета приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Зависимость температуры от времени при закалке

t, с	1	2	3	4	5	6
T, °С	2777,78	1388,89	925,93	694,44	555,56	462,96

Согласно данным таблицы 8, существенное замедление скорости охлаждения по истечении 4 и 6 с происходит при температурах 694.44 и 462.96<sup>°</sup>С, т.е. в интервале непосредственно предшествующем интервалу мартенситного превращения среднеуглеродистых сталей (400-200<sup>°</sup>С). Это подтверждает ранее приведенные расчеты, показывающие то, что при плазменной закалке скорости охлаждения высоки (для силы тока 150 А и скорости перемещения детали 5 м/ч 10895,880 С), чтобы не допустить распада переохлажденного аустенита по перлитному механизму с образованием мягких структур перлита (феррито-цементитной смеси). Из таблицы 8 можно сделать важный для практики вывод о том, что в интервале мартенситного превращения ( $M_n$  и  $M_k$ ) скорости охлаждения снижаются. Это способствует предупреждению закалочных трещин, возникающих из-за градиента температур. Такой способ закалки, заключающийся в быстром охлаждении до температур 400-500<sup>°</sup>С, затем замедленное охлаждение, используется в практике упрочняющей термической обработки и известен как *закалка в двух средах*. В начале деталь погружают в воду и после короткой выдержки в воде переносят в масло. Поэтому такой способ закалки называют *закалкой через воду в масло*.

Быстрое охлаждение в воде предотвращает перлитное превращение, а последующее замедленное охлаждение в масле уменьшает закалочные напряжения в мартенситном интервале. Как показывает практика, здесь на и более ответственным моментом является выдержка в воде, продолжительность которой устанавливается для каждого конкретного изделия. И передержка, и недодержка могут привести к браку. При недодержке в воде происходит частичный или полный распад аустенита и получается заниженная твердость, а при передержке возникают сильные закалочные напряжения, которые могут привести к короблению и образованию трещин. Несмотря на указанные недостатки, закалку через воду в масло широко применяют в производстве режущего инструмента из углеродистой стали. Известно, что углеродистые стали обладают не большой прокаливаемостью и поэтому режущий инструмент из нее нельзя закалывать в масло [72].

На Защинском ремонтном локомотивном депо проведена серия экспериментов без микроплавления поверхности по исследованию влияния

режимов плазменной закалки на глубину упрочненной зоны и повышение трещиностойкости.

При этом плазменной закалке подвергались железнодорожные колеса, изготовленные из углеродистой стали марки 2, таблица 9 (ГОСТР 52366-2005).

Таблица 9 – Химический состав колесной стали, (%)

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	V	Mo
0,610	0,820	0,370	0,014	0,020	0,042	0,053	0,012	0,024	< 0,005
0,620	0,820	0,400	0,015	0,016	0,042	0,053	0,009	0,030	< 0,005

Механические свойства колес (таблица 10) в состоянии поставки ( $\sigma$ ,  $\delta$ ,  $\Psi$  по ГОСТ 1497 на образце диаметром 15 мм с расчетной длиной 60 мм; ударная вязкость – KCU на образцах типа 1 по ГОСТ 9454; твердость по Бринеллю–НВ по ГОСТ 9012 шариком диаметром 10 мм при нагрузке 29430 Н или 3000 кг с)

Таблица 10 – Механические свойства колес

$\sigma$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\delta$ , %	$\Psi$ , %	KCU, Дж/см <sup>2</sup>	НВ на глубине 20 мм	НВ гребня
1017	15,5	32	36	285	288
1044	14,5	31	35	295	300

При режиме плазменного упрочнения: сила тока 275 А, напряжение электрической дуги 120 В, расход аргона 5 л/мин, частота вращения колесной пары 0,143 об/мин., расстояние от среза сопла до обрабатываемой поверхности 10 мм – определена глубина закаленной зоны. Микротвердость на расстоянии 15-20 мкм от края образца составляет 8 ГПа, до глубины 1000 мкм находится на этом уровне и далее плавно снижается до 6 ГПа на глубине 2500 мкм. Микротвердость исходной структуры колеблется в интервале 3,7-4,1 ГПа.

Таким образом, глубина закаленной зоны (упрочненного слоя) вместе с зоной термического воздействия при данном режиме упрочнения составляет ~ 2500 мкм.

В ходе экспериментов установлено важное значение обеспечения равномерного прогрева по всей зоне контакта высокотемпературной струи с обрабатываемой поверхностью, который позволяет существенно улучшить прокаливаемость и трещиностойкость упрочненного слоя. Для этого необходимо обеспечить плавное нарастание процесса распространения теплоты, которое обуславливается зависимостью теплопроводности, теплоемкости и соответственно температуропроводности стали от температуры. Поскольку в тепловых процессах температуропроводность характеризует собой скорость изменения температуры, то чем больше температуропроводность, тем меньше температурная разность в отдельных точках внутри тела при одинаковых условиях нагревания и охлаждения. Для углеродистых сталей с повышением температуры теплопроводность уменьшается, а температуропроводность возрастает. Так, коэффициент

теплопроводности углеродистой стали 60 (аналог колесной стали марки 2) с 68 Вт/(м°С) при  $T=100^{\circ}\text{C}$  уменьшается до 36 Вт/(м°С) при  $400^{\circ}\text{C}$ . Температуропроводность углеродистых сталей возрастает с 0,13 см<sup>2</sup>/с при  $T=20^{\circ}\text{C}$  до 0,56 см<sup>2</sup>/с при  $T=2200^{\circ}\text{C}$  [73]. Это обстоятельство приводит к тому, что при резком интенсивном тепловом воздействии тонкие приповерхностные слои стали заочень короткое время прогреваются до высоких температур, ограничивают проникновение тепла во внутрь и перегреваются. Поэтому характер нарастания теплового потока через закаливаемую поверхность должен согласовываться с теплофизическими свойствами обрабатываемой стали.

Установлено, что засчет ориентации высокотемпературной струи под углом 30-60° к обрабатываемой поверхности, изменения силы тока, скорости вращения колесной пары, а также расстоянии от среза сопла до обрабатываемой поверхности, равном 10 мм, можно обеспечить увеличение доли тепла, передаваемой на нагрев материала и требуемый характер нарастания плотности теплового потока, обеспечивающий необходимую глубину закалки и повышение трещиностойкости (максимальное усилие разрушения).

Макроструктура гребня колеса показывает, что упрочненный слой распространяется по всей рабочей поверхности гребня (включая выкружку) и глубина его составляет 2,0-2,5 мм. Это важно, так как упрочненный слой дольше сохраняется от обточки до обточки колеса при его эксплуатации. По-видимому, глубина упрочненного слоя, включая зону термического воздействия, 2,0-2,5 мм и ее ширина 25-26 мм является оптимальной при принятом режиме упрочнения.

*Выводы:*

1. Сверх быстрые скорости нагрева, при которых структурные превращения смещаются в область высоких температур, сильно изменяют кинетику возникновения и роста аустенитных зерен. Это приводит к тому, что по мере смещения аустенитно-мартенситного превращения в область высоких температур все большую роль играет процесс зарождения аустенитных зерен, а процесс их роста в значительной степени подавляется. В итоге формируется сверхмелкозернистый аустенит (балл зерна 14,  $d_{cp}=22$  мкм по ГОСТ 5639-82) который при последующем немедленном охлаждении превращается в высокодисперсный мартенсит с комплексом высоких механических свойств.

2. Скорости охлаждения при температурах, соответствующих аустенитной области (не менее  $750^{\circ}\text{C}$ ) и температур распада аустенита с образованием перлита ( $700-500^{\circ}\text{C}$ ) существенно превосходят не только критическую скорость закалки, но и скорости охлаждения при объемной закалке в воду или масло. Это гарантирует закалку обрабатываемой детали без применения сопутствующего охлаждения на установке плазменной закалки УДГЗ-200 (Приложение Д).

3. По мере снижения температуры и достижения ею области мартенситного превращения скорость охлаждения замедляется. Это имеет большое практическое значение, поскольку благоприятствует предупреждению

образования внутренних закалочных напряжений, возникающих из-за градиента температур. В технологии термической обработки деталей для получения такого эффекта используют способ закалки через *воду в масле*. При поверхностной плазменной обработке такой способ закалки присутствует естественным образом, что делает ее технологически привлекательной.

4. Экспериментальная закалка цельнокатаного железнодорожного колеса на установке УДГЗ-200 показывает, что в диапазоне практических режимов работы обеспечивается закалка поверхностного слоя колеса, что подтверждает расчетный вывод о не обязательной подаче охлаждающей жидкости (воды) на закаливаемую поверхность при плазменной закалке. Этот факт имеет большое практическое значение, поскольку организация работ на технологическом участке без подачи воды на закаливаемое изделие и последующей сборки существенно проще.

### **3.4 Исследование условий формирования градиентно-слоистой структуры в колесной стали**

В последние годы наблюдается технический прогресс в изучении структурообразования в металлических материалах при различных видах упрочняющей термообработки, что характеризуется повышенным интересом к изучению закономерностей формирования и развития градиентно-слоистых структур [74].

Актуальность этих исследований обоснована тем, что, с одной стороны, физическая природа процессов, происходящих при формировании и развитии градиентно-слоистых структур, недостаточно изучена, с другой стороны, как отмечалось выше, градиентно-слоистые структуры в металлических материалах придают сталям и сплавам новые, ранее не известные свойства.

Градиентно-слоистые структуры представляют особый интерес при поверхностном плазменном упрочнении. Это связано с тем, что во многих случаях локальная термообработка технически и экономически оправдана, когда упрочняется только наиболее нагруженная рабочая поверхность детали при сохранении ее первоначальных свойств во внутренних слоях [50, с. 106; 75, 76].

С целью изучения особенностей формирования слоистой структуры в закаленном слое были проведены специальные эксперименты по определению влияния слоисто-градиентной структуры в колесной стали на износостойкость и сопротивление хрупкому разрушению. Исследование проводилось на образцах колесной стали с магнитно-плазменным упрочнением гребня. Макроскопические исследования проводили на поперечном шаблоне повязки с высотой гребня 28 мм после травления 50%-м водным раствором серной кислоты.

Микротвердость упрочненного слоя измеряли на микрошифте перед травлением на приборе ПМТ-3 при нагрузке 1,962 Н (200 гс). Измерение на поперечном сечении проводили в направлении, перпендикулярном касательной

гребня с максимальной глубиной затвердевшего слоя. Значения микротвердости приведены в таблице 11.

Таблица 11 – Изменение микротвердости по глубине упрочненного слоя

Расстояние от поверхности, мм	Микротвердость, HV <sub>02</sub>	Расстояние от поверхности, мм	Микротвердость, HV <sub>02</sub>
0,05	860	0,80	540
0,10	837	0,95	540
0,15	837	1,10	528
0,20	792	1,25	414
0,25	750	1,40	414
0,30	673	1,55	359
0,40	608	1,70	330
0,50	594	1,90	310
0,60	594	2,10	287
0,70	566	2,30	282

Как видно из таблицы 11, изменение микротвердости происходит в диапазоне от 860 HV<sub>02</sub> до 255 HV<sub>02</sub>. На глубине 0,05-0,30 мм наблюдается мартенситная структура с микротвердостью 860-673 HV<sub>02</sub>. На глубине 0,40-1,40 мм троосто-мартенситная структура с микротвердостью 608-414 HV<sub>02</sub>, затем трооститная структура на глубине 1,55-1,70 мм с микротвердостью 359-330 HV<sub>02</sub>, сорбитная на глубине 1,90-2,50 мм с микротвердостью 310-282 HV<sub>02</sub>, далее структура основного металла с феррито-перлитной структурой.

Мартенсит →

Мартенсит+ троостит →

Троостит + сорбит

Сорбит + перлит →

Перлит + феррит →

Исходная структура →



Рисунок 12 – Градиентно-слоистая структура гребня цельнокатаного колеса в упрочненной зоне, снятая оптическим микроскопом при увеличении x200

Изменения микроструктуры стали, подвергнутой поверхностной плазменной закалке, показаны на рисунке 12. В глубине упрочнения отчетливо наблюдается образование нескольких структурных зон различной микротвердости. На поверхности имеется зона, химический состав которой соответствует составу стали с содержанием углерода 0,63%. При резком охлаждении он превращается в игольчатый мартенсит с дисперсией 5-15 мкм. За ней следует зона аустенита, превращенного в троосто-мартенсит в твердом состоянии. В микроструктуре этих слоев наблюдается наличие небольшого количества остаточного аустенита, количество которого изменяется и зависит от глубины упрочненного слоя.

Затем следует слой троостита, где микротвердость уменьшается и зависит от объемного содержания присутствующих фаз, затем в структуре появляется сорбит. Площадь формирующегося сорбита определяется центральными участками бывших аустенитных зерен, характеризуется меньшей дисперсностью ферритных и цементитных компонентов в них по сравнению с трооститом и имеет меньшую микротвердость. Микротвердость в этой области также зависит от объемного числа присутствующих фаз. Далее, по мере углубления образца внутрь, на стыке границ бывших аустенитных зерен появляется феррит и его количество постепенно увеличивается. Структура остается феррит-сорбитовой, а затем постепенно превращается в феррит-перлит. Общая микротвердость уменьшается до исходной. Исходная структура представляет собой смесь зерен феррита и перлита с объемной долей каждой фазы 40-60% соответственно.

Изменение микротвердости по сечению упрочненной зоны приведены на рисунке 13.

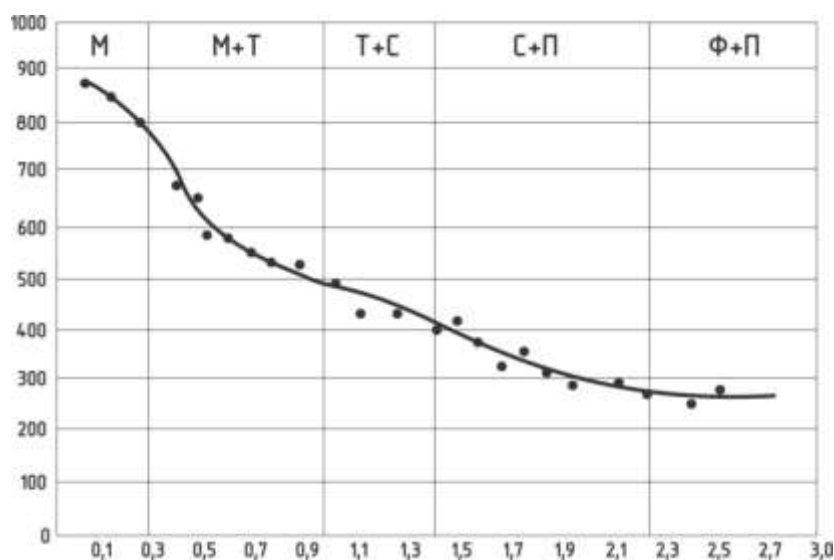


Рисунок 13 – Кривая изменения микротвердости по сечению упрочненной зоны

Показано, что при высокоскоростном нагреве и охлаждении в поверхностной зоне образуется градиентно-смешанная структура, которая имеет место при плазменном тушении. При этом оптимальной структурой

металлас позиции обеспечения необходимого набора механических свойств (прочности, твердости, пластичности и ударной вязкости) является высокодисперсный мартенсит, мартенсит-троостит и троосто-сорбит. Установлено, что формирование такой структуры в поверхностном слое при плазменном упрочнении происходит в диапазоне скоростей охлаждения  $\sim 500-1000^\circ\text{C}/\text{с}$ . Дальнейшее увеличение скорости охлаждения не приводит к образованию новых структур на микроуровне [77].

Необходимо оптимизировать режим плазменной обработки (прежде всего, путем изменения мощности теплового потока) таким образом, чтобы весь процесс плазменного упрочнения обеспечивал поверхностную закалку на глубину 2,0-2,5 мм равномерно по всей окружности колеса и по ширине закалочной дорожки с твердостью закаленной поверхности от 500 до 800 НВ. Это позволит увеличить ресурс упрочненного слоя. Отметим, что из-за очень высокой твердости закаленных гребней условия взаимодействия колеса и рельса могут изменяться, особенно на криволинейных участках пути, что может привести к микрорезанию головки рельса со сверх твердым слоем гребня, а также к негативному воздействию на напряженно-деформированное состояние бандажей, повышая вероятность их хрупкого разрушения в процессе эксплуатации. Была изучена и микроструктура металла при упрочнении с микроплавлением тонкого поверхностного слоя. Металлографические исследования показали, что микроструктура по глубине плазменного воздействия состоит из трех зон:

- зона микроплавления, состоящая из неравновесной мелкодисперсной структуры, близкой к аморфной. Эта зона микроструктурно проявляется в виде белого нетравильного слоя исключительно высокой твердости ( $\sim 1700$  НВ). Зона микроплавления неравномерна по ширине обрабатываемой поверхности. Отсюда следует, что при разработке оптимального режима плазменной обработки необходимо обеспечить равномерность упрочненного слоя как по ширине закалочной дорожки, так и по окружности колеса, а также контролировать равномерность в диаметрально противоположных направлениях;

- непосредственно под белым нетравильным слоем находится зона плазменного воздействия, граничащая с зоной неполной закалки (между критическими точками  $A_{c3}-A_{c1}$ ) с микротвердостью, соответствующей твердости тонкоигольного мартенсита и троосто-мартенсита, переходящая в закалочный сорбит и отпускающий сорбит ближе к основной (исходной) структуре, толщина этой зоны также неравномерна и колеблется от 0,2 до 0,3 мм;

- зона исходной структуры и твердости, представляющая собой мелкодисперсный сорбит высвобождения с твердостью 400-450 НВ.

Такая микроструктура и исключительно высокая твердость, полученная в результате плазменного упрочнения, наряду с другими технологическими мероприятиями, обеспечивают значительное снижение износа гребней колесных пар. Так, по данным ремонтного локомотивного депо «Защита»,

средний износ гребней закаленных колесных пар на 10, 20 и 30 тыс. км по сравнению с не закаленными колесными парами снижается на 0,3, 0,78 и 0,55 мм соответственно.

Отметим, что эти структурные особенности после плазменной обработки объясняются сверхвысокими скоростями нагрева и охлаждения, недостижимыми при традиционных методах термообработки.

Это приводит к тому, что структурные и фазовые компоненты стали после плазменной обработки (аустенит, мартенсит, троостит, сорбит) характеризуются повышенной дисперсностью и более высоким уровнем внутренних (фазовых и структурных) напряжений II-города, а также выраженной химической микронеоднородностью [78].

Как отмечалось выше, при сверх быстрых скоростях нагрева фазовые превращения смещаются в область высоких температур, и это обстоятельство сильно влияет на кинетику возникновения и роста новых фазовых ядер. Это приводит к выводу, что, регулируя количество вводимой энергии, можно создать такие условия для  $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения, когда единственной возможностью перехода исходных фаз в аустенит является процесс зарождения. Это открывает возможность получения ультра дисперсного аустенита, когда размеры зерен соизмеримы с критическими размерами при температуре, достигаемой при высокотемпературном высокоскоростном нагреве.

Для экспериментальной проверки данных утверждений были проведены специальные исследования по определению химического состава сплава с возбуждением спектра в искре на искровом спектрометре SPECTROLAB<sup>CCD</sup> фирмы Leica Micro systems. Данные химического анализа по глубине плазменного упрочнения и неупрочненной зоны, представленные в таблице 11 подтверждают химическую микро неоднородность структурных и фазовых составляющих исследованной стали.

Таблица 12 – Данные химического состава по глубине плазменного упрочнения и неупрочненной зоны

Наименование зон по глубине упрочнения	Химический состав, % (ат.)								
	C	Si	V	Mn	Fe	W	Ti	Cr	S
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
t 2	0,06	0,002	-	0,063	0,855	0,008	-	-	-
t 3	0,5	0,002	0	0,06	0,87	0,02	0,0002	-	0,0005
t 4	0,002	-	0,001	0,065	0,87	0,009	-	0,001	0,002
t 5	0,05	0,0005	0,001	0,062	0,86	0,018	0,004	-	0,002
t 6	0,047	0,0035	-	0,072	0,87	-	-	0,001	-
t 7	0,035	0,004	-	0,068	0,89	0,002	0,0026	-	-
t 8	0,02	0,0018	0,0027	0,07	0,88	0,019	-	-	-
t 9	0,027	0,0025	0,0023	0,065	0,88	-	-	-	-
t 10	0,03	0,004	-	0,074	0,86	0,026	-	-	-
t 11	0,04	0,004	0,001	0,069	0,88	-	0,003	-	-
Основа	0,008	-	-	0,059	0,90	-	-	-	-

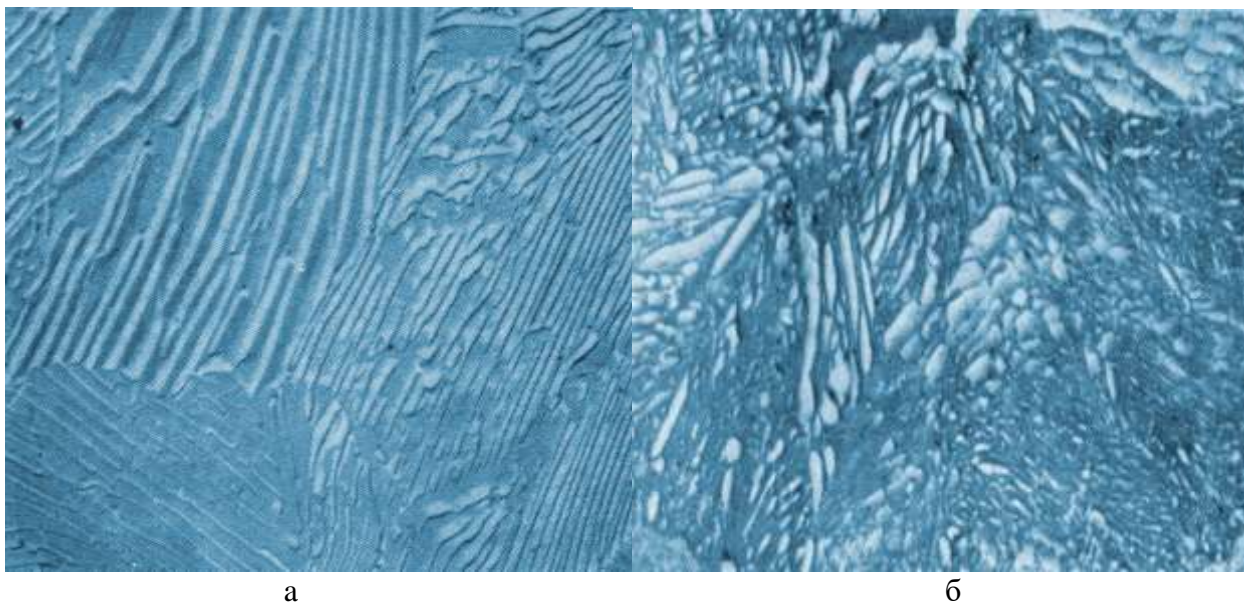


По данным таблицы 12 видно, что содержание углерода по глубине упрочненной зоны колеблется от 0,002 до 0,06% (ат.). Такую же микро неоднородность по глубине закаленной зоны имеют и другие постоянные примеси стали (Si, Mn, V и др.).

При параметрах нагрева ( $t \approx 10\,000^\circ\text{C}$ ) и скорости охлаждения ( $V_{\text{охл}} \approx 6000^\circ\text{C}/\text{с}$ ), характерных для плазменной обработки, процессы, связанные с гомогенизацией жидких и твердых растворов, не успевают завершиться в объеме отдельных зерен и это способствует созданию неравновесных метастабильных структур высокой твердости с хорошим сопротивлением износу и микросхватыванию в процессе трения.

Важно отметить, что закономерности процесса структурообразования при закалке после воздействия высококонцентрированных энергетических потоков подчиняются общим закономерностям структурообразования, описываемым диаграммой фазового равновесия железо-углерод (Fe-C), то есть глубина упрочненных структурных зон при плазменном воздействии зависит от параметров нагрева и определяется механизмом и кинетикой фазовых превращений в неравновесных состояниях.

В связи с этим 2-хфазное строение сорбита и троостита выявляется только под электронным микроскопом, так как межпластиночное расстояние этих структур находится на пределе разрешающей способности оптического микроскопа ( $\sim 0,2$  мкм). Поэтому на рисунке 13 приведены фотоснимки соответственно сорбита и троостита при увеличении 5000, которые были сняты на электронном микроскопе. Здесь четко видно, что обе эти структурные составляющие состоят из чередующихся пластинок феррита и цементита.



а – сорбит, х 5000; б–троостит, х 5000

Рисунок 13 – Структура продуктов распада аустенита при непрерывном охлаждении

Важно отметить, что при непрерывном охлаждении не удастся разграничить процессы образования чистого троостита, сорбита или перлита, так как скорость изменения температуры о сечению охлаждаемого изделия не остается постоянной, она переменна и меняется по определенному закону, зависящему от теплофизических свойств стали. На самом деле процессы превращения могут накладываться один на другой по температуре и времени своего развития, что ведет к формированию, как правило, смешанных структур в виде мартенсит + троостит, троостит + сорбит или сорбит + перлит (рисунок 12).

С этих позиций рассмотрим кинетику и закономерности формирования градиентно-слоистой структуры на основе типичной термокинетической диаграммы до эвтектоидной углеродистой стали (0,59-0,63% С) являющейся аналогом колесной стали по ГОСТ 10791-2011. Сплошные линии соответствуют распаду аустенита при непрерывном охлаждении (термокинетические), пунктирные – распаду аустенита при постоянной температуре (изотермические) [79, 80].

Штриховые линии соответствуют изотермическому превращению аустенита, сплошные линии превращению при непрерывном охлаждении (термокинетическая диаграмма), рисунок 14.

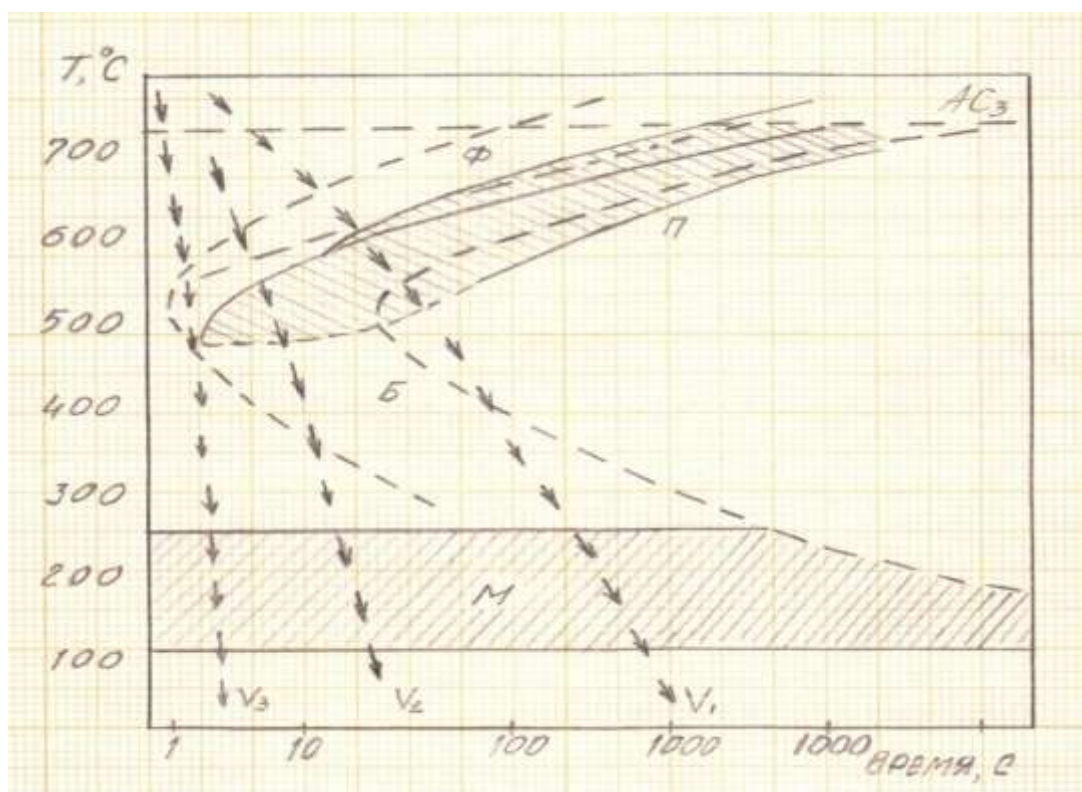


Рисунок 14 – Схема диаграммы распада переохлажденного аустенита доэвтектоидных (0,60-0,65% С) конструкционных сталей

Примечание – Составлено по источнику [80, с. 178]

По данным видно, что термокинетическая диаграмма при температурах выше мартенситной точки  $M_n$  ( $\sim 260^\circ\text{C}$ ) характеризуется только одним кинетическим максимумом, что означает отсутствие промежуточного механизма распада аустенита (незаштрихованная часть диаграммы). При температурах выше этого максимума распад аустенита протекает диффузионным путем и сопровождается образованием феррито-карбидной смеси различной степени дисперсности. В зависимости от степени дисперсности феррито-карбидную смесь называют перлитом, сорбитом или трооститом или соответственно грубо, средне - и тонкодисперсным перлитом [81].

Из рисунка 14 следует, что при охлаждении аустенита со скоростью  $V_3$  (критическая скорость закалки) и выше образуется пластинчатый мартенсит, при меньшей скорости охлаждения  $V_2$  переохлажденный аустенит превращается в троосто-мартенсит частично по перлитному (диффузионному), частично по мартенситному (бездиффузионному) механизму. При еще меньших скоростях охлаждения  $V_1$  превращение развивается по диффузионному механизму с образованием троостита и сорбита.

Термокинетическая диаграмма наглядно показывает, что промежуточный механизм превращения аустенита с образованием бейнитных структур не может быть реализован, поскольку превращение в данном случае развивается либо поперлитному механизму (скорости охлаждения  $V_1$  и ниже), либо посмешанному перлитно-мартенситному (скорости охлаждения между  $V_1$  и  $V_2$ ), либо по мартенситному механизму (скорости охлаждения  $V_3$  и выше).

Заметим, что в основе как перлитного, так и мартенситного превращений лежит полиморфный переход гранецентрированной кристаллической решетки аустенита в объёмно-центрированную решетку равновесного или пересыщенного феррита ( $\gamma \rightarrow \alpha$ ).

Таким образом, сопоставление кинетики превращения аустенита в изотермических условиях и в процессе непрерывного охлаждения показывает, что соответствующие линии на термокинетических диаграммах расположены правее и ниже аналогичных линии изотермической диаграммы. Это показывает, что устойчивость переохлажденного аустенита при непрерывном охлаждении несколько больше и превращение протекает при более низких температурах, чем в случае изотермического распада переохлажденного аустенита.

На практике это явление отражается на величине межпластиночного расстояния, который является важнейшей структурной характеристикой конструкционных сталей. Межпластиночное расстояние – это усредненная сумма толщин двух соседних пластин феррита и цементита перлитных структур. Чем больше скорость охлаждения, тем меньше межпластиночное расстояние и тем дисперснее получается феррито-карбидная смесь, значит тем выше микротвердость (твердость) стали.

Отметим, что при анализе структурных превращений необходимо иметь в виду, что деление феррит-цементитных структур на перлит, сорбит или троостит условно и между этими структурами обычно нет четкой границы. Это

связанос тем, что на практике невозможно различить процессы образования чистого троостита, сорбита или перлита, так как скорость изменения температуры по поперечному сечению охлаждаемого изделия в процессе непрерывного охлаждения не остается постоянной, как отмечалось выше, она переменна и изменяется по определенному закону в зависимости от теплофизических свойств стали [82].

Кроме того, в отличие от перлита, сорбит и троостит не являются равновесными структурами, так как в реальных производственных условиях охлаждение обычно происходит неравномерно, а это приводит к некоторому насыщению сорбита и троостита ферритом углерода, что естественным образом сказывается на механических свойствах. В частности, механические свойства стали с перлитными, сорбитовыми или трооститными структурами прямо пропорциональны площади раздела феррита и цементита. Поэтому при снижении температуры разложения аустенита и соответствующем уменьшении структуры (увеличении степени дисперсности) ферритные пластины несколько пересыщаются углеродом, повышаются прочностные характеристики (прочность –  $\sigma_s$ , твердость – НВ), а пластические характеристики (удлинение –  $\delta$  и сужение –  $\psi$ ) снижаются.

Микроструктуры, показанные на рисунке, иллюстрируют суперпозицию мартенситного превращения на перлитное. Таким образом, при скорости охлаждения  $V_2$  в интервале температур  $\sim 550^\circ\text{C}-460^\circ\text{C}$  часть аустенита превращается в троостит по диффузионному механизму, оставшаяся часть ниже точки  $M_n$  ( $\sim 260^\circ\text{C}$ ) переходит в мартенсит без диффузии. Эти и другие подобные примеры показывают, что экспериментальное исследование процессов структурообразования при охлаждении с переменной скоростью является сложной задачей, так как в зависимости от ряда факторов и, прежде всего, от скорости охлаждения кинетика и температурные условия развития того или иного превращения могут изменяться в определенных пределах. Поэтому не всегда удастся очертить температурные границы, в которых превращение протекает только по одному механизму (перлит-диффузионный, промежуточный или мартенсит-бездиффузионный) и четко выделить структурные зоны образования троостита, сорбита или перлита. Фактически процессы превращения переохлажденного аустенита могут перекрывать друг друга по температуре и времени их развития, что приводит к образованию смешанных пластинчатых структур.

### **Выводы по третьему разделу**

1. Показано, что при высокоскоростном нагреве и охлаждении в поверхностной зоне при плазменном тушении образуется градиентно-смешанная структура. При этом оптимальной структурой металла с позиции обеспечения необходимого набора механических свойств (прочности, твердости, пластичности и ударной вязкости) является высокодисперсный мартенсит, троосто-мартенсит и сорбит. Установлено, что формирование такой структуры в поверхностном слое при плазменном упрочнении происходит в

диапазоне скоростей охлаждения  $\sim 500\text{--}1000^\circ\text{C}/\text{с}$ . Дальнейшее увеличение скорости охлаждения не приводит к образованию новых структур в гребне колеса из стали.

2. Изучено распределение микротвердости по глубине закаленной зоны. Микротвердость поверхностного слоя (толщиной  $\sim 905$  мкм) от 8,0 ГПа снижается до 5 ГПа в промежуточном слое (толщиной  $\sim 1225$  мкм). Далее микротвердость поддерживается на уровне 3,8-3,9 ГПа, что свидетельствует об окончании зоны упрочнения и зоны термического воздействия и о переходе к исходной феррито-перлитной структуре.

3. Основным фактором, приводящим к сильному упрочнению поверхностного слоя при плазменной обработке, является формирование в приповерхностной зоне неравновесной метастабильной структуры, близкой к аморфной, переходящей к узкой зоне полной и неполной закалки с неоднородной и искаженной структурой мартенсита с высоким уровнем внутренних напряжений II рода.

4. Показано, что поверхностная зона с аморфной структурой, формирующаяся из тонкого оплавленного слоя, неоднородна по глубине: максимальная глубина этой зоны соответствует центральной части, к краю обработанной площади она уменьшается. Отсюда следует, что при отработке оптимального режима плазменной обработки необходимо обеспечить равномерность упрочненного слоя как по ширине закалочной дорожки, так и по окружности бандажа, а контроль равномерности осуществлять в диаметрально-противоположных направлениях.

5. Исходная структура колеса влияет не только на структуру обработанного плазменной струей слоя, но и на его глубину. Поэтому должны контролироваться температурные параметры термической обработки, определяющей однородность и дисперсность исходной структуры. Наиболее дисперсную структуру обеспечивает троостит с межпластиночным расстоянием 0,25-0,1 мкм.

6. Формирование в поверхностном слое плазменно-упрочненной колесной стали градиентно-слоистой структуры позволяет исключить образование резкой границы перехода от структур мартенсита к троосто-мартенситным и смешанным пластинчатым структурам (троостит, сорбит). Это является одним из основных факторов, повышающих контактно-усталостную прочность колесной стали и способствующих ее трещиностойкости.

## **4 ВЛИЯНИЕ ГРЕБНЕГО КОНТАКТА И СООТНОШЕНИЯ ТВЕРДОСТИ КОЛЕСА И РЕЛЬСА НА ИЗНОС**

### **4.1 Влияние гребневого контакта с рельсом и профиля поверхности катания на изнашивание колес**

Одной из причин интенсивного количества гребней колес и наружных рельсов является не правильная установка контакта гребня, а также сужение пути на криволинейных участках пути и использование силового профиля колеса с уменьшенной конусностью. При постановке действия этих факторов нарушается необходимое условие качения колесной пары на криволинейных участках дороги без скольжения и пробега гребня наружного колеса по наружному рельсу на криволинейных участках дороги.

Практика показывает, что для снижения интенсивности работы важно количество колес, а в некоторых случаях определяющим значением является правильная установка контакта гребня рельса с головкой выкружки. Плохая соосность профилей колес и рельсов приводит к уменьшению площади контакта и, что удовлетворительно, к увеличению контактных напряжений.

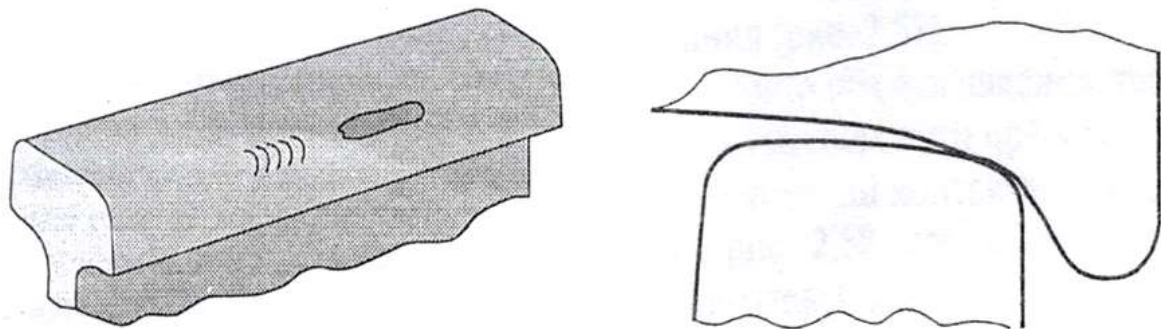
Гребневой контакт возникает в кривых малого радиуса и там, где происходит нарушение сплошности поверхности качения рельсов: на стрелочных переводах и стыках. Если контакт конька неправильно рассчитан и установлен, то могут произойти повреждения как колес, так и рельса, либо нарушения направления движения подвижного состава в колее и устойчивости движения [83,84].

Таким образом, это создает три возможных случая, в которых должны быть загружены при установке контакта гребня с головкой рельса. Это одноточечные, двухточечные и конформные контакты. Поскольку площадь контакта гребня колеса с головкой рельса невелика, этот контакт характеризуется сложным напряженным состоянием. Одноточечные и двухточечные контакты наносятся на поверхность качения колеса и рельса.

При наличии одноточечного контакта он сопровождается высокими контактными напряжениями в сочетании с вращательным и интенсивным продольным проскальзыванием. В случае двухточечного контакта преобладает высокая скорость износа и текучести материала.

Высокие контактные напряжения в сочетании с вращательным и интенсивным продольным проскальзыванием, которые возникают при одноточечном контакте, обычно вызывают усталостное повреждение рабочего скругления головки рельса. В этом случае на головке рельса могут возникать параллельные трещины, которые приводят к разрушению рабочего скругления рельса (рисунок 15).

Это связано не только с интенсивным продольным проскальзыванием, вызывающим перетекание рельсового материала, но и с неустойчивостью подвижного состава, которая выражается в колебании, значительно ускоряющем боковой износ.

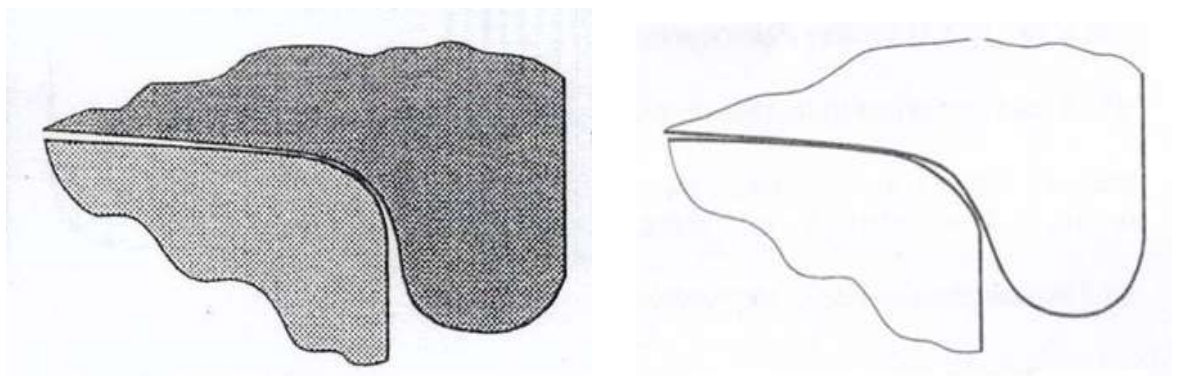


аб

а – повреждения рабочей выкружки головки рельса; б – одноточечного контакта колеса с рельсом

Рисунок 15 – Схема контактов с рельсом

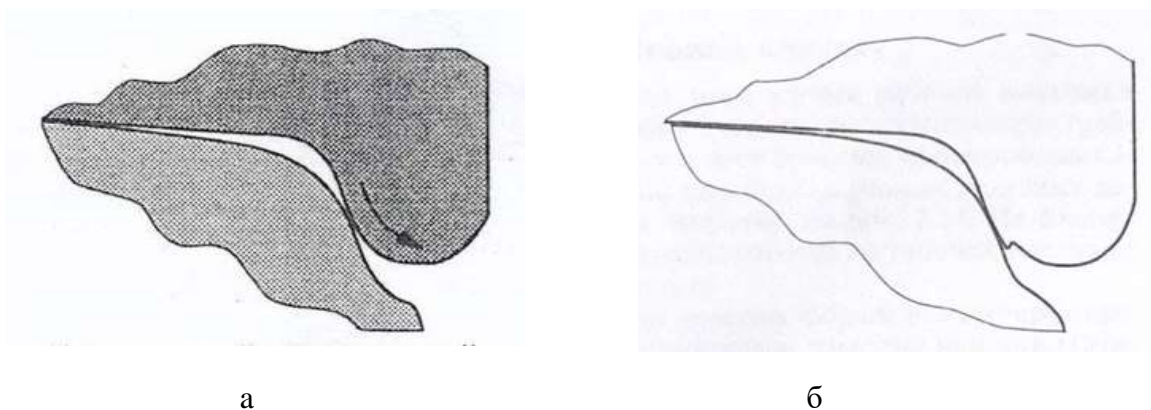
Одноточечный контакт возникает в результате неправильной конструкции колесных и рельсовых профилей. Другими причинами одноточечного контакта являются сплющивание головки рельса в процессе эксплуатации, когда колесо качения нагружает рабочую стружку сплюсненной головки рельса (рисунок 16) и чрезмерная прокатка поверхности качения колеса.



а – одноточечный контакт; б – двухточечный контакт

Рисунок 16 – Рабочая выкружка уплощенной головки рельса

Двухточечный контакт характеризуется интенсивным проскальзыванием и износом при наличии боковых сил на гребне и поперечным проскальзыванием, как это происходит на криволинейных участках пути. В этих условиях износ гребня колеса ускоряется до тех пор, пока контур гребня не совпадет с контуром рельса. Контакт здесь настолько интенсивен, что на гребне колеса возникает пластический поток материала (рисунок 17). Практика показывает, что гребень часто срезается при любом слое смазки, введенном в зону контакта.

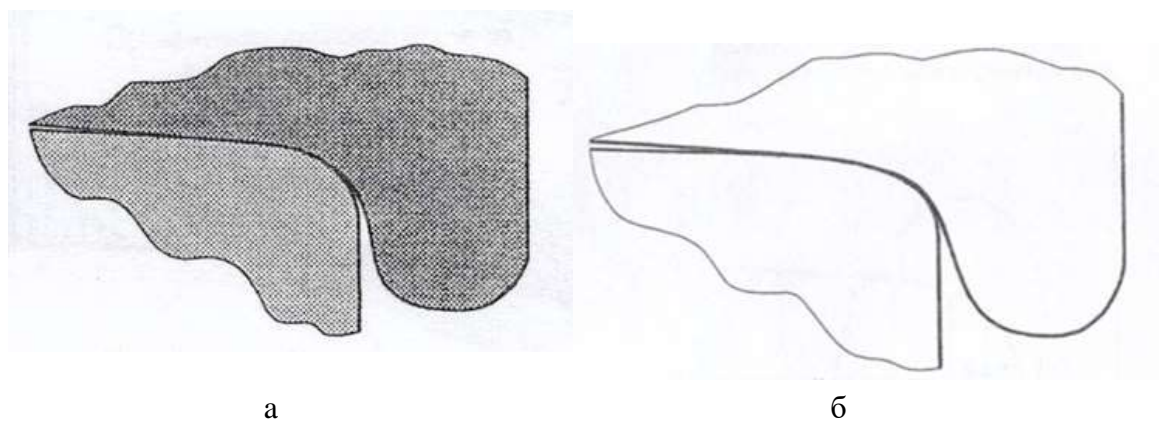


а – интенсивный двухточечный контакт; б – схема возникновения на гребне колеса пластического потока материала

Рисунок 17 – Пластическое течение материалов гребня и рельса при интенсивном двухточечном контакте

Конформный гребневой контакт возникает по мере износа рабочей кромки рельса и гребня колеса до общего профиля из-за интенсивного гребневого контакта в криволинейных участках пути (рисунок 14). Этот контакт характеризуется тем, что колесные и рельсовые профили, изношенные до соответствующей конфигурации, успешно сохраняют и показывают хорошие эксплуатационные характеристики.

Профиль этого типа имеет ряд преимуществ, а именно то, что он сохраняет свою конфигурацию и пленка смазки, нанесенной на поверхность, сохраняется за счет низких удельных давлений. Кроме того, колеса не приобретают большой конусности, как в случае одноточечного контакта. Таким образом, рекомендуется, чтобы профили колеса и рельса были конформными в соответствии с рисунком 18.



а – конформный контакт колеса и рельса; б – схема, показывающая соответствие профиля рабочей поверхности рельса профилю гребня колеса

Рисунок 18 – Колеса изнашиваются более или менее равномерно, принимая форму рабочей выкружки рельса



При разработке конформного контакта необходимо учитывать, что радиусы рабочей поверхности рельса следуют профилю гребня колеса и плавно переходят в профиль поверхности качения головки рельса, избегая возникновения двухточечного контакта между колесом и рельсом.

Динамические ударные нагрузки вызываются наличием ползунов, навар и других дефектов на поверхности качения колеса, либо прохождением колеса через рельсовый стык, деформированным сварным швом на рельсовом стыке, либо их волнообразным износом (рисунок 19).

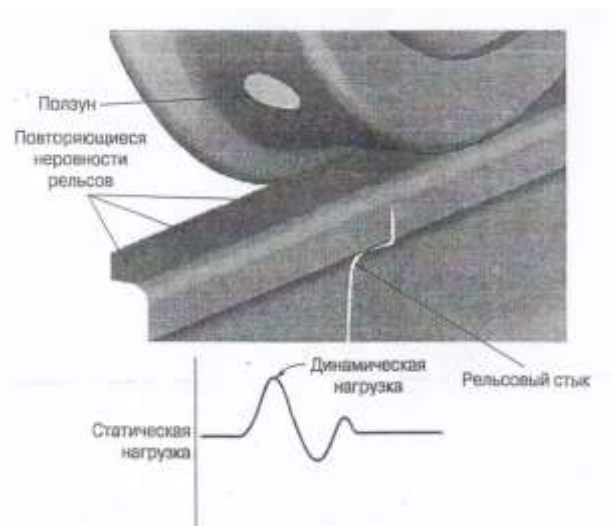


Рисунок 19 – Динамические нагрузки на колесо и рельс

Выпуклый контакт самой высокой точки профиля рельса и колеса может вызвать пластическое течение и скол металла в центральной части поверхности качения рельса и колеса. Возникновение пластического течения увеличивается, если контакт происходит ближе к наружным поверхностям колеса или рельса. Если в результате поперечного скольжения колеса относительно рельса контакт смещается к наружной кромке рельса, то это приведет к сильному износу колеса и наплыву (перемещению металла) головки рельса (рисунок 20).

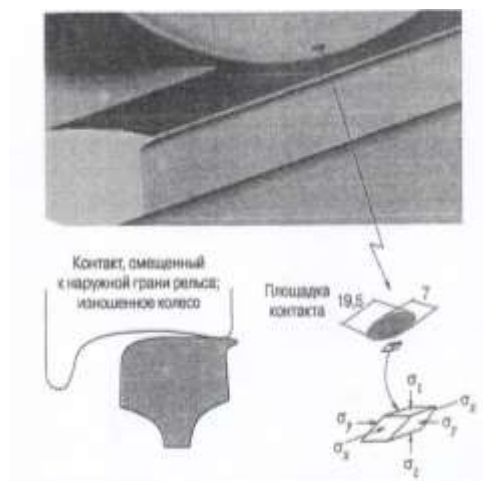


Рисунок 20 – Колесо смещено относительно рельса к его наружной грани

Анализ работ, посвященных изучению этой проблемы, показывает, что в последние годы во многих странах мира большое внимание уделяется изучению профиля поверхности катания обода при эксплуатации колеса. В то же время обоснованно утверждается, что профиль поверхности катания обода, который появляется и формируется в процессе эксплуатации, является наиболее оптимальным и поэтому его целесообразно устанавливать перед использованием колеса. Это позволит улучшить условия эксплуатации колес и значительно повысить их долговечность [85].

#### **4.2 Исследование влияния повышения твердости пары трения «колесо-рельс» на износ**

Анализ закономерностей износа изделий, образующих пары трения, показывает, что причиной износа таких сопряженных изделий, как колесо-рельс, является работа сил трения. Под действием этих сил происходят многократные деформации участков контактной поверхности, их усталость, коррозия и другие физико-химические процессы: затвердевание и размягчение, выделение тепла, микро- и субструктурные изменения. Сложность этих процессов, происходящих в зоне контакта, привела к появлению различных теорий внешнего трения и износа. Единая теория, объясняющая механизм износа в паре трения колесо-рельс, до сих пор не разработана.

Как отмечалось выше, молекулярно-механическая теория трения наиболее полно объясняет процесс изнашивания контактирующих твердых тел. Согласно этой теории, реальные контактные поверхности имеют сложный рельеф, характеризующийся шероховатостью. Из-за шероховатости контакт поверхностей происходит в отдельных точках соприкосновения, образованных от взаимного контакта микрошероховатостей или их пластического смятия. Взаимодействие поверхностей скольжения в этих точках, согласно молекулярно-механической теории, имеет двойственную природу: деформацию и адгезию [9, с. 187; 86].

Молекулярно-деформационное взаимодействие обусловлено многократной деформацией микрообъемов поверхностного слоя внедренными неровностями, что может привести к микрорезанию не только неровностями, но и инородными твердыми частицами.

Молекулярно-адгезионное взаимодействие связано с образованием поверхностного схватывания металла в местах контакта, сопровождающегося схватыванием (заклиниванием), то есть глубоким вытягиванием металлических частиц.

Как микрорезание при молекулярной деформации, так и схватывание при молекулярно-адгезионном взаимодействии являются неприемлемыми механизмами износа, так как вызывают интенсивное разрушение поверхностного слоя. Оценка износостойкости сталей в условиях сухого трения основана на прочности поверхностного слоя металла. Повышение прочности и твердости направлено на сдерживание пластической деформации и развития усталостных процессов, а также устранение микрорезания поверхностей

трения, обеспечение по возможности не пластической, а упругой деформации контактных зон. Высокая твердость поверхности также необходима для того, чтобы затруднить износ контактных поверхностей при их скольжении.

Отсутствие единой теории, объясняющей механизм износа, и большое количество факторов, одновременно влияющих на сложные процессы износа колес и рельсов, привели к гипотезе, что основной причиной интенсивного износа и значительного сокращения срока службы колесных пар является нарушение оптимального соотношения твердости между колесами и рельсами. В связи с этим следует отметить, что во избежание нежелательного переноса основной составляющей износа на один из элементов колесной или рельсовой пары трения не следует допускать чрезмерного зазора по твердости между этими сопряженными элементами. Практика показывает, что не существует жестко установленного оптимального соотношения твердости колес и рельсов (обязательное равенство их твердости, обязательное превышение твердости одного из элементов над твердостью другого на жестко фиксированный процент и т.) [87, 88].

На основании специально разработанных лабораторных испытаний образцов роликов с учетом проскальзывания 2% было установлено значение этого коэффициента не менее 1,2 (превышение твердости колес на 20% по сравнению с рельсами). Однако результаты этих испытаний, проведенных с целью определения требуемого соотношения пары трения колесо-рельс и предложенное представление о причинах интенсивного износа колесных пар (нарушение требуемого соотношения твердости), плохо согласуются с практикой работы в реальных условиях эксплуатации. Поэтому в настоящее время вопрос о соотношении твердости пары трения «колесо-рельс» является предметом оживленной дискуссии среди исследователей и производителей, и продолжаются споры об оптимальном уровне твердости колеса и рельса.

В связи с этим следует отметить, что в реальных условиях эксплуатации трудно получить прямые экспериментальные данные о влиянии повышения твердости рельсов на износ колес. Поэтому в данной работе в лабораторных условиях изучалось влияние твердости колес и рельсов на износостойкость. Конечной целью этих исследований является выбор необходимого соотношения твердости рельса к износу колеса при различных степенях проскальзывания.

Для испытания на износ использовалась машина МИ, на которой пара цилиндрических роликовых образцов может быть испытана при трении качения с различным принудительным проскальзыванием. Схема испытаний на деформацию цилиндрических роликов с принудительным проскальзыванием приведена в разделе «Методика проведения исследований». Износостойкость исследовали на роликовых образцах диаметром 40 мм и шириной 10 мм, вырезанных из секций термообработанного рельса методом объемной закалки в масле при температуре  $\sim 850^{\circ}\text{C}$ . Твердость после термообработки составляет 351-378 НВ. Микроструктура упрочненного слоя представляет собой тонкопластинчатый сорбит, который переходит в исходный пластинчатый

перлит. Отметим, что преимуществом такой термообработки является наличие сжимающих остаточных напряжений на поверхности головки рельса, которые повышают контактную усталостную прочность. Режим испытания на износ: давление (нагрузка) между образцами 70 кг, скорость вращения вала 500 об/мин. Скольжение роликовых образцов составляет 0,5; 0,9 и 13%. В качестве противовеса использовались ролики из колесной стали.

Износостойкость определяли путем взвешивания массы образца до и после испытания. Мерой износа служила потеря массы образца, для чего образец взвешивали до и после испытания с точностью 0,0002 г. После тщательного протирания войлоком с бензином, затем с техническим спиртом. Потеря массы  $g \cdot m^2 / ч$ , где  $g$  – потеря массы в граммах,  $m^2$  – поверхность износа;  $ч$  – время износа.

Результаты экспериментальных исследований повышения твердости пары трения «колесо-рельс» на износ представлены в таблице 13.

Таблица 13 – Влияние повышения твердости пары колесо-рельс на износ

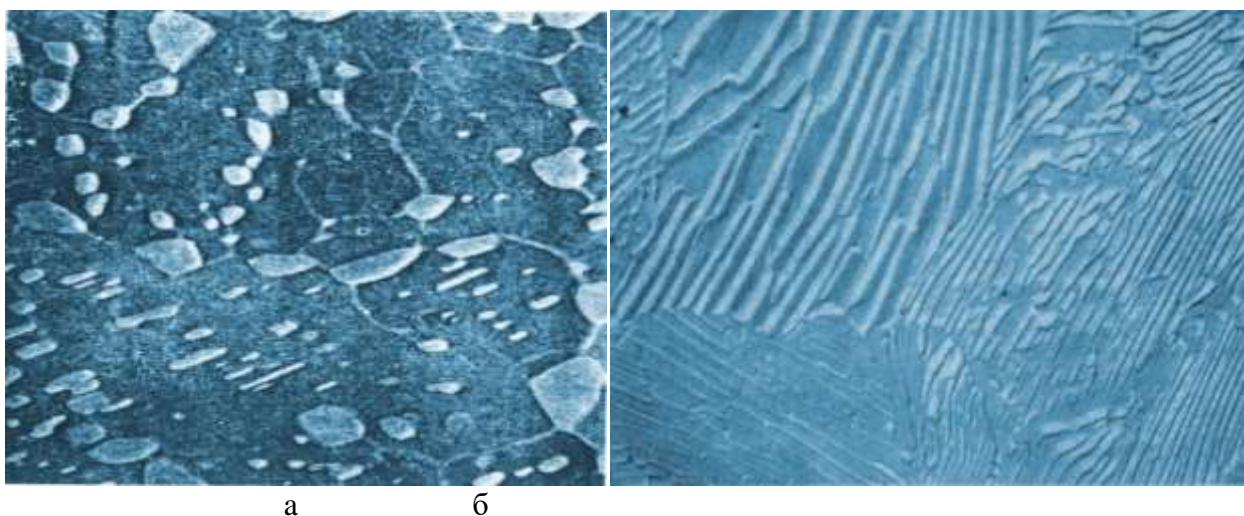
Средняя твердость пары колесо-рельс	Износ		
	рельса	колеса	суммарный
Низкая (менее 250 НВ)	Уменьшается	Увеличивается	Постоянное
Средняя (250-350 НВ)	Уменьшается	Неменяется	Уменьшается
Высокая (более 350 НВ)	Уменьшается	Уменьшается	Уменьшается

Как видно из таблицы 13, при различной средней твердости пары колесо-рельс получается сложная картина. Только при низкой средней твердости той пары (менее 250 НВ) сохраняется примерно постоянным суммарным количеством, а в зависимости от изменения твердости каждого из элементов пары основной суммы износа переносится на соответствующее контр-тело. При средней твердости пары колесо-рельс в интервалы 250-350 НВ при повышении твердости рельсов их сумма уменьшается. А количество колес почти не изменяется, что приводит к уменьшению и суммарному количеству. При высокой твердости (более 350 НВ) пары колесо-рельс увеличение твердости одного из элементов может привести не только к понижению суммарного количества, но и к уменьшению количества контр-тела (колеса). Это связано с изменением ведущего механизма суммы и заменением роли осмысления при общей поверхностной пластической деформации более твердых элементов пары колесо-рельс.

На основании этих сравнительных испытаний можно сделать вывод, что для снижения износа необходимо увеличить твердость колес и рельсов более чем на 350 НВ. Эти результаты хорошо согласуются с практическими данными, которые показывают, что увеличение твердости рельсов с 260 до 350 НВ не вызывало интенсификации подрезки колес и способствовало повышению износостойкости рельсов [89, 90].

Исследования структуры и свойств термоупрочненных рельсовых сталей показывают обоснованность утверждения о том, что наряду с внешними факторами (степень проскальзывания определяется углом залегания и коэффициентом трения) существенное влияние на процессы износа оказывают внутренние факторы (в частности, структура).

Сравнительные исследования свойств, полученных в результате однократной и двойной термообработки, выявили преимущества структуры закалочного сорбита, который образуется при однократной термообработке (закалке), по сравнению с закалочным сорбитом (образующимся после двойной термообработки, состоящей из закалки + отпуска). При одинаковой твердости закалочный сорбит обеспечивает лучшие механические и эксплуатационные свойства: более высокую износостойкость, большую разницу между пределом прочности— $\sigma_b$  и пределом текучести— $\sigma_T$ , более высокую способность к затвердеванию при закалке и большую контактную выносливость. Несмотря на то, что закалочный сорбит обладает меньшей ударной прочностью по сравнению с закалочным сорбитом, структура закалочного сорбита является предпочтительной. Особенности свойств этой структуры по сравнению со свойствами сорбита определяются их различием в форме частиц цементита, рисунка 21, в закалочном сорбите частицы цементита имеют пластинчатую структуру (рисунок 21 б), в то время как в закалочном сорбите они имеют зернистую структуру (рисунок 21 а).



а – сорбит отпуска с зернистым цементитом; б – сорбит закалки с пластинчатым цементитом

Рисунок 21 – Структуры сорбита отпуска и сорбита закалки в углеродистой стали, х 5000

Большее временное сопротивление –  $\sigma_b$  закалочного сорбита, имеющего пластинчатую структуру, по сравнению с отпускным сорбитом свидетельствует о большей способности упрочнять пластинчатые структуры в процессе пластической деформации. Это связано с тем, что цементитные пластины, являясь эффективным источником дислокаций, способствуют формированию

более развитой ферритовой субструктуры. Этим же обстоятельством можно объяснить и большую износостойкость закалочного сорбита по сравнению с отпускным сорбитом. Более низкий предел текучести –  $\sigma_T$  у образцов с пластинчатым цементом свидетельствует о том, что пластическая деформация в закалочном сорбите начинается при более низких значениях деформирующих напряжений. Это приводит к большей глубине распространения заклепки при контактном нагружении и положительно влияет на повышение контактной усталостной прочности рельсовой и колесной стали [91-93].

Таким образом, на основании проведенных сравнительных испытаний можно сделать вывод, что для снижения износа в паре трения колесо-рельс необходимо увеличить твердость колес и рельсов более чем на 350 НВ. В то же время остается открытым вопрос о том, каким должен быть диапазон твердости колеса и рельса, к чему следует стремиться при плазменно-термической обработке этих взаимодействующих пар. Поэтому на третьем этапе работы были проведены специальные исследования по выбору оптимального диапазона твердости в паре трения колесо-рельс, обеспечивающего минимальный износ.

#### **4.3 Определение оптимального соотношения твердости колеса и рельса, снижающего интенсивность износа**

С целью определения оптимального диапазона твердости упрочненного слоя поверхности качения обода колеса, обеспечивающего повышение износостойкости, исследованы различные варианты твердости пары трения колесо-рельс. Твердость колеса на поверхности и в глубине составляет 280-290 НВ, а твердость рельсов Р65 по их длине и глубине – 330-400 НВ. После укладки рельсов в колею, за счет пластической деформации поверхностного слоя металла головки рельса, твердость рельса возрастает до 420-480 НВ, т.е. отношение твердости рельса к твердости колеса составляет 1,5-1,65. Это свидетельствует о том, что вследствие упрочнения при пластической деформации твердость поверхностного слоя рельса значительно превышает твердость обода колеса.

Таким образом, в паре трения «колесо-рельс» приближается определенная диспропорция, что отрицательно сказывается как на износ колес, так и на износ рельсов. Поэтому для исследования слияния твердости колес и рельсов на величину пары трения «металл колеса– металл рельса» были проведены специальные лабораторные испытания. На машине типа МИ – 1МУ по схеме «вращающееся кольцо-неподвижная колодка» в масляно-абразивной среде в условиях сухого трения «металл по металлу» проводились испытания на величину износа. Твердость форм колес варьировалась от  $259V_k$  до  $950 HV_B V_k$ . В качестве контр-тела использовались образцы рельсовой стали Р65, твердость которых находилась в интервале  $445-468 HV_p$ . Глубина упрочненного слоя для образцов была определена как 1 мм. При этом выбраны указанные в таблице 7 коэффициенты твердости пары «колесо-рельс», которые можно получить в реальных условиях эксплуатации подвижного состава, что

приближает лабораторные испытания к производственному и имеет важное практическое значение.

Таблица 14 – Влияние соотношения твердости колеса и рельса на износостойкость пары «металл колеса – металл рельса»

№ варианта	Твердость колеса $HV_k$	Твердость рельса, $HV_p$	Соотношение твердости, $HV_k/HV_p$	Износ образцов, мм
1	259	467	0,55	76(исх. состояние)
2	275	454	0,60	60
3	478	465	1,03	51
4	551	445	1,24	34
5	652	459	1,42	20
6	779	452	1,72	13
7	875	468	1,87	10
8	950	455	2,09	5

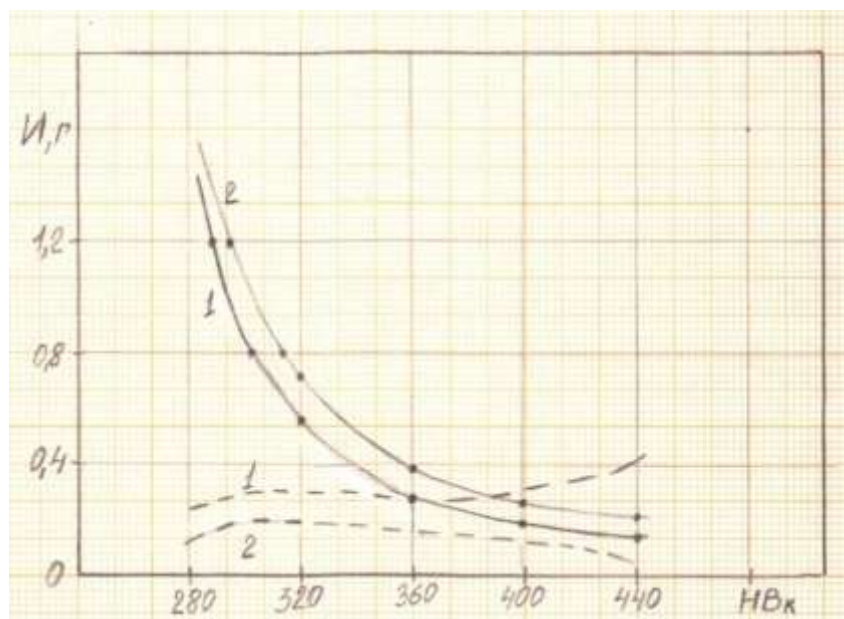
Из данных таблицы 14 видно, что оптимальный диапазон твердости колеса находится в пределах интервала  $HV$  551-875, т.е. наилучшее соотношение  $HV_k/HV_p$  находится в пределах 1,24-1,87. Увеличение твердости колеса выше  $950HV$  в реальных условиях эксплуатации может привести к сколу закаленного слоя и растрескиванию, а также к интенсивному износу рельса. Закалка обода колеса и гребней до низкой твердости 259-478  $HV$  неэффективна, так как износостойкость немного повышается.

С целью определения оптимального соотношения твердости колеса и рельса, которое приводит к значительному снижению скорости изнашивания трущихся поверхностей, была исследована износостойкость при трении качения со скольжением без смазки, соответствующая условиям эксплуатации этой пары в эксплуатации. Испытания на износ проводились на станке СМЦ-2 при скорости вращения роликов 36 м/мин (диаметр 40 мм), постоянном скольжении 10% и контактном давлении 6300 кгс/см<sup>2</sup>. Износ оценивался по потере веса роликов. Образцы были изготовлены из поверхностных слоев обода колеса и головки рельса. Химический состав исследуемых сталей совпадал соответствующим нормативам (таблица 15).

Таблица 15 – Химический состав исследуемых сталей

Сталь	C	Mn	Si	P	S
Колесная	0,64	0,58	0,34	0,008	0,020
Рельсовая	0,81	0,95	0,26	0,022	0,035

Образцы подвергали термообработке по режиму: закалка при температуре 850-870°C в воде, нагретой до 35°C, и отпуск до твердости 250-450  $HV$  с получением сорбита с зернистой структурой карбидов. Результаты испытаний на износ пары трения «колесо-рель» приведены на рисунке 22.



1 – 350HB; 2 – 450 HB

Рисунок 22 – Износ образцов из колесной стали (сплошные линии) и рельсовой (штриховые) стали при твердости рельсовых образцов

Отметим, что такой же характер зависимости износа был получен при испытании образцов колесной стали твердостью от 250 до 450 HB с твердостью рельсовой стали 350 и 450 HB, имевших структуру закалочного сорбита с пластинчатой структурой карбидов. Разница лишь в величине износа: структуры закалочного сорбита с пластинчатой структурой карбидной фазы более износостойки (рисунок 23).

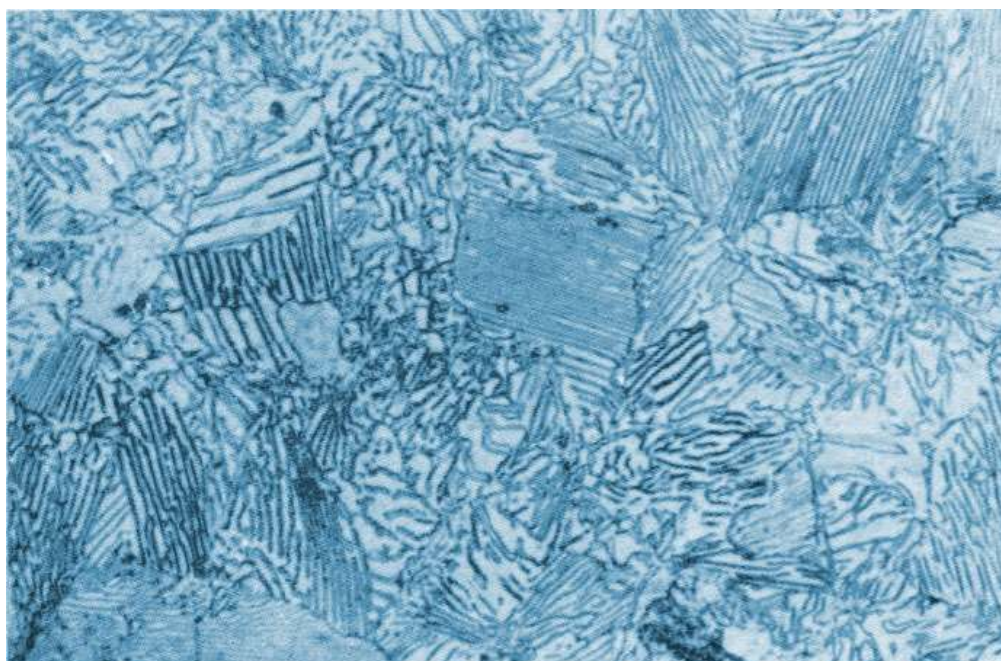


Рисунок 23 – Сорбит закалки с пластинчатым строением цементита в стали с 0,75% C ( $Fe_3C$ ) x500



Рассмотрение взаимного влияния твердости образцов рельса и колеса на износ пары трения «колесо-рельс» показывает, что увеличение твердости колесной стали более 360 НВ не влияет на износ образцов рельса с твердостью 450 НВ. В случае образцов рельсов с твердостью 350 НВ износ заметно увеличивается. При увеличении твердости образцов рельсов с 350 НВ до 450 НВ износ колесной стали увеличивается примерно на 10-15% независимо от ее твердости. Как видно из рисунка 23, увеличение твердости колесной стали приводит к увеличению ее износостойкости, причем наибольшая износостойкость наблюдается при увеличении твердости образцов до 330-340 НВ. Далее снижение кривой износостойкости происходит менее активно и остается практически на том же уровне.

Испытания на износ показывают, что повышение твердости рельсовой стали до 450 НВ приводит к увеличению износа колесной стали. Для того чтобы получить износостойкость колес при твердости рельсовой стали 450 НВ такую же, как при твердости рельсов 350 НВ, твердость колесной стали следует повысить с 280-300 НВ до 290-310 НВ. Наибольшая износостойкость колес, независимо от твердости рельсов, обеспечивается при твердости колесной стали не менее 320 НВ, поэтому оптимальная твердость по износостойкости составляет 320-350 НВ.

Таким образом, если критерий оценки эксплуатационных характеристик колес и рельсов основан на значениях твердости стали, то для колес она должна быть в 1,2-1,4 раза выше.

Как известно, контактная прочность колесной стали во многом определяется содержанием углерода, который обеспечивает наибольшее количество карбидной фазы, а также размером зерен. В связи с этим были проведены испытания колесных сталей с различным содержанием углерода (0,55; 0,65; 0,75%). Образцы вырезали из обода колеса на расстоянии 10 мм от поверхности катания. Испытания показали, что увеличение содержания углерода с 0,55% до 0,75% положительно влияет на стойкость колесной стали против усталостного скола. Сталь с 0,75% С обладает наилучшей стойкостью к контактному повреждению [94].

#### **4.4 Влияние внутренних факторов на износостойкость**

Износостойкость колесной стали, помимо внешних факторов (угол залегания колеса на рельс, смазка, абразив со смазкой, шероховатость поверхности), во многом зависит от внутренних факторов. На основании проведенных экспериментальных исследований можно отметить, что наибольшее влияние на износостойкость колесной стали оказывают следующие внутренние факторы: твердость; содержание углерода в стали; микроструктура и содержание серы. Можно кратко рассмотреть влияние этих факторов:

а) влияние твердости:

В настоящее время нет однозначного ответа на вопрос о влиянии твердости на износостойкость элементов пары трения «колесо-рельс». Выше отмечалось, что увеличение твердости одного элемента приводит к

уменьшению его износа и увеличению износа другого элемента. Краузе Г., Шольтен О. отмечают, что увеличение твердости одного из элементов попарно приводит к уменьшению износа обоих элементов. Специалисты ВНИИЖТ утверждают, что увеличение твердости колеса практически не влияет на износостойкость рельса. Данные об оптимальном соотношении твердости пары трения «колесо-рельс» в литературе также противоречивы. В работе Т.В. Ларина указано, что твердость колес должна быть в 1,2-1,4 раза выше твердости рельсов, а в ряде работ рекомендуется, наоборот, твердость колес принимать равной 320-350 НВ, рельсов 350-450 НВ, т.е. твердость колес должна быть в 1,1-1,28 раза меньше, чем рельсов. На наш взгляд, это противоречие можно объяснить различием методов и условий испытаний. Например, в некоторых экспериментах [95] испытания проводились с проскальзыванием менее 1%, а в других [96] – с проскальзыванием 10%. По-видимому, тенденцию к повышению твердости как рельсов, так и колес с целью борьбы с износом в пределах не менее 400-450 НВ следует признать прогрессивной. Во избежание нежелательного переноса основной составляющей износа на один из элементов пары (колесо или рельс) не следует допускать чрезмерного зазора в твердости между этими сопряженными элементами. На наш взгляд, не существует жестко установленного оптимального соотношения твердости колес и рельсов в виде обязательного равенства их твердости или обязательного превышения твердости одного из элементов на жестко фиксированный процент и т.д. Наши эксперименты и данные других исследователей показывают, что достаточно хорошие результаты по износостойкости можно получить, доведя их твердость до 380-420 НВ [97].

Это относится как к колесам, так и к рельсам. Отметим, что такая твердость должна быть получена на достаточно большой глубине, определяемой допустимыми нормами износа колес и рельсов, что связано с решением ряда технологических задач (прокаливаемость стали, глубина закалки, режущая способность при переточках и др.);

б) влияние содержания углерода:

Хорошо известно, что на износостойкость перлитных сталей существенное влияние оказывает количество карбидов в стали, линейно связанное с содержанием углерода. Известно также, что с увеличением содержания углерода сопротивление пластической деформации возрастает за счет уменьшения расстояния между твердосплавными частицами. Поскольку износостойкость связана с устойчивостью к пластической деформации, можно ожидать увеличения износостойкости с увеличением содержания углерода.

Как отмечалось выше, в наших экспериментах на углеродистой колесной стали с различным содержанием углерода (0,55; 0,65; 0,75%) отчетливо наблюдается положительное влияние содержания углерода на износостойкость. В работе [98] отмечена крайняя зависимость износостойкости от содержания углерода и указано, что максимальной износостойкостью обладают стали с содержанием 0,63-0,66% С при том же уровне твердости.

Коррелирует с данными по износостойкости и характеру изменения глубины пластической деформации. Авторы приходят к выводу, что стойкость колесной стали к износу, а также к пластической деформации определяется основными параметрами ее структуры: величиной межпластинчатого расстояния в перлите, количеством структурно свободного феррита и толщиной цементитных пластин (рисунок 24).

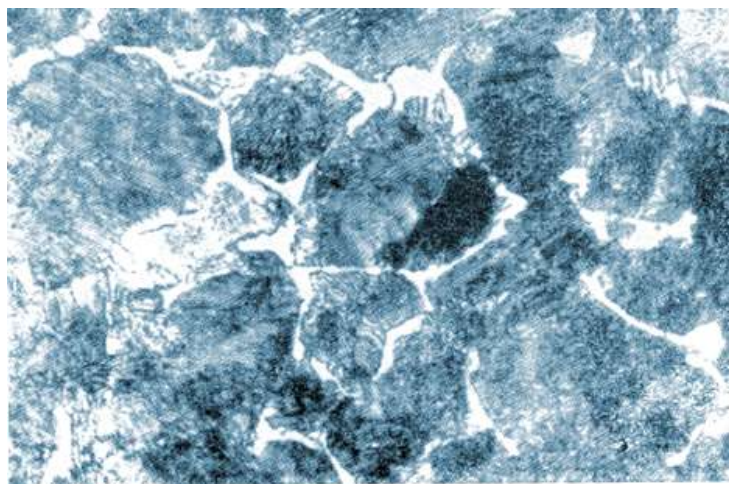
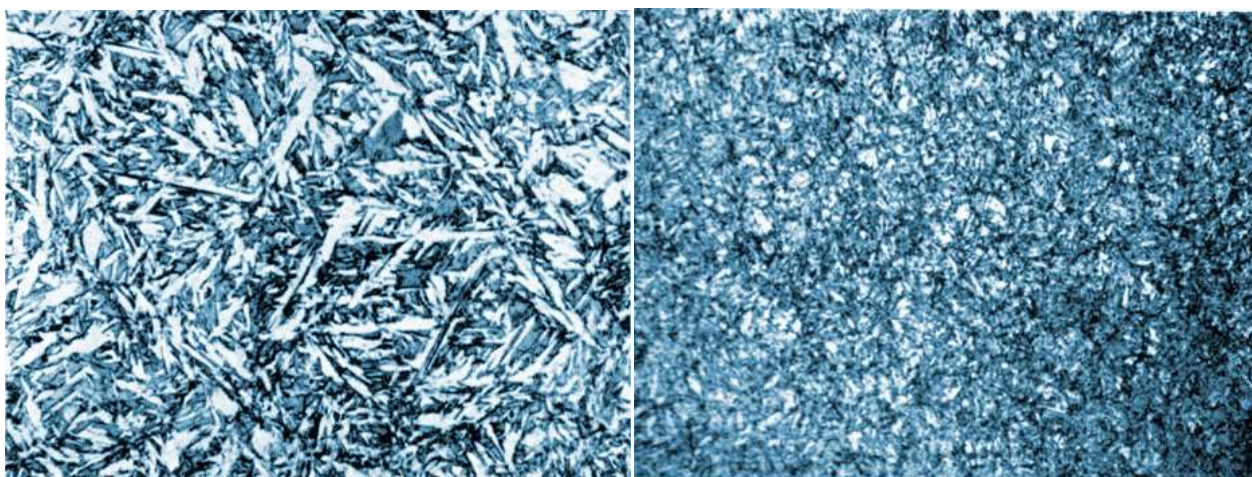


Рисунок 24 – Ферритная сетка вокруг перлитных колоний в стали с 0,57% С, отрицательно влияющая на ударную вязкость

Как известно, величина межпластинчатого расстояния –  $\Delta$  показывает степень дисперсности структуры и определяется количеством и степенью переохлаждения аустенитных зерен: чем больше степень переохлаждения, тем меньше межпластинчатое расстояние и тем больше твердость стали. Так, углеродистая сталь с 0,53-0,65% С  $\Delta_c=0,2-0,5$  мкм;  $\Delta_c=0,5-0,25$  мкм;  $\Delta_T=0,25-0,10$  мкм;

в) влияние микроструктуры:

При различных способах термической обработки колес вблизи поверхности прокатки формируются структуры закалочного сорбита ( $\Phi+\text{Ц}_{\text{пл.}}$ ) с пластинчатой формой карбидов (цементит) и отпускного сорбита ( $\Phi+\text{Ц}_{\text{пл.}}$ ) с зернистой формой карбидов (цементит). Экспериментальные данные по изучению влияния формы карбидов на износостойкость колесной стали показывают, что при одинаковом уровне прочности ( $\sigma_b = 1300$  МПа) износ колесной стали с пластинчатой формой карбидов составляет 350 мг, а с зернистой формой карбидов – 470 мг, т.е. увеличение износостойкости на % (рисунок 25).



а

б

а – после закалки; б – после закалки +отпуска; x500

Рисунок 25 – Структура стали после закалки с температуры 970°С

Светлые иглы представляют собой мартенситные пластины, а серые области между ними – остаточный аустенит. После закалки и отпуска образуется отпускной троостит с зернистой формой карбидов.

Схожее влияние формы карбидной фазы на износостойкость отмечено в работах [71, с. 313; 99], и показано, что с увеличением твердости, как в пластинчатой, так и в гранулированной форме карбидов, износостойкость возрастает.

### Выводы по четвертому разделу

1. Показано, что оптимальный диапазон твердости колес находится в диапазоне 554-877 HV, а соотношение  $HV_k / HV_p$  – в диапазоне 1,22-1,86. Из проведенных экспериментальных исследований следует, что повышение твердости выше 900-950 HV в реальных условиях эксплуатации может привести к растрескиванию и сколу упрочненного слоя, а также к интенсивному износу рельса. Закалка гребней колес до низкой твердости 277-481 малоэффективна, так как износостойкость повышается незначительно.

2. Сравнительные исследования свойств, полученных в результате однократной и двойной термообработки, выявили преимущества структуры закалочного сорбита, который образуется при однократной термообработке (закалке), по сравнению с закалочным сорбитом (образующимся после двойной термообработки, состоящей из закалки + отпуска). Установлено, что при одинаковой твердости закалочный сорбит обеспечивает наилучшие механические и эксплуатационные свойства: более высокую износостойкость, большую разницу между пределом прочности- $\sigma_B$  и пределом текучести- $\sigma_T$ , более высокую способность к упрочнению при закалке и большую контактную выносливость.

3. Осциллография процесса разрушения и фрактографические исследования трещин образцов показывают принципиальную разницу между

характером разрушения закаленных образцов и незатвердевшего металла колеса.

Образец колеса, не имеющий упрочненного слоя, разрушается по всему поперечному сечению и процесс разрушения протекает в две стадии-зарождение трещины и ее распространение до полного разрушения образца. В случае плазменного упрочнения трещина возникает на поверхности упрочненного слоя и растет на глубину, где она останавливается на границе с исходным мягким металлом, так как дальнейшее распространение требует гораздо большей силы, чем зарождение в упрочненном слое.

4. Экспериментальным исследованием износостойкости при трении качения со скольжением без смазки установлено, что увеличение твердости *рельсовой* стали с 350 НВ до 450 НВ увеличивает износ *колесной* стали на 10-15% и значительно снижает ее контактную долговечности в исследуемом диапазоне твердости колесной стали 250-400 НВ. Повышение твердости колесной стали с 250 НВ до 400 НВ практически не влияет на износостойкость и контактную долговечность *рельсовой* стали.

5. При работе с рельсом твердостью 450 НВ необходимый уровень износостойкости и контактной прочности углеродистой колесной стали может быть обеспечен при ее твердости 350-400 НВ. Колесные стали с твердостью 400 НВ и структурой закалочного сорбита обладают наилучшей контактной прочностью при испытании пары трения колесо-рельс со скольжением без смазки.

## 5 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ В СОЧЕТАНИИ С ОБЪЕМНОЙ ЗАКАЛКОЙ НА ИЗНОСО И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ

### 5.1 Сравнительное исследование влияния способов объемно-термической обработки на механические свойства колес

Цельнокатаные колеса, являясь частью ответственного назначения, работают в сложных условиях высоких циклических нагрузок в элементах колеса (диск, ступица и обод), значительного нагрева контактных зон при торможении и возникновения высоких напряжений. Поэтому колеса должны обладать высокой конструктивной прочностью, то есть комплексом свойств, гарантирующих безопасность движения поездов и длительный срок службы.

Для сравнительного изучения методов и режимов термического упрочнения обода и всех колесных элементов были использованы два наиболее распространенных метода термического упрочнения цельнокатаных колес: закалка поверхности качения обода колеса и закалка всех колесных элементов (диска, ступицы и обода) интенсивным и контролируемым охлаждением.

Цельнокатаные колеса из углеродистой стали марки 2, химический состав которой приведен в таблице 16 (ГОСТ 10791-2011), подвергались термическому упрочнению.

Таблица 16 – Химический состав колесных сталей (%)

C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Cu
0,650	0,810	0,340	0,015	0,018	0,19	0,21	0,15

Механические свойства стали колесных дисков, подвергнутых упрочняющей термообработке ( $\sigma$ ,  $\delta$ ,  $\Psi$ ) по ГОСТ 1497-94 (ИСО 6892-84), определяли на образце диаметром 15 мм с расчетной длиной 60 мм, ударную прочность–*KCU* на образцах типа 1 по ГОСТ 9454-78, твердость–*HV* по ГОСТ 9012-59 (ИСО 6506-81) с диаметром шарика 10 мм при нагрузке 29430 Н (таблица 17).

Таблица 17 – Механические свойства колесной стали

$\sigma_v$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\delta$ , %	$\Psi$ , %	<i>KCU</i> , Дж/см <sup>2</sup>	<i>HV</i> на глубине 30 мм	<i>HV</i> гребня
1105	10,5	22,0	0,34	275	290

Исследованы микроструктура образцов, глубина упрочненного слоя, параметры механических свойств и распределение твердости (микротвердости) по поперечному сечению. Микрошлифы для исследования готовили по стандартной методике, исключая возможное нарушение исходной

микроструктуры.

Микроскопические исследования проводили на оптическом микроскопе Axio Observer D1m Carl Zeiss при увеличении  $\times 200$  на микрошлифах, вырезанных в поперечном направлении из сегмента с условием сохранения затвердевшего слоя. Прочностные и пластические характеристики определяли на испытательной установке «Инстрон», предварительно подготовив образцы по ГОСТ 1497-94. Отдельные механические испытания дублировались методом неразрушающего контроля образцов из готовых профилей с помощью феррозондового коэрциметра КИФМ-1, испытание которого основано на принципе устойчивых корреляций между механическими и магнитными ( $\sigma_b$ , НВ и коэрцитивная сила) характеристиками проката.

Для исследования износостойкости и стойкости контактной поверхности к усталостному сколу образцы вырезали из слоев, расположенных на глубине 15, 30, 45 и 60 мм от поверхности прокатки. Упрочнение всех элементов колеса с дифференцированным объемным упрочнением значительно повышает весь комплекс свойств обода, диска и ступицы. Отметим, что объемное упрочнение цельнокатаных колес погружением в масло, описанное в ряде работ, имеет ряд недостатков.

Из-за разницы в поперечных сечениях и в отношении размера поверхности к объему металла в ободе, диске и ступице при закалке в масле эти колесные элементы охлаждаются с разной скоростью: при максимальной скорости охлаждается диск, а при значительно меньшей скорости охлаждаются обод и ступица. Это приводит к сильному затвердеванию диска. В то же время условия эксплуатации цельнокатаных колес требуют такой степени упрочнения поверхности качения обода, которая обеспечивала бы значительное повышение износостойкости и усталостной стойкости. Поэтому охлаждающее устройство должно регулировать скорость охлаждения таким образом, чтобы, с одной стороны, оно более глубоко укрепляло обод колеса и, с другой стороны, чтобы избежать возникновения больших остаточных напряжений, оно не создавало больших различий в скорости охлаждения обода, ступицы и диска.

Прочность конструкции колеса во многом определяется длительной и надежной эксплуатацией его дисковой части, которая испытывает совокупное воздействие вышеуказанных нагрузок в критических сечениях (переход диска на обод и ступицу). С учетом этих условий исследования проводились путем дифференцированного упрочнения всех элементов колеса. Охлаждающая вода подается на все элементы колеса через распылительные устройства [100, 101].

Такая закалка имеет значительные преимущества перед закалкой только поверхности качения обода колеса. Благодаря трехстороннему отводу тепла от обода значительно укрепляются его внутренние слои и боковые грани, увеличивается глубина упрочнения, повышается износостойкость и усталостная стойкость. При этом можно самостоятельно регулировать скорости охлаждения обода, диска и ступицы, что создает необходимые условия для получения минимального уровня остаточных напряжений и коробления. Закалку поверхности качения обода колеса проводили путем распыления на нее воды из

форсунок (распылителя) кольцевого охлаждающего устройства с последующим отпуском при температуре 480-500°C. Для сравнения структуры и механических свойств образцов, закаленных по такой технологии термообработки, термически упрочняли только поверхность катания колеса распылительным охлаждением (рисунок 26).

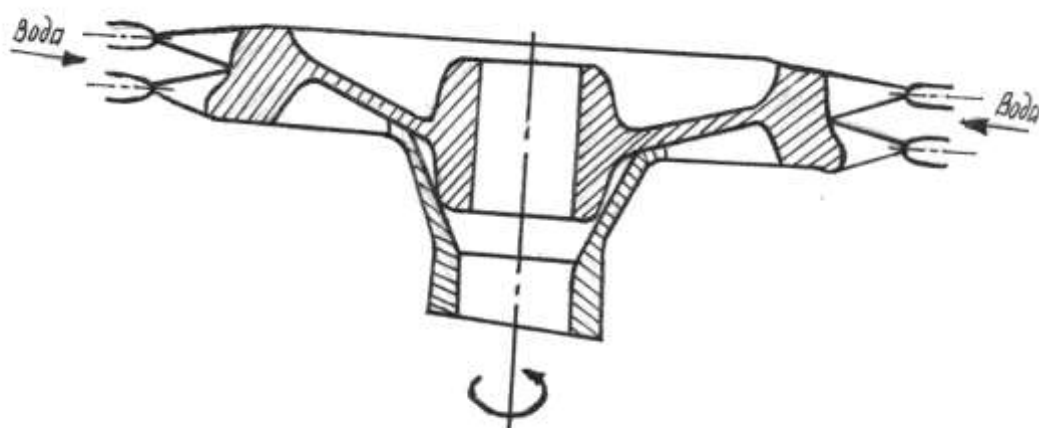


Рисунок 26 – Схема закалки поверхности катания обода колеса

В этом случае колесо устанавливается в горизонтальном положении и приводится в движение электродвигателем. Из охлаждающих сопел на поверхность качения вращающегося колеса распыляется техническая вода с температурой 30-35°C. Обратите внимание, что на горизонтальном закалочном столе обод колеса находится в контакте (распыляется) с водой в течение всего времени закалки.

Экспериментальные исследования, подтвержденные практикой, показывают, что повышение ездовой прочности *только обода колеса* имеет ряд существенных недостатков:

1) большой температурный градиент, возникающий при упрочнении только обода колеса, приводит к значительному количеству остаточных напряжений, вызывающих низкую прочность конструкции колес при ударном нагружении, а также к значительному короблению колес (0,6-1,2 мм);

2) наличие больших остаточных растягивающих напряжений в цельнокатаном колесе снижает их надежность за счет снижения сопротивления возникновению и распространению трещин на поверхности обода прокатки;

3) закалка только поверхности прокатных колес приводит к образованию на глубине до 10 мм от поверхности продуктов мартенситного отпуска с гранулированными карбидами, которые обладают меньшей износостойкостью и контактной прочностью, чем продукты разложения аустенита с пластинчатой структурой карбидной фазы.

На рисунке 27 показана схема регулируемой закалки всех элементов колеса. С помощью этого процесса упрочнения можно регулировать скорость охлаждения, что исключает большие различия в скорости охлаждения обода,



ступицы и диска и обеспечивает необходимую структуру и заданный набор эксплуатационных свойств у колес различного химического состава.

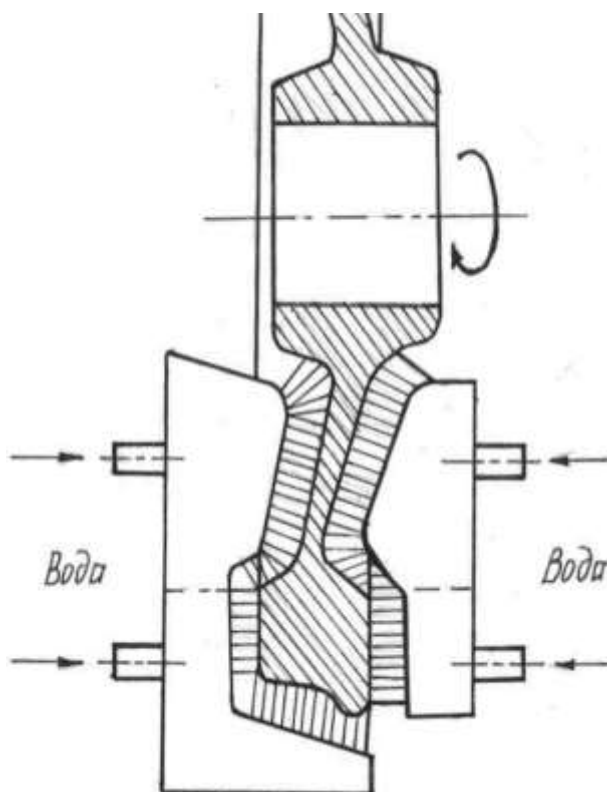


Рисунок 27 – Схема регулируемого упрочнения всех элементов колеса через спрейерные устройства

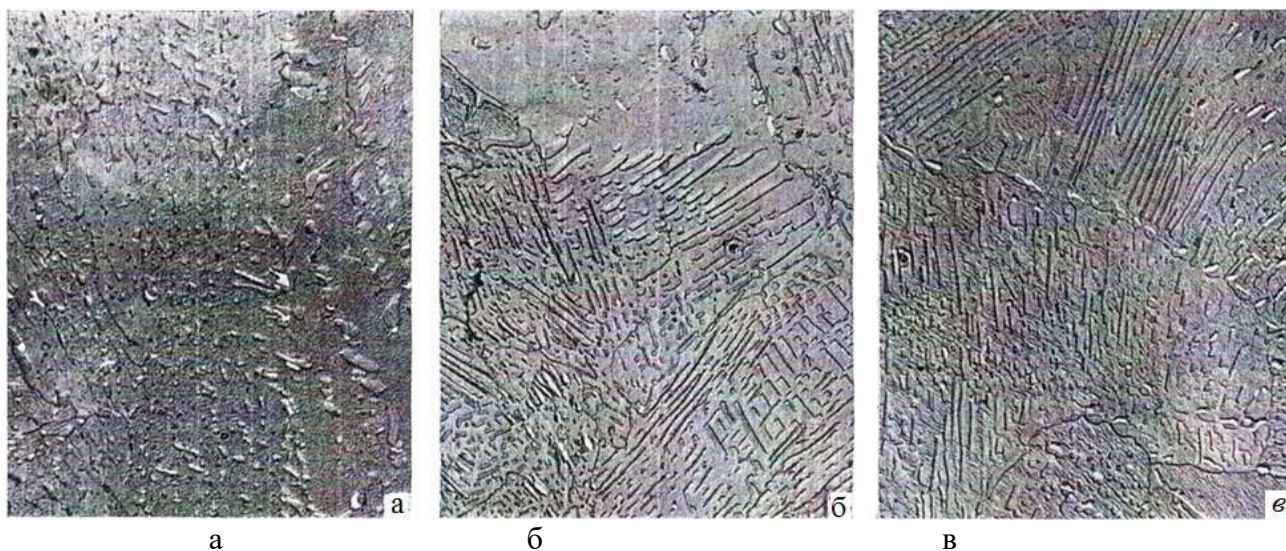
Результаты испытаний на износостойкость образцов, вырезанных слоями из ободьев колес из стали с 0,65–С и термообработанных с интенсивным охлаждением, приведены в таблице 18.

Таблица 18 – Изменение сопротивления смятию, износа и твердости обода колеса, термообработанных интенсивным охлаждением

Содержание углерода, %	Вид термической обработки	Расстояние от поверхности, мм	Сопротивление смятию, мм	Износ, Г	Твердость по Бринеллю
0,65	Закалка обода колеса интенсивным охлаждением	15	0,34	0,51	325
		30	0,41	0,72	313
		45	0,48	0,71	300
		60	0,53	0,82	294

Из приведенных выше данных также видно, что по мере удаления от поверхности катания сопротивление смятию (расширению) слоев обода и износу незначительно возрастает, а твердость уменьшается. Металлографические исследования показали, что это изменение износа, сопротивления смятию и твердости слоев обода обуславливается типом

структур, которые образуются в процессе охлаждения. При закалке круга распылительным охлаждением почти во всех рабочих слоях образуются высокодисперсные пластинчатые продукты разложения аустенита (рисунок 28). Поскольку скорости охлаждения ободковых слоев различаются незначительно, степень дисперсности продуктов разложения аустенита практически не уменьшается в нижележащих слоях (15 и 30 мм) и только в слоях 45 и 60 мм начинает уменьшаться. Это приводит к тому, что твердость, износостойкость и сопротивление расширению существенно изменяются только начиная с глубины 45 мм и практически не влияют на срок службы колеса [102, 103].



а – на глубине 5 мм; б – на глубине 15 мм; в – на глубине 30 мм

Рисунок 28 – Электронные микрофотографии структур колесной стали в различных слоях от поверхности катания, термически обработанного спреерным охлаждением, X 1200

Для обеспечения надежности цельнокатаных колес в условиях развития железнодорожного транспорта особое значение имеют свойства материала диска. Для обоснования этого положения материал диска исследуемых колес после термической обработки подвергался исследованию на определение прочности, пластичности, твердости и ударной вязкости. Результаты проведенных исследований подтверждают значительном увеличении предела прочности при растяжении и предела текучести образцов, термообработанных дисковым упрочнением, по сравнению с образцами, подвергнутыми упрочнению только обода колеса. Из таблицы 19 следует, что при значительном упрочнении диска пластические характеристики изменяются незначительно. Это демонстрирует то, что даже при термоупрочнении сталь со структурой повышенной дисперсности обладает большей способностью противостоять накоплению повреждений в структуре металла.

Таблица 19 – Изменение механических свойств термообработанных дисков колес

Содержание углерода, %	Вид термической обработки	Механические свойства			
		$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$\delta$ , %	$\Psi$ , %
0,65	Закалка поверхности катания обода	680	480	17	32
	Закалка обода спреиейрным охлаждением	1050	820	12	37

Экспериментальные данные также свидетельствуют о повышении уровня ударной вязкости материала колес, подвергнутых термической обработке, за счет упрочнения всех элементов колес. Важной особенностью термообработки с упрочнением всех колесных элементов является не только повышение ударной вязкости диска при комнатной температуре, но и снижение порога холодного разрушения колесной стали на 20°С в закаленном состоянии. Это во многом обусловлено структурным состоянием колесной стали, как с точки зрения количества структурно свободного феррита, так и с точки зрения дисперсности продуктов разложения аустенита в ферритно-цементитную смесь. Из таблицы 20 видно, что регулируемое упрочнение диска цельнокатаных колес позволяет получить уровень ударной вязкости МДж/м<sup>2</sup> против 0,37 МДж/м<sup>2</sup> при упрочнении только обода колеса.

Таблица 20 – Изменение твердости посечению и ударной вязкости термически обработанных закалкой обода и всех элементов колеса

Содержание углерода, %	Вид термической обработки	Расстояние от поверхности катания, мм	Твердость По Бринелю	Ударная вязкость, МДж/м <sup>2</sup>
0,65	Закалка обода спреиейрным охлаждением	10	320	0,37
		25	317	
		40	311	
		55	309	
		70	290	
0,65	Закалка всех элементов колеса с интенсивным и регулируемым охлаждением	10	303	0,49
		25	302	
		40	304	
		55	298	
		70	295	

Разница в характере изменения прочностных свойств поперечного сечения обода колес, закаленного различными методами, может существенно повлиять на срок службы колес.

Как известно, в процессе эксплуатации колеса подвергаются многократной переточке. Поверхность катания колес, закаленная интенсивным и контролируемым охлаждением, сохранит свою первоначальную прочность и

твердость после переполнения. В случае колес, которые были закалены только ободом колеса, поверхность качения после каждого повторного упрочнения будет менее твердой и прочной, что ухудшит условия стойкости к износу и усталостному разрушению. Следует отметить еще одно преимущество закалки обода колеса со всех сторон. Она заключается в том, что в колесах, у которых закаляется только на поверхности качения колеса, наибольшие значения предела прочности наблюдаются в слое металла, прилегающем к поверхности качения. По мере удаления от поверхности катания предел прочности уменьшается и при этом на одинаковую величину, как в средней части обода, так и в боковых поверхностях, так как слои металла с одинаковыми значениями предела прочности расположены параллельно поверхности катания.

В случае колес, закаленных со всех сторон, высокая прочность наблюдается не только по поверхности качения, но и по боковым поверхностям. Слои металла с одинаковыми значениями предела прочности окружают обод с трех сторон. По мере удаления от трех наружных поверхностей обода прочность на растяжение уменьшается, но менее заметно, чем в колесах, где закалена только поверхность катания. В средней части обода колеса предельная прочность в случае закалки со всех сторон сохраняет более высокие значения, чем в случае закалки только поверхности катания.

Более высокая прочность и твердость на боковых поверхностях, а также в средней части обода колеса, закаленного со всех сторон, свидетельствуют о более высоких скоростях охлаждения соответствующих слоев обода колеса. Это связано с тем, что обод промывается и закаляется с трех сторон, а не с одной, как в случае закалки только поверхности катания. Высокие значения предельной прочности и твердости на боковых поверхностях обода повысят устойчивость к образованию пульсаций при эксплуатации колеса [104-106].

## **5.2 Исследование влияния плазменной обработки в сочетании с объемной закалкой на износ и трещиностойкость колес**

При использовании традиционных методов объемного упрочнения одновременное повышение как твердости рабочей поверхности, так и усталостной прочности деталей, работающих в тяжелых условиях эксплуатации, является сложной, а в некоторых случаях и невыполнимой задачей. Поэтому основное внимание в настоящее время уделяется изучению поверхностного плазменного упрочнения в сочетании с традиционной объемной термообработкой.

Так, в работе [107] показана эффективность применения поверхностного плазменного упрочнения для прокатных валков из легированной стали 9Х2МФ, имеющих последовательную объемную термообработку: закалку. Износостойкость прокатного валка при плазменном упрочнении на 20% выше, чем при объемной термообработке. Глубина плазменно-упрочненного слоя составляет 1,5 мм с микротвердостью на поверхности 8500 МПа.

С целью повышения твердости и усталостной прочности крупногабаритных деталей и изделий в настоящее время активно применяется

плазменная обработка в сочетании с предварительной объемной закалкой. При поверхностном плазменном упрочнении в объемно-упрочненных деталях и изделиях образуется *композиционный рабочий слой* с высокой износостойкостью и относительно мягкой и пластичной сердцевиной. Как отмечалось выше, однородность структуры металлических материалов, используемых в практических целях, не всегда желательна. Материалы с градиентной (неоднородной) структурой лучше соответствуют реальным условиям эксплуатации, чем с однородной [108].

Циклические воздействия напряжений, возникающих в поверхностных микрообъемах вследствие периодического контакта колеса с рельсом, способствуют образованию микротрещин на рабочей поверхности сетки. В процессе дальнейшей эксплуатации наблюдается преимущественный рост трещин в направлении приложения внешних нагрузок. При определенных условиях эти трещины могут стать основными трещинами, что приведет к разрушению изделия.

Разрушение образцов после двойной (плазменной и объемной) закалки происходит по многократному механизму торможения трещины на границе совместного отпуска за счет искривления ее траектории. Причинами торможения трещины являются переход остаточных напряжений в этой точке от сжимающих к растягивающим и высокая пластичность материала зоны отпуска по сравнению с закаленной зоной.

Поэтому одновременно с повышением износостойкости колеса необходимо обеспечить его высокую устойчивость к возникновению и распространению трещин. Для этого были проведены испытания на ударный изгиб с определением максимальной разрывной силы, определяющей трещиностойкость стали [109, 110].

Таблица 21 – Соотношение между различными показателями упрочненной зоны при плазменной обработке

Угол встречи струи с поверхностью, град.	Скорость вращения колесной пары, см/с	Глубина закалки, мм	Максимальное усилие разрушения (трещиностойкость), кН	Микро-твердость на поверхности, ГПа	Структура закаленного слоя
20	1,6	0,35	7,7	5,8	Мелкодисперсный мартенсит
30	4,6	1,75	8,1	7,9	
45	5,1	2,0	8,6	9,0	
60	4,65	1,8	8,5	8,9	Мартенсит + нижний бейнит
75	3,2	1,25	6,9	9,1	
90	2,00	1,00	6,0	9,1	

Анализ фрактографии изломов образцов показывает принципиальное отличие характера разрушения закаленных образцов от незатвердевшего металла колеса.

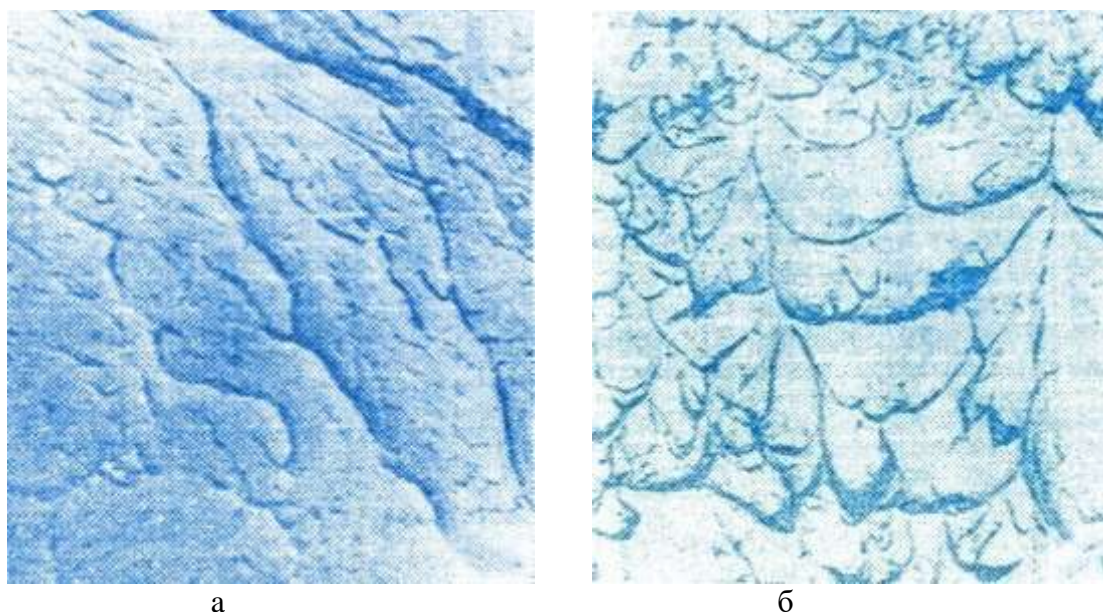
Видно, что металл колеса, не имеющий затвердевшего слоя, разрушается по всему поперечному сечению. При этом процесс разрушения протекает в две стадии – зарождение трещины и ее распространение до полного разрушения образца. Такой механизм разрушения обусловлен однородной структурой металла по всему поперечному сечению трещины, что свидетельствует об одинаковых механических свойствах металла по всему поперечному сечению. В случае плазменного упрочнения, когда металл состоит из двух слоев – упрочненного (хрупкого) и исходного (пластичного), процесс разрушения протекает по «множественному» механизму [111]. Трещина зарождается на поверхности упрочненного слоя и растет до глубины, где останавливается на границе с исходным мягким металлом, так как дальнейшее распространение требует гораздо большей силы, чем зарождение в твердом слое.

Обращает на себя внимание тот факт, что максимальное разрывное усилие (8,5 и 8,6 кН) приходится на угол встречи высокотемпературной струи с обрабатываемой поверхностью 45-60 градусов и скорость вращения колесной пары, т.е. скорости закалки, которая определяет производительность процесса, 5,1 и 4,65 см/с.

Вязкие и хрупкие трещины обычно связаны с энергоемкостью процесса разрушения во время испытания. Вязкому разрушению соответствуют высокие значения поглощенной энергии, т.е. большая работа распространения трещины. Энергоемкость хрупкого разрушения невелика и, следовательно, работа распространения трещины при хрупком разрушении также невелика.

Фрактограммы трещин подтверждают полученный характер разрушения образцов. Таким образом, плазменно-неупрочненный металл колеса характеризуется хрупкой межкристаллитной стружкой, представляющей собой систему сходящихся ступеней разрушения. Для металла колеса упрочненный сплазмой слой характеризуется вязким внутризерновым расщеплением. Размер сколотых граней (гладких поверхностей) значительно меньше по сравнению с сколотыми гранями незатвердевшего металла, что свидетельствует о высокой степени дисперсности структуры затвердевшего слоя.

На основании анализа микроструктуры трещин при больших увеличениях можно сделать вывод, что разрушение объемно-упрочненного мартенсита происходит в основном по механизму расщепления на границах исходного аустенитного зерна. Этому способствует сегрегация охрупчивающих включений (карбидов, сульфидов, нитридов) на этих границах, так как границы зерен с выделяющимися на них примесями представляют собой энергетически более благоприятный путь движения трещины. Поэтому межзеренной излом всегда хрупок как показано на рисунке 29.



а – хрупкий (ручистый) излом; б – вязкий (чашечный) излом

Рисунок 29 – Микрофрактограммы (x5000) вязкого и хрупкого изломов, полученные на электронном микроскопе

Увеличение *степени дисперсности мартенсита*, то есть измельчение мартенсита, является одной из основных причин *повышения трещиностойкости*. Измельчение мартенситных кристаллов при плазменной закалке обусловлено уменьшением размера исходного аустенитного зерна из-за очень высоких скоростей нагрева и охлаждения, а также короткого времени пребывания металла при высоких температурах. Это полностью согласуется с известными выводами о положительном влиянии увеличения скорости нагрева и уменьшения продолжительности аустенизации на повышение прочности материала и стойкости к хрупкому разрушению.

В связи с этим важно отметить, что повышение трещиностойкости и положительное влияние увеличения дисперсности структуры на торможение трещинообразования также можно объяснить с позиций физической теории разрушения металла, согласно которой критическое напряжение хрупкого разрушения  $\sigma_{кр.}$  обратно пропорционально размеру зерна –  $d$ .

$$\sigma_{кр.} = k d^{-1/2} \quad (1.28)$$

Качественный переход от крупноигольной мартенситной структуры при традиционной объемной закалке к высокодисперсной структуре при плазменном упрочнении также вызывает качественное изменение микромеханизма разрушения, т.е. переход от межзеренного к внутривнутризеренному разрушению [112].

Наряду с получением более благоприятной мартенситной структуры еще одной причиной повышения трещиностойкости при плазменном упрочнении является образование (наличие) между упрочненной зоной и ядром

«мягкой» зоны отпуска с высокодисперсной слоисто-смешанной структуры, состоящей из троостита и сорбита. Это обстоятельство является важной причиной повышения трещиностойкости поверхностно-упрочненных изделий. Суть этого явления заключается в том, что в зоне мягкого размягчения тормозятся трещины, возникающие в хрупком упрочненном слое. Длина слоисто-смешанной структуры между закаленной и закаленной зонами определяется величиной температурного интервала аустенитно-мартенситного ( $\gamma \rightarrow \alpha$ ) превращения.

Разрушение образцов после двойной (поверхностной плазменной и дифференцированной объемной) закалки происходит, как отмечалось выше, по многократному механизму с торможением трещины на границе с зоной закалки, имеющей слоистую структуру, путем изгиба траектории. Причинами торможения трещины являются переход остаточных напряжений в этой точке от сжимающих к растягивающим и удовлетворительная пластичность материала зоны отпуска по сравнению с закаленной зоной.

Отметим, что этот механизм торможения трещин и кривизны траектории ее согласуется с данными, полученными для других методов поверхностного упрочнения, которые характеризуются наличием резкой границы между зонами циклической структуры металла (нитроцементация, азотирование и другие методы химико-термической обработки).

Результаты испытаний показывают, что плазменное упрочнение может быть эффективно использовано для тяжелонагруженных деталей и изделий, эксплуатируемых в объемно-упрочненном состоянии. При этом достигается одновременное повышение твердости рабочей поверхности и трещиностойкости изделий.

### **5.3 Влияние параметров плазменной обработки на характер распределения остаточных напряжений в колесной стали**

Аналитический обзор литературных данных за последние 25-30 лет показывает, что практически все исследования зависимости износостойкости от твердости контактирующих пар проводились только на образцах колесной или рельсовой стали без должной оценки степени влияния прочности одного элемента на износостойкость другого в сопряженной паре.

Анализ работ по изучению контактного взаимодействия металлических пар не дает четкого ответа на вопрос о том, будет ли износ и контактная прочность одного элемента пары увеличиваться или уменьшаться с увеличением твердости другого элемента. Так, в ряде работ показано, что с увеличением твердости одного элемента увеличивается износ другого, а в других работах утверждается, что износ обоих элементов уменьшается. Различная трактовка этого вопроса, на наш взгляд, связана с условиями испытаний (трение качения, трение скольжения, состояние сухого трения или трение со смазкой), а также с различием химического состава и структуры исследуемых сталей [113].



В процессе эксплуатации на колесо воздействуют переменные напряжения, основными составляющими которых являются напряжения от давления колеса на рельс, динамические нагрузки от ударов по стыкам рельсов, напряжения, возникающие от теплоты торможения и др. Сложная конфигурация колеса приводит к различному распределению рабочих напряжений по его поперечному сечению при переносе нагрузки с оси колесной пары на рельс. Эти напряжения накладываются на поле остаточных напряжений, возникающих в цельнокатаных колесах при их изготовлении, и их сумма определяет фактическое напряженное состояние колеса.

Остаточные напряжения в цельнокатаных колесах являются результатом неравномерной пластической деформации, вызванной неравномерным и неравномерным нагревом и охлаждением различных элементов колеса при его прокатке и термообработке.

Не будет большим преувеличением сказать, что имеется явно недостаточная информация о влиянии режимов упрочняющей термообработки на величину и характер распределения остаточных напряжений в цельнокатаных колесах, поэтому факторы, влияющие на величину и перераспределение остаточных напряжений, представляют несомненный интерес.

Остаточные напряжения образуются в основном в результате конечной технологической операции производства цельнокатаных колес, то есть после закалки и отпуска. Ранее [55, с. 247; 102, с. 57] мы показали, что закалка колес с подачей охлаждающей воды одновременно на весь круг катания создает более благоприятное распределение остаточных напряжений, чем закалка только поверхности катания обода.

При отпуске цельнокатаных колес уровень остаточных напряжений во всех элементах (ободе, диске и ступице) снижается, так как они подвергаются самоотдаче после соответствующей закалки.

Отметим, что создание больших сжимающих остаточных напряжений в поверхностно-упрочненном слое является важным фактором, повышающим эксплуатационные характеристики деталей и изделий, работающих при контактных и знакопеременных нагрузках. Это связано с тем, что при высоких контактных и знакопеременных нагрузках износ и усталостные трещины на поверхности детали возникают под воздействием остаточных растягивающих напряжений. Остаточные сжимающие напряжения, образующиеся на поверхности, уменьшают растягивающие напряжения от внешней нагрузки, что приводит к повышению износостойкости, усталостной прочности и стойкости материала к хрупкому разрушению.

Распределение остаточных напряжений на поверхности и по глубине упрочненного металлического слоя колеса исследовали рентгеновским методом с использованием рентгеновского дифрактометра ДРОН-1. Метод основан на прецизионных измерениях межплоскостных расстояний кристаллической решетки при наличии остаточных напряжений. Из теории дифракции

рентгеновских лучей известно, что если длина волны излучения  $\lambda$  и угол падения  $\alpha$  удовлетворяют условию Вольфа-Брэгга:

$$n\lambda = 2d\cos\alpha(1.29)$$

то падающие лучи отражаются, не проникая вглубь кристалла. (Здесь  $n$  – произвольное целое число,  $d$  – расстояние между двумя соседними атомными плоскостями кристаллической решетки).

Исследования распределения остаточных напряжений на поверхности и по глубине упрочненного слоя металла показали, что характер распределения остаточных напряжений зависит от мощности плазменной струи (дуги), скорости упрочнения и начального состояния металла [114-116].

При плазменной обработке без оплавления поверхности в диапазоне мощности струи  $P=5-10$  кВт в центре упрочненного слоя наблюдаются растягивающие напряжения  $\sigma_{\text{в}} = 100-140$  МПа, а на границе с основным металлом они возрастают до 250 МПа (рисунок 30).

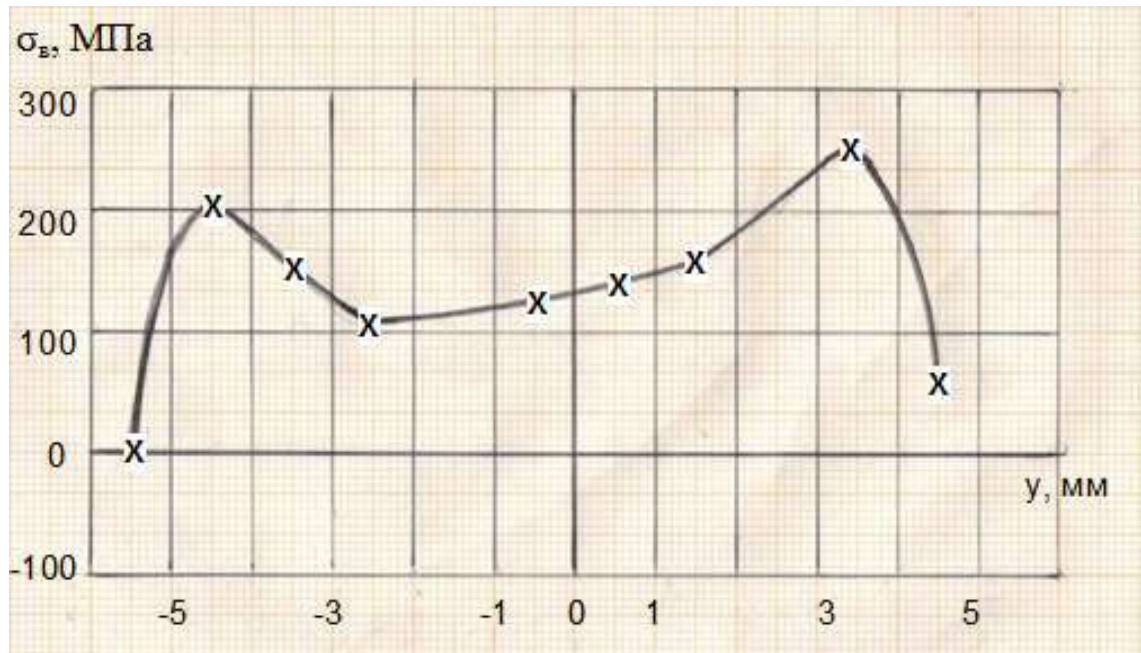


Рисунок 30 – Распределение остаточных напряжений в зависимости от мощности плазменной струи  $P=5-10$  кВт

С ростом мощности плазменной струи (дуги) в диапазоне  $P=10-15$  кВт в центре упрочненного слоя образуются сжимающие напряжения  $\sigma_{\text{в}}=180-250$  МПа (рисунок 31).

При дальнейшем увеличении мощности до  $P=20$  кВт с выходом режима микроплавления отмечается увеличение значений остаточных сжимающих напряжений до  $\sigma_{\text{в}}=250-380$  МПа (рисунок 32).

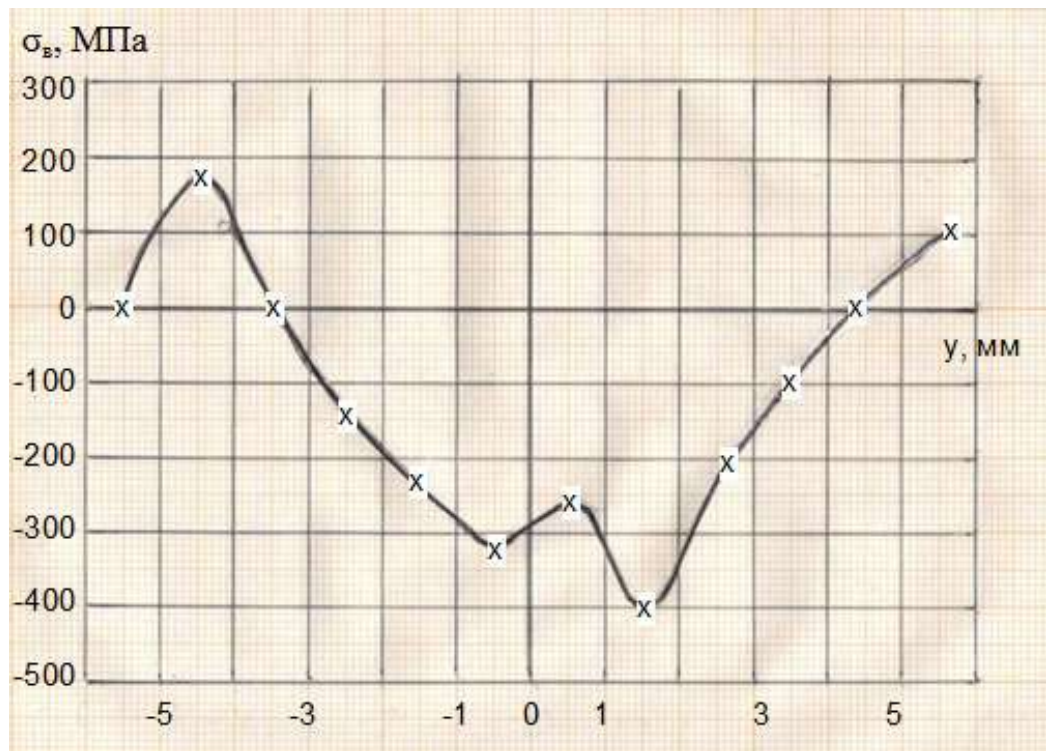


Рисунок 31 – Распределение остаточных напряжений в зависимости от мощности плазменной струи P=10-15 кВт

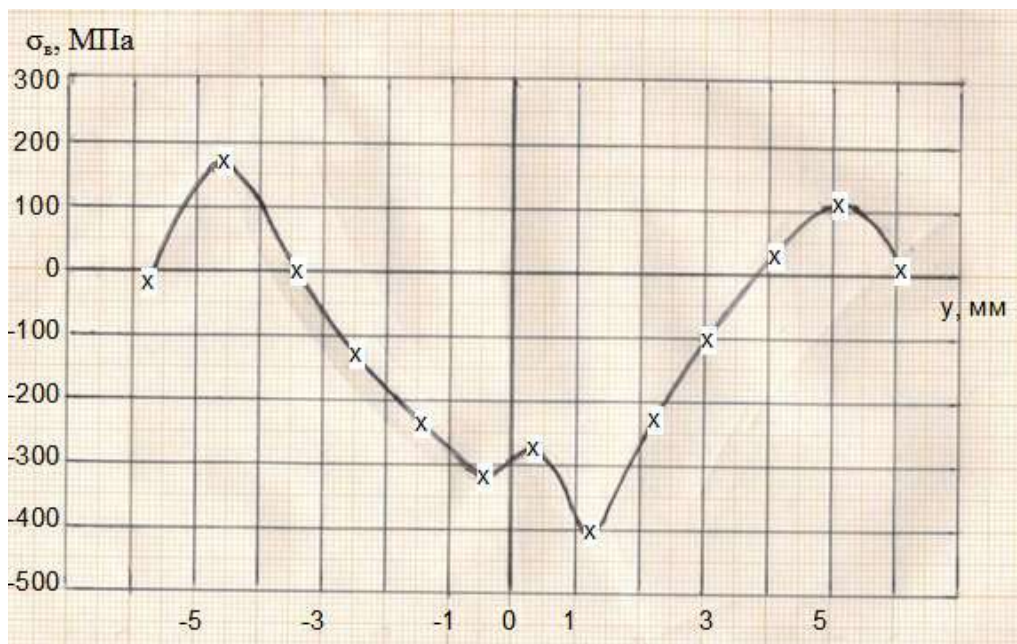


Рисунок 32 – Распределение остаточных напряжений в зависимости от мощности плазменной струи P=15-20 кВт

Величина и характер распределения остаточных напряжений существенно зависят от скорости плазменного упрочнения. При низкой скорости упрочнения 5-10 мм/с в центре упрочненного слоя образуются растягивающие напряжения, что обусловлено преобладанием напряжений от термического изменения объема над напряжениями от структурных

напряжений. При увеличении скорости обработки более чем на 10 мм/с знак напряжений изменяется в центре упрочненной зоны. Метод оценки остаточных напряжений путем изменения длины образца описан в разделе 2.4.

Результаты оценки остаточных напряжений представлены в таблице 22. Заметим, что оценка внутренних напряжений по изменению длины образца не является строгой, так как основана на определенных допущениях.

Таблица 22 – Определение остаточных напряжений по изменению длины образца

Операции	$h, мм$	$b, мм$	$l, мм$	$F, мм^2$	$\Delta F, мм^2$	$\Delta l, Мм$	$\sigma, кг/мм^2$	Характер распределения остаточных напряжений
До удаления	5	40	100	200	-	-	-	-
После удаления	-	-	-	-	-	-	-	-
1	5	39,5	99,30	197,5	2,5	- 0.70	-148.0	Сжимающие
2	--1--	39,0	98.35	195,0	--1--	- 0,95	-202.8	
3	--1--	38,5	97.05	192,5	--1--	-1.30	-281.3	
4	--1--	38,0	96,25	190,0	--1--	- 0.80	-174.6	
5	--1--	37,5	96.25	187,5	--1--	0	0	Изменение знака напряжений
6	--1--	37,0	96,75	185,0	--1--	+0.50	+108.5	Растягивающие
	--1--	36,5	97.42	182,5	--1--	+0,67	+144.4	
8	--1--	36,0	98.25	180,0	--1--	+0.83	+177.5	
9	--1--	35,5	99,20	177,5	--1--	+0.95	+201.1	
10	--1--	35,0	99.80	175,0	--1--	+0.60	+126.3	

Во время плазменной закалки колеса поверхностный слой обода колеса быстро нагревается до высоких температур значительно выше верхней критической точки  $A_{c3}$ , что приводит к быстрому тепловому расширению этого слоя. Расширению поверхностного слоя противостоит слабо нагретая внутренняя часть обода. В процессе закалки (резкого охлаждения) поверхностная часть уменьшается и давит на внутренний слой, который имеет более высокую температуру. В результате в поверхностном слое возникают растягивающие напряжения, а во внутреннем-сжимающие. Эти напряжения исчезают за счет пластической деформации поверхностного слоя. Возникновение остаточных напряжений начинается тогда, когда поверхностный слой достигает температуры  $\sim 600^\circ C$ , при которой сталь теряет способность к пластическому деформированию. При дальнейшем охлаждении температура поверхностного слоя снижается более интенсивно, чем внутреннего, что приводит к большему уменьшению внешнего слоя по сравнению с внутренним. Поэтому поверхностный слой будет сжиматься гораздо медленнее, чем внутренний, который имеет более высокую температуру. Охлаждение внутреннего слоя приводит к уменьшению его

объема, но этому сопротивляется охлажденный поверхностный слой. Таким образом, внутренний слой обода, испытывая растягивающие напряжения, создает сжимающие напряжения в поверхностном слое.

После полного охлаждения колес, термически обработанных поверхностной плазменной закалкой, в них регистрируется следующее распределение остаточных напряжений: сжимающие напряжения возникают в поверхностном слое обода на глубине  $\sim 2,5-3,0$  мм, а растягивающие – в нижней части обода. По-видимому, это объясняется тем, что охлаждение внутренних слоев приводит к уменьшению их объема. Однако этому уменьшению противодействует уже охлажденный поверхностный слой, что приводит к напряжениям в ободе колеса.

Из анализа литературных данных следует, что стремление к обязательному снятию остаточных напряжений во многих случаях неоправданно. Наличие сжимающих напряжений в поверхностном слое тяжело нагруженных изделий значительно повышает устойчивость к усталостному сколу, а также их износостойкость и трещиностойкость.

Результаты рентгенологических исследований распределения остаточных напряжений качественно подтверждаются данными деструктивно-механического метода, свидетельствующими о том, что в поверхностных слоях обода действуют сжимающие напряжения, которые в более глубоких слоях обода переходят в растягивающие напряжения.

### **Выводы по пятому разделу**

1. Сравнительное исследование влияния различных методов объемной термообработки на механические свойства колес показывает преимущества дифференциальной термообработки всех элементов (обода, диска и ступицы) колеса по сравнению с термообработкой только обода колеса.

2. На основании полученных экспериментальных результатов (для стали марки 2 по ГОСТ 10791-2011) рекомендуется следующая комбинация термической обработки цельнокатаных колес: дифференцированное упрочнение всех элементов колеса + плазменное упрочнение поверхности прокатки и гребня колеса. При этом достигается одновременное повышение как износостойкости рабочей поверхности прокатного колеса, так и трещиностойкости, что практически невозможно при использовании традиционных методов объемного упрочнения.

3. Для повышения износостойкости и трещиностойкости, а также усталостной прочности металла при назначении режима плазменной закалки необходимо создать условия, приводящие к максимальному значению остаточных сжимающих напряжений в поверхностном и подповерхностном слое металла и изменению знака остаточных напряжений на границе с исходной структурой путем преобразования сжимающих остаточных напряжений в растягивающие. Это достигается при мощности плазменной струи 15 кВт, скорости закалки 10-15 мм/с и ширине закаляемой дорожки 25-30 мм, которая используется для дальнейших исследований.

4. Осциллография процесса разрушения и фрактографические исследования трещин образцов показывают принципиальную разницу между характером разрушения закаленных образцов и незатвердевшего металла колеса. Образец колеса, не имеющий упрочненного слоя, разрушается по всему поперечному сечению, и процесс разрушения протекает в две стадии- образование трещин и ее распространение до полного разрушения образца. В случае плазменного упрочнения трещина возникает на поверхности упрочненного слоя и растет на глубину, где она останавливается на границе с исходным мягким металлом, так как для продолжения и распространения ээ требуется гораздо большая сила, чем зарождение в упрочненном слое.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного научно-патентного поиска выявлено современное состояние научно-технических проблем по износостойкости тяжело нагруженных деталей и узлов машин и механизмов. Износ материала – это сложный физико-химический процесс, который зависит от одновременного действия многих внутренних и внешних факторов. В реальных условиях эксплуатации машин и механизмов, как правило, наблюдается сразу несколько видов износа, закономерности которого разнообразны.

Цельнокатаные колеса, являясь частью ответственного назначения, работают в сложных условиях высоких циклических нагрузок в элементах колеса (диск, ступица и обод), значительного нагрева контактных зон при торможении и возникновения пиковых напряжений. Поэтому колеса должны обладать высокой конструктивной прочностью, то есть комплексом свойств, гарантирующих безопасность движения поездов и длительный срок службы.

Основными методами повышения износостойкости материала являются повышение твердости трущейся поверхности и снижение прочности клеевого соединения. Произведен выбор методов исследования экспериментальных образцов и необходимых приборов и оборудования для проведения исследований.

Используя методику планирования и проведения активного эксперимента, были проведены работы по оптимизации режима поверхностного плазменного упрочнения с точки зрения силы тока, напряжения плазменной дуги, расхода плазменного газа и скорости вращения колесной пары при закалке, что обеспечивает большую эксплуатационную прочность вагонного колеса.

Установлено, что при высокоскоростном нагреве и охлаждении, которое происходит при плазменной обработке, заданные свойства металла достигаются за счет образования градиентно-слоистой структуры, что приводит к модернизации структуры поверхностного слоя стали с одинаковым химическим составом, структурой и свойствами центральных слоев обрабатываемого изделия.

Показана эффективность применения поверхностного плазменного упрочнения в сочетании с предварительной объемной закалкой для повышения износостойкости и трещиностойкости колес. В то же время в объемно-упрочненных деталях и изделиях формируется композитный рабочий слой с высокой трещиностойкостью и износостойкостью с относительно мягкой и пластичной сердцевиной.

Сравнительные исследования свойств, полученных в результате однократной и двойной термообработки, впервые выявили преимущества структуры закалочного сорбита, который образуется при однократной термообработке (закалке), по сравнению с закалочным сорбитом (образующимся после двойной термообработки, состоящей из закалки +

отпуска). Установлено, что при одинаковой твердости закалочный сорбит обеспечивает наилучшие механические и эксплуатационные свойства.

Оптимальный диапазон твердости колес находится в диапазоне HV 554-877, а соотношение  $HV_k/HV_p$  – в диапазоне 1,22-1,86. Из проведенных экспериментальных исследований следует, что повышение твердости выше 900-950HV в реальных условиях эксплуатации может привести к растрескиванию и сколу упрочненного слоя, а также к интенсивному износу рельса. Закалка гребней колес до низкой твердости 277-481 малоэффективна, так как износостойкость повышается незначительно.

Показано, что для повышения износостойкости и трещиностойкости, а также усталостной прочности металла при назначении режима плазменной закалки необходимо создать условия, приводящие к максимальному значению остаточных сжимающих напряжений в поверхностном и подповерхностном слое и изменить знак остаточных напряжений на границе с исходной структурой путем преобразования сжимающих напряжений в растягивающие. В наших экспериментах это было достигнуто при мощности плазменной струи 15 кВт, скорости закалки 10-15 мм/с и ширине закаляемой дорожки 25-30 мм.

Для обеспечения высокой прочности конструкции рекомендуется следующее сочетание комплексной термообработки цельнокатаных вагонных колес: прерывистая закалка всех элементов колеса+плазменное упрочнение поверхности качения и гребня колеса. При этом достигается одновременное повышение как износостойкости рабочей поверхности колеса, так и трещиностойкости, что практически невозможно при использовании традиционных методов объемного и поверхностного упрочнения.

#### *Оценка полноты решений поставленных задач*

В результате диссертационной работы выполнены все поставленные задачи:

1. Экспериментальные исследования плазменной (локальной) обработки гребней цельнокатаных колес грузовых вагонов с определением параметров плазменной струи на глубину и ширину обработанной зоны.

2. Исследованы по формированию градиентно-слоистой структуры в поверхностной зоне при скоростном нагреве и охлаждении в процессе плазменной закалки.

3. Определение оптимального диапазона твердости гребня колеса в паре трения «колесо-рельс», обеспечивающего минимальный износ.

4. Исследование распределения остаточных напряжений на поверхности и на глубине упрочненного слоя цельнокатаного колеса в зависимости от режима упрочнения.

5. Определение интенсивности износа упрочненных колес в зависимости от пробега по сравнению с износом неупрочненных колес (на 5 тыс. км).

*Рекомендации и исходные данные по конкретному использованию результатов*

На основании выполненных исследований:



1. Для продления эксплуатационного ресурса быстроизнашивающихся деталей рекомендуется использовать поверхностную плазменную обработку, являющуюся рациональным по параметрам универсальности, экологичности, экономической эффективности и доступности.

2. При назначении режима поверхностной плазменной обработки рекомендуется создать условия, приводящие к максимальному значению остаточных сжимающих напряжений в поверхностном и подповерхностном слое металла и изменению знака напряжений на границе с исходной структурой путем перевода сжимающих напряжений в растягивающие.

3. Рекомендуемая скорость охлаждения при плазменной закалке для формирования градиентно-слоистой структуры в поверхностном слое, существенно повышающей износостойкость, составляет 500-1000°С/с.

4. Для обеспечения высокой конструкционной прочности цельнокатаных железнодорожных колес рекомендуется использовать поверхностную плазменную обработку в сочетании с дифференцированной объемной закалкой.

Результаты, полученные в настоящей диссертационной работе, использованы:

– в лекционном курсе и на практических занятиях дисциплины «Организация и планирование научных исследований и инновационной деятельности»;

– при подготовке дипломных работ бакалавров и магистерских проектов магистрантов специальности Стандартизация и сертификация.

*Оценка научного уровня выполненной работы в сравнении с лучшими достижениями в данной области*

Результаты диссертационных исследований соответствуют современному научно-техническому уровню в области термической обработки высококонцентрированным источником энергии, в частности, поверхностным плазменным упрочнением тяжело нагруженных деталей и узлов машин и механизмов. Основные экспериментальные исследования получены с использованием современного технологичного оборудования (мобильная плазменная установка УДГЗ-200 и механизм вращения колесной пары), методик и механико-физических методов анализа. Метрологические (измерительные) работы выполнялись на контрольно-измерительных приборах высокого класса точности, поверенных в соответствии с нормативными документами.

*Оценка технико-экономической эффективности плазменного упрочнения поверхности катания колес*

Согласно ГОСТ 10791-2011 для колес грузовых вагонов твердость на глубине до 30 мм от поверхности качения обода должна быть не менее 255 НВ. Однако это требование указанного ГОСТ-а в условиях увеличения скоростей движения поездов и нагрузки на оси грузовых вагонов является недостаточным и не препятствует интенсивному износу колес. Поэтому повышение твердости обода колеса до 320-360 НВ, как на рабочей поверхности, так и на глубине до 30 мм является актуальным. С целью повышения твердости на глубине до

30 мм от поверхности прокатки обода проводились работы, направленные на измельчение структуры перлита за счет уменьшения межпластинчатого расстояния между ферритом и цементом.

Как известно, если при термообработке образуется грубо пластинчатый перлит, то это приводит к низкой ударной вязкости диска колеса. Для увеличения ударной вязкости диска необходимо диспергировать структуру перлита, т.е. уменьшить размер колоний перлита.

Наиболее эффективным способом достижения повышенной ударной вязкости диска и твердости рабочей поверхности обода на глубине до 30 мм является диспергирование конструкционных компонентов стали (феррита и цементита) с помощью поверхностного плазменного упрочнения.

При термообработке колес по технологии «прерывистой закалки» вдоль сечения обода образуется дисперсная перлитная структура, обеспечивающая высокую твердость (НВ 320-350), если сталь при нагреве для закалки имеет мелкозернистую аустенитную структуру. Повышение твердости стали может быть достигнуто за счет уменьшения межпластинчатого расстояния в перлите до 0,05 мкм и исключения структурно свободного феррита, что может быть обеспечено необходимой скоростью охлаждения и измельчения исходного аустенитного зерна.

Для определения структуры, обеспечивающей требуемые свойства упрочненного слоя обода колеса, были проведены экспериментальные исследования влияния температуры превращения переохлажденного аустенита на структуру, образующуюся в изотермических условиях, и твердость колесной стали, достигаемую в этом случае. Образцы промышленной колесной стали, содержащие 0,63%С и 0,74% Мп, нагревали до 900<sup>0</sup>С в печи с нейтральной атмосферой и охлаждали при температурах в диапазоне от 715<sup>0</sup>С(Ас<sub>1</sub>) до 440<sup>0</sup>С. Зависимость твердости и межпластинчатого расстояния в конструкциях от температуры превращения для указанной колесной стали представлена в таблице 23.

Таблица 23 – Влияние температуры превращения на твердость и межпластиночное расстояние

Формирующаяся структура и ее параметры	Температура превращения, °С				
	715	620	590	540	450
Структура	П(ф+ц)	С(ф+ц)	Т(ф+ц)	Т(ф+ц)	Т+Б
Межпластиночное расстояние в перлите–Δ, мкм	0,48	0,22	0,08	0,06	0,047
Твердость по Роквеллу, HRC	17	23	34	37	39
Твердость по Бринелю, НВ	~210	235	311	340	363

*Значения твердости по Бринелю получены переводом результатов измерения по Роквеллу*

Как видно из таблицы 23, твердость изотермически обработанных образцов уменьшается с увеличением температуры изотермического

превращения с 450°С до 715°С). Практически при всех температурах изотермического превращения образуется феррит-цементитная смесь различной степени дисперсности, количественной характеристикой которой является межпластинчатое расстояние. Поскольку пластинчатые структуры формируются при этих температурах превращения аустенита, межпластинчатое расстояние представляет собой сумму толщин двух соседних ферритовых и цементитных пластин. При температуре 450°С в тонкопластинчатом троостите с небольшим количеством бейнита образуется структура с межпластинчатым расстоянием ~0,047 мкм. Превращение при более высоких температурах приводит к образованию феррито-цементитной смеси. Эксперименты также показали, что как твердость, так и ударная вязкость стали возрастают с увеличением дисперсности получаемых конструкций, которая зависит от скорости охлаждения. Показано, что с увеличением скорости охлаждения в области перлитного (диффузионного) превращения одновременно возрастают твердость и ударная вязкость. Отметим, что, в отличие от перлита, сорбит и троостит не являются равновесными структурами, так как в реальных производственных условиях охлаждение обычно происходит неравномерно, а это приводит к некоторому насыщению сорбита и троостита ферритом углерода, что естественным образом сказывается на механических свойствах. В частности, механические свойства со стальных конструкций перлита, сорбита или троостита прямо пропорциональны площади границы раздела между ферритом и цементом. Поэтому при снижении температуры разложения аустенита и соответствующем уменьшении структуры (увеличении степени дисперсности) ферритные пластины несколько пересыщаются углеродом, повышаются прочностные характеристики (прочность  $-\sigma_s$ , твердость  $-\text{НВ}$ ), а пластические характеристики (удлинение  $-\delta$  и сужение  $-\psi$ ) снижаются.

Анализ эксплуатации колес повышенного качества и твердости выявил увеличение срока службы цельнокатаных колес не менее чем в 1,7-1,9 раза в зависимости от степени дисперсности феррито-цементитной смеси и стойкости к образованию контактных усталостных повреждений в ободе колеса в 2,0 раза.

Экономический эффект определяется сравнением износостойкости закаленных и не закаленных колесных пар, а также сравнением эксплуатационных ресурсов их работы (таблица 24, 25).

Расчет интенсивности износа гребней колес проводился для 5000 км пробега закаленных и не закаленных колесных пар. Скорость износа гребней колесных пар -  $Z$  рассчитывалась по известной формуле (1.30):

$$Z = A 5000 / \Pi 2n \quad (1.30)$$

где  $A$  – суммарная величина износа гребней колес, мм;

$\Pi$  – пробег локомотива, км;

$n$  – количество осей локомотива,  $n=6$

Таблица 24 – Интенсивность износа упрочненных гребней колесных пар

Толщина гребня колес перед упрочнением, мм		Толщина гребня колес после 25 228 км пробега, мм		Износ гребня колес, мм
лев.	прав.	лев.	прав.	
33	33	31	31,5	3,5
33	33	30,5	31,5	4,0
33	33	32	31,0	3,0
33	33	32	31,5	3,5
33	33	31	30,0	5,0
33	33	31	30,5	4,5
Суммарный износ				23,5

Износ колесных пар, прошедших плазменное упрочнение, составляет:

$$Z = A 5000 / \Pi 2n = 23,5 * 5000 / 25 228 * 2 * 6 = 117 500 / 306 336 = 0,38 \text{ мм}$$

Таблица 25 – Интенсивность износа неупрочненных гребней колесных пар

Толщина гребня колес перед упрочнением, мм		Толщина гребня колес после 14241 км пробега, мм		Износ гребня колес, мм
лев.	прав.	лев.	прав.	
30	29,5	28,0	27,5	4,0
30	31,0	28,5	29,0	3,5
28	29,0	27,0	26,5,0	3,5
29	30,0	27,0	28,0	4,0
30	31,5	28,0	27,5	5,0
30	31,0	27,5	29,5	4,0
Суммарный износ				24,0

Износ неупрочненных колесных пар составляет:

$$Z = A 5000 / \Pi 2n = 24,0 * 5000 / 14 241 * 2 * 6 = 120 000 / 170892 = 0,70 \text{ мм}$$

Сравнение экспериментальных данных, приведенных в таблицах 24 и 25, показывает, что при практически одинаковой суммарной интенсивности износа (~ 24,0 мм) пробег закаленных и не закаленных колесных пар отличается в 1,8 раза, в частности, пробег поверхностно-плазменно закаленных колесных пар с суммарной интенсивностью износа 23,5 мм составляет 25 228 км против 14 241 км не закаленных колесных пар с практически одинаковой суммарной интенсивностью износа 24,0 мм (таблица 26).

Таблица 26 – Оценка технико-экономической эффективности применения плазменного упрочнения гребней колесных пар

Параметры, характеризующие износ	Неупрочненные колесные пары	Упрочненные колесные пары
Твердость по Бринелю	350	730-850
Глубина закаленного слоя, мм	-	1,7-2,0
Пробег (км) при интенсивности износа колесных пар 24,0 мм	14241	25 228
Пробег между обточками, км	9 500	19000
Максимальное количество обточек колес	9	6
Затраты на замену одной неупрочненной колесной пары, тенге	656 550	-
Затраты на плазменное упрочнение одной колесной пары, тенге	-	20 065
Экономический эффект в расчете на одну упрочненную колесную пару, тенге	-	636 485
Эксплуатационный ресурс колесной пары, тыс. км	95,0	237,0

*Значения твердости по Бринелю получены переводом результатов измерения HRC*

Результаты экспериментов показывают, что пробег между обточками неупрочненных колесных пар составляет ~ 9500 км, в то время как для закаленных колесных пар пробег в 2,1 раза больше и составляет ~ 19 000 км. Максимальное количество обмоток незатвердевших колесных пар – 9 против 6 обмоток закаленных колесных пар. Стоимость замены одной неупрочненной колесной пары с полным осмотром составляет 656 550 тенге, стоимость поверхностного плазменного упрочнения одной колесной пары – 20 065 тенге. Фактический эксплуатационный ресурс неупрочненной колесной пары составляет – 95,0 тыс. км, а для плазменной – 237,0 тыс. км, то есть увеличение в 2,5 раза.

Таким образом, анализ современного состояния и новых технологических решений проблемы повышения износостойкости колесной пары показывает, что ее необходимо решать комплексно, с учетом химического состава стали для колес, технологии изготовления и методов их упрочняющей термической обработки.

Проблема повышения долговечности и надежности колесно-рельсовой пары трения значима в экономическом, ресурсосберегающем и экологическом аспектах, так как их первичное производство и утилизация сопровождаются потреблением сырьевых и энергетических ресурсов, а также техногенным загрязнением окружающей среды.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Жардемев Б.Б., Кулаков О.Р. Развитие и модернизация магистральной сети железных дорог Республики Казахстан // Вестник ВНИИЖТ. – 2009. – №2. – С. 15-18.
- 2 Богданов В.М., Захаров С.М. Современные проблемы системы колесо-рельс // Железные дороги мира. – 2004. – №1. –С.57-62.
- 3 Харрис У. и др. Обобщение передового опыта тяжеловесного движения: вопросы взаимодействия колеса и рельса / пер.с англ.–М.: Интекст, 2002.–408 с.
- 4 Канаев А.Т. Интегрированная деформационно-термическая обработка сортового проката. –Астана: Изд-во ТОО «Мастер-ПО», 2012.–210 с.
- 5 Селиванов М.В., Шепелев Н.С. Применение плазмы для упрочнения поверхности за рубежом. – М.: Черметинформация,1987. –42с.
- 6 Иванов С.Г. Основные направления по повышению надёжности и увеличению ресурса цельнокатаных колёс// Современные проблемы взаимодействия подвижного состава и пути. Колесо – рельс 2003: сб. докл. науч.-практ. конф. – СПб.,2003. –С. 124-127.
- 7 Лыков А.М., Редькин Ю.Г., Глибина Л.А. Плазменное упрочнение гребней колес. Различные методы плазменной закалки // Локомотив. – 2000. – №1. –С. 27-28.
- 8 Сладкова Л.А., Неклюдов А.Н. Новый взгляд на проблему изнашивания колес подвижного состава // Трение и износ. –2021.– Т. 42, №2.– С. 162-169.
- 9 Материаловедение /под ред. Б.Н. Арзамасова.–М.: Машиностроение, 2008. –383 с.
- 10 Башнин Ю.А., Ушаков Б.К., Секей А.Г. Технология термической обработки. – М.: Металлургия, 1986. – 424с.
- 11 Воробьев А.А. Совершенствование технологии восстановления колесных пар повышенной твердости: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07. –СПб., 2005. – 140 с.
- 12 Домбровский Ю.М. Физическиеосновы и технологии плазменного поверхностного упрочнения // Упрочняющие технология и покрытия.– 2007.– №3.– С.14-25.
- 13 Шаповалов В.В., Майба И.А., Щербак П.Н. Стержневые гребнесмазыватели РГУПС// Современные проблемы взаимодействия подвижного состава и пути. Колесо - рельс 2003: сб. докл. науч.-практ. конф.– Щербинка: Изд-во ВНИИЖТ, 2003. –С.130-133.
- 14 Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. –М.: Машиностроение, 1977.–526 с.
- 15 Хрущов М.М., Бабичев М.А. Исследование изнашивания металлов. – М.: Изд-воАН СССР, 1960. – 351 с.
- 16 Боуден Ф.П., Тейбор Д. Трение и смазка твердых тел. –М.: Машиностроение, 1968. – 543 с.

- 17 Likov A.M., Maslov V.E., Lobov O.I. Plasma Treatment of Metalium Materials // *Proc. 15th internat. symp. Plasma Chemistry.* – Orleans, 2001. – P. 1941-1946.
- 18 Markov D.P., Kelly D. Mechanisms of adhesion-initiated catastrophic wear: pure sliding // *Wear.* – 2000. – Vol. 239. – P. 189-210.
- 19 Железнодорожный транспорт на современном этапе: задачи и пути их решения: сб. ст. / подред. А.Е. Семечкина. – М.: Интекст, 2008. – 288 с.
- 20 Тимофеева Л.А., Тимофеев С.С., Демин А.Ю. и др. Модифицирование поверхности деталей из железоуглеродистых сплавов, работающих в условиях трения и изнашивания // *Трение и износ.* – 2018. – Т. 39, №3. – С. 283-289.
- 21 Шаповалов В.В., Евдокимов Ю.А., Богданов В.М. и др. Повышение эффективности лубрикации // *Железнодорожный транспорт.* – 1993. – №7. – С. 40-41.
- 22 Редькин В.И., Ладыгин О.И., Верхотуров В.К. Энергетическая эффективность лубрикации // *Железнодорожный транспорт.* – 1999. – №12. – С. 48-50.
- 23 ГОСТ 25.501-78. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы испытаний на контактную усталость. – Введ. 1980-01-01. – М., 1980. – 11с.
- 24 Цюренко В.Н. Эксплуатационная надёжность колёсных пар грузовых вагонов // *Железнодорожный транспорт.* – 2002. – №3. – С. 24-28.
- 25 Марков Д.П. Типы катастрофического изнашивания колёсно-рельсовых сталей // *Вестник ВНИИЖТ.* – 2004. – №2. – С. 30-35.
- 26 Иванов И.А., Битюцкий А.А., Сколотнева Н.Ю. Оценка напряжённого состояния цельнокатаных колёс с различным износом обода // *Конструктивно-технологическое обеспечение надёжности колёс рельсовых экипажей: сб. науч. тр.* – СПб.: ПГУПС, 1997. – С. 76-80.
- 27 Kanayev A.T., Kanayev A.A. Plasma Surface Hardening of Crests of Wteels of a Rolling Stocr // *Mater. 4té mezinar. ved.-prak.conf. Veda Teorie A PRAXE-2008.* – Praha, 2008. – P.56-60.
- 28 Тушинский Л.И. Структурная теория конструктивной прочности материалов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 400 с.
- 29 Канаев А.Т., Байбосынова Л.А. Исследование структуры и свойств бандажной стали в процессе поверхностного упрочнения методом плазменной закалки // *Матер. 5-й междунар. науч. -практ. конф. «Новейшие научные достижения – 2009».* – София: «БялГрад-БГ» ОДД, 2009. – С. 6-9.
- 30 Узлов И.Г., Савенков В.Я. Поляков С.Н. Термическая обработка проката. – Киев: Техника, 1991. – 159 с.
- 31 Канаев А.Т., Богомоллов А.В., Бакижанова Д.С., Изменение структуры и свойств бандажных колёс локомотивов после поверхностного плазменного упрочнения // *Матер. 15-й междунар. науч.-практ. конф. «Технология упрочнения, нанесения покрытия и ремонта: теория и практика».* – СПб., 2013. – С. 158-162.

32 Долинская Л.А. Исследование качества колес, закаленных в вертикальном положении с печного нагрева// В кн.: Вопросы производства железнодорожных цельнокатаных колес. – М.: Изд-во АН СССР, 1989.– С. 205-213.

33 Стародубов К.Ф., Узлов И.Г. Исследование влияния температуры отпуска на свойства колесной стали // Вкн.: Вопросы производства железнодорожных цельнокатаных колес. – М.: Изд-во АН СССР, 1989.– С.145-155.

34 Таран Ю.Н., Алимов А.А., Есаулов В.П. и др. Структурные изменения в ободьях железнодорожных колес с разным профилем поверхности катания // Известия вузов. – 1989. – №9. – С. 101-105.

35 Кидин И.Н. Физические основы электротермической обработки металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1969. – 376 с.

36 Стародубов К.Ф. Термическая обработка железнодорожных цельнокатаных колес. – Киев: Изд-во АНУССР, 1996. – 235 с.

37 Кидин И.Н., Андрущечкин В.И., Волков В.А. и др. Электро-химико-термическая обработка металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1978. – 320 с.

38 Палицук И.Е., Ясинская О.Г. Особенности структуры поверхностного слоя стали 40Х, упрочненной потоком высоких энергий // Электронная обработка материалов. – 1986. – №4. – С.21-23.

39 Авдучевский В.С., Ишлинский А.Ю., Образцов И.Ф. и др. Научные основы прогрессивной техники и технологии. – М.: Машиностроение, 1985. – 376 с.

40 Григорянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. –М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.

41 Кокора А.Н., Соболев Э.Н. Физические особенности лазерного упрочнения сплавов // Физико-химические процессы обработки материалов высококонцентрированным потоком энергии: сб. ст. –М.: Наука, 1983. – С. 54-66.

42 Коваленко В.С., Головкин Л.Ф., Черненко В.С. Упрочнение и легирование деталей машин лучом лазера –Киев: Техніка, 1990. – 192 с.

43 Гурьев В.А., Тескер Е.И. Применение лазерной обработки для формирования поверхностного слоя нормализованной стали с высокими триботехническими и вязкими свойствами // Физика и химия обработки материалов. – 1996. – №1. – С. 14-19.

44 Коротков В.А., Трошин О.В., Бердников А.А. Плазменная закалка сканируемой дугой безоплавления поверхности // Физика и химия обработки материалов. – 1995. – №2. – С.101-103.

45 Тополянский П.А., Соснин Н.А. Упрочнение деталей, технологической оснастки и инструмента с помощью дуговой и высокочастотной плазмы // Электротехническое производство: передовой опыт и научно-технические достижения для внедрения. – 1991.–№2. – С. 24-27.

46 Пат. 2107739 РФ. Способ поверхностной закалки и устройство для его осуществления/ Петров С.В., Сааков А.Г.; опубл. 27.08.98, Бюл. №7.–5с.



- 47 Нечаев В.П., Рязанцев А.А. Исследование, разработка, обоснование возможностей повышения надежности работы крупномодульных шестерен путем плазменного упрочнения их поверхностей// Прогрессивные технологии и системы машиностроения. –2012. –№1(43).– С. 227-232.
- 48 Пат. 2430166 РФ. Способ упрочнения железнодорожных колес/ Балановский А.Е., Цой В.Е.; опубл. 27.09.11, Бюл. №8.– 4 с.
- 49 Ван Флек Л. Теоретическое и прикладное материаловедение/ пер. С англ. – М.: Атомиздат, 1975. –472 с.
- 50 Соснин Н.А., Ермаков С.А., Тополянский П.А. Плазменные технологий: руков. для инженеров. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2013.– 406 с.
- 51 Спенс Дж. Экспериментальная электронная микроскопия высокого разрешения / пер.с англ. – М.: Наука, 1996.–320 с.
- 52 Рюле М., Уилкенс М. Просвечивающая электронная микроскопия// В кн.: Физическое материаловедение. – М.: Metallurgia, 1997.–640 с.
- 53 Лахтин Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов. – М.: Metallurgia, 1984. – 350 с.
- 54 Вишняков Я.Д., Пискарев В.Д. Управление остаточными напряжениями в металлах и сплавах.–М.: Metallurgia, 1989. –254 с.
- 55 Сухов А.В., Шиткин С.Л. Перспективы применения рентгеновского метода контроля остаточных напряжений в цельнокатаных колесах// В кн. Перспективные задачи развития железнодорожного транспорта.–М.: Интекст, 2010.– С. 244-253.
- 56 Павлов И.М., Галлай Я.С., Астахов И.Г. Руководство к лабораторному практику по прокатке.–М.: ГНТИ, 1957. –253 с.
- 57 Новик Н.Ф. Математические методы планирования экспериментов в материаловедении.–М.: Ротапр. МИСиС, 1998.–106 с.
- 58 Адлер Ю.П., Грановский Ю.В., Маркова Е.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. –М.: Наука, 1991.–283 с.
- 59 Шамельханова Н.А. Основы планирования эксперимента. – Алматы, 2012. – 182 с.
- 60 Марочник сталей и сплавов /под ред. В.Г. Сорокина. –М.: Машиностроение, 1989.– 640с.
- 61 Балановский А.Е. Плазменное поверхностное упрочнение металлов. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2006. –180 с.
- 62 Дьяченко С.С. Образование аустенита в железоуглеродистых сплавах. –М.: Metallurgia, 1982.–128 с.
- 63 Блантер М.Е. Теория термической обработки. – М.: Metallurgia, 1994.–328 с.
- 64 Канаев А.Т., Алексеев С.В., Пальчун Б.Г. Плазменное упрочнение поверхностного слоя крупногабаритных деталей из конструкционных сталей// Вестник ЕНУ им. Л.Н. Гумилева.– 2015. – №6 (109).– С. 138-145.
- 65 Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. – М.: Машгиз, 1951. –296 с.

66 Фей Дж., Ридделла Ф. Теория теплопередачи в точке торможения диссоциированного воздуха. // Газодинамика и теплообмен при наличии химической реакции: сб. ст.–М.: Изд-во Иностранной литературы, 1962.– С. 49-63.

67 Рыкалин Н.Н., Николаев А.В., Кулагин И.Д. Тепловой поток в тело, взаимодействующее с плазменной струей // Теплофизика высоких температур. – 1965. – №6.– С. 25-27.

68 Филинов С.А., Фиргер И.В. Справочник термиста. –М.: Машиностроение, 1969.–320 с.

69 Кухлинг Х. Справочник по физике. –М.: Мир, 1982.–520 с.

70 Курдюмов Г.В., Утевский Л.М., Энтин Р.И. Превращения в железе и стали. – М.: Наука, 1977.–238 с.

71 Гуляев А.П. Металловедение. –М.: Metallurgy, 1986.–544 с.

72 Геллер Ю.А. Инструментальные стали. –М.: Metallurgy, 1983.–525 с.

73 Пат. 2107739. Способ поверхностной закалки и устройство для его осуществления / Петров С.В., Сааков А.Г., опубл. 27.03.98, Бюл. №9.– 5 с.

74 Коваленко В.В., Козлова Э.В. Физическая природа формирования и эволюция градиентных структурно-фазовых состояний в сталях и сплавах. – Новокузнецк, 2009.–557 с.

75 Быков Е.Г., Ефимов О.Ю., Иванов Ю.Ф. и др. Эволюция структурно-фазовых состояний при эксплуатации прокатных валков // Известия вузов.– 2010.– №12.– С. 35-37.

76 Костерев В.Б., Ефимов О.Ю., Иванов Ю.Ф. Формирование градиентных структурно-фазовых состояний при термомеханическом упрочнении // Известия вузов. – 2011. – №4. – С. 24-27.

77 Сарсембаева Т.Е., Тополянский П.А., Канаев А.Т. и др. Исследование влияния скорости охлаждения на характеристики упрочненного слоя при плазменной закалке// Вестник КАТУ им. С. Сейфуллина.– 2019. – №4.– С. 154-161.

78 Киселев С.Н., Саврухин А.В., Кузьмина Г.Д. и др. Влияние плазменной обработки на напряженно-деформированное состояние гребней бандажей колес локомотивов // Сварочное производство. – 2001. – №6. – С. 9-17.

79 Канаев А.Т., Сарсембаева Т.Е., Богомоллов А.В. и др. Формирование структуры и свойств колесной стали при поверхностной плазменной закалке// Матер.11-й междунар. науч.-практ. конф. «Achievement of High School - 2018». –София: «БилГРАД -БГ» ООД, 2018. – С.41-48.

80 Металлография железа: в 3 т. / пер. с англ.; под ред. Дж. Л. де Брауэр. – М.: Metallurgy, 1972. – Т. 1. – 240 с.

81 Новиков И.И. Теория термической обработки металлов.–М.: Metallurgy, 1986. –480 с.

82 Канаев А.Т., Богомоллов А.В. Структурообразование в плазменно-упрочненных металлических материалах. –Астана:ТОО «Политон», 2015.– 185с.

83 Канаев А.Т., Сарсембаева Т.Е., Аязбаева А.Б. и др. Влияние гребневого контакта с рельсом и профиля поверхности катания колес на износ // Вестник науки КАТУ им. С.Сейфуллина.–2016.– №3 (90).– С. 131-137.

84 Канаев А.Т., Сарсембаева Т.Е., Тополянский П.А. Влияние величины конусности поверхности катания колес на устойчивость движения в прямых участках пути// Вестник науки КАТУ им. С. Сейфуллина.–2016.– №1(92).– С. 148-151.

85 Таран Ю.Н., Алимов А.А., Есаулов В.П. и др. Структурные изменения в ободьях железнодорожных колес с разным профилем поверхности катания // Известия вузов. – 1989. – №9. – С.101-105.

86 Шур Е.А. К вопросу об оптимальном соотношении твердости рельсов и колес// Современные проблемы взаимодействия подвижного состава и пути. Колесо - рельс 2003: сб. докл. науч.-практ. конф.–Щербинка: Изд-во ВНИИЖТ, 2003. –С. 87-93.

87 Ларин Т.В. Об оптимальной твердости элементов пары трения «колесо-рельс» // Вестник ВНИИЖТ.– 1965. – №10. – С. 6-12.

88 Богданов В.М., Марков Д.П., Пенькова Г.И. Оптимизация триботехнических характеристик гребней колес подвижного состава // Вестник ВНИИЖТ. – 1998. – №4. – С. 3-9.

89 Канаев А.Т., Кусаинова К.Т. Влияние соотношения твердости рельса и бандажа на износостойкость пары «колесо-рельс» // Вестник КазАТУ им. С. Сейфуллина. – 2007. – №3. – С. 309-317.

90 Тюфтаев А.С., Мордынский В.Б., Желобцев Е.А. Оценка износостойкости высокоуглеродистых сталей в условиях сухого трения и абразивного изнашивания // Сталь. – 2015. – №10. –С.55-60.

91 Канаев А.Т., Богомоллов А.В., Кусаинова К.Т. Исследование структурообразования в гребнях колесных пар, упрочненных плазменной закалкой // Известия вузов. – 2012. – №12. –С.48-51.

92 Исакаев Э.Х., Ильичев М.В., Тюфтаев А.С. Особенности структурообразования и формирования свойств при плазменной обработке углеродистой стали // Сталь. – 2003. – №2. –С.52-55.

93 Большаков В.И., Стародубов К.Ф., Тылкин М.А. Термическая обработка стали повышенной прочности. – М.: Металлургия, 1997. – 200 с.

94 Бердников А.А., Филиппов М.А., Студенок Е.С. Структура закаленных углеродистых сталей после плазменного поверхностного упрочнения // Металловедение и термическая обработка металлов.– 1997. – №6.– С. 2-4.

95 Ларин Т.В. Об оптимальной твердости элементов пары трения «колесо-рельс» // Известия вузов. – 1986. – №10. – С.4-9.

96 Вихрова А.М., Ларин Т.В., Парышев Ю.М. и др. О соотношении твердости рельсовой и колесной стали // Известия вузов. – 1987. – №5. –С.34-38.

97 Kanayev A.T., Baibossynova L.A. Analyses of exploitation terms influence on microstructure and working efficiency of plasma-ironclal layer // Mater. 5 témiedzynar. nauk.-prakt. konf. “Dynamika naukowych badan-2009. – Przemysli: Nauka I studia, 2009.–P. 14-17.

- 98 Шур Е.А., Бычкова Н.Я., Марков Д.П., Кузьмин Н.Н. Износостойкость рельсовых и колесных сталей// Трение и износ. – 1995. – Т. 16, №1.– С. 80-91.
- 99 Гетманова М.Е., Илюхин Д.С., Никулин А.Н. и др. Особенности химического состава и свойств литых и цельнокатаных железнодорожных колес// Сталь. – 2017. – №1. – С. 59-66.
- 100 Исаченко В.П., Кушнарв В.И. Струйное охлаждение. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 216 с.
- 101 Sarsembaeva T.E., Kanaev A.T., Taimanova G.K. Differential Heat Treatment of One-Piece Freight-Car Wheels// Steel in Translation.– 2017.–Vol.47, №5. –P. 345-348.
- 102 Сарсембаева Т.Е., Канаев А.Т., Тайманова Г.К. Дифференцированная термическая обработка цельнокатаных колесгрузовых вагонов //Сталь.–2017.– №5. –С. 56-59.
- 103 Канаев А.Т., Орынбеков Д.Р., Богомолв А.В. Дифференцированное упрочнение железнодорожных колес объемной закалкой и поверхностной плазменной обработкой// Вестник науки КАТУим. С. Сейфуллина. – 2019. – №2(101). – С. 179-187.
- 104 Сарсембаева Т.Е., Канаев А.Т., Джаксымбетова М.А. Комплексная объемно-поверхностная закалка колесной стали// Вестник ЕНУим. Л.Н. Гумилева. – 20107. – №4(119). – С. 183-191.
- 105 Есаулов В.П., Губенко С.И., Калашникова Л.С. Об образовании наплыва на поверхности катания колес при эксплуатации// Известия вузов.– 1985. – №10. –С.82-85.
- 106 Канаев А.Т., Сарсембаева Т.Е., Джаксымбетова М.А. и др. Сравнительное исследование различных способов термической обработки цельнокатаных колес // Вестник ЕНУи м. Л.Н. Гумилева. – 2017. – №2(117). – С. 196-203.
- 107 Лещинский Л.К., Смотугин С.С., Пирч И.И. Плазменное поверхностное упрочнение. –Киев: Техника, 1990. –109 с.
- 108 Коваленко В.В., Козлов Э.В., Иванов Ю.Ф. и др. Физическая природа формирования и эволюции градиентных структурно-фазовых состояний в сталях и сплавах. – Новокузнецк, 2009. –557 с.
- 109 Иннов. пат. 28707. Способ поверхностной закалки и устройство для его осуществления / Канаев А.Т., Богомолв А.В., Жакупов А.Н. и др.; опубл. 19.06.14, Бюл. №7.– 5 с.
- 110 Канаев А.Т., Дюсенова Д.Н. Исследование влияния режимов плазменной закалки на прокаливаемость и трещиностойкость бандажной стали// Матер. 9-й междунар. науч.-практ. конф. «Ключови въпроси в съвременната наука-2013». – София «БялГРАД-БГ» ООД, 2013.–С. 3-6.
- 111 Бернштейн М.Л., Займовский В.А. Структура и механические свойства металлов. –М.: Металлургия, 1980. – 472 с.
- 112 Канаев А.Т., Богомолв А.В. Структурообразование в плазменно-упрочненных металлических материалах. – Павлодар: Изд-во фирмы «Политон», 2015.–184 с.

113 Буйносов А.П., Агапов Е.В., Кузьмин К.А. и др. Мероприятия по уменьшению износа гребней колесных пар // Проблемы механики железнодорожного транспорта: динамика, надежность и безопасность подвижного состава: тез. докл. 9-й междунар. конф. – Днепропетровск, 1996. – С. 63-65.

114 Балановский А.Е. Основные вопросы плазменного поверхностного упрочнения металлов// Уточняющие технологий и покрытия.–2016.–№2. – С. 20-30.

115 Сарсембаева Т.Е., Канаев А.Т., Тополянский П.А. Исследования изменения внутренних напряжений в цельнокатаных железнодорожных колесах после поверхностной плазменной закалки // Mater. 10 témiedzynar.nauk.-prakt.konf. «Strategiczne Pytania Swiatowejnauki-2019». –Przemysl: Nauka i Studia, 2019. – S. 65-73.

116 Сарсембаева Т.Е., Канаев А.Т. Исследование распределения остаточных напряжений в ободе термообработанного железнодорожного колеса // Вестник КАТУ им.С. Сейфуллина. – 2019. –№3(102).– С. 270-274.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Патент Республики Казахстан на полезную модель



## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Подтверждение участия в научных проектах

#### ДОГОВОР НА ОКАЗАНИЕ УСЛУГ № 59

г. Астана

«25» 04 2019 г.

РГП на ПХВ «Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева», именуемое в дальнейшем «Заказчик», в лице проректора по научно-исследовательской работе Мерединой Гульнэры Тынышбаевны, действующего на основании приказа №737-жк от 25.04.2017 г., с одной стороны, и гражданка Сарсембаева Толкын Ержановна, именуемая в дальнейшем «Исполнитель», с другой стороны, заключили настоящий договор о нижеследующем:

#### 1 Предмет договора

1.1 Исполнитель оказывает услуги Заказчика в качестве Научного сотрудника по проекту AP05131581 «Развитие кластера железнодорожного машиностроения в Казахстане внедрением инновационной плазменной технологии упрочнения колесных пар» по договору №132 от «12» марта 2018 г.

1.2 Сумма Договора 42 500 (сорок две тысячи пятьсот) тенге.

1.3 Заказчик производит предварительную оплату в размере 30% от общей суммы Договора. Окончательная оплата Исполнителю производится Заказчиком в срок не превышающего 5 (пять) календарных дней со дня предоставления акта выполненных работ.

1.4 Исполнитель в период работы подчиняется непосредственно руководителю проекта.

1.5 Услуги должны быть оказаны не позднее 01 ноября 2019 г.

1.6 Основное место работы Исполнителя: докторант КАТУ им. С.Сейфуллина.

1.7 После оказания услуг, настоящий договор может быть продлен по соглашению сторон, или между ними может быть заключен новый договор.

1.8 По соглашению Сторон действие договора может быть продлено, если по истечении срока действия договора работа, указанная в п. 2.1.1, не будет выполнена по объективным причинам;

1.9 Оказание услуг Заказчику не является основным местом работы Исполнителя.

#### 2 Обязанности сторон

2.1 Исполнитель обязан:

2.1.1 Оказать следующие услуги в соответствии с технической спецификацией (Приложение 1).

2.1.2 Соблюдать трудовую, производственную и финансовую дисциплину и добросовестно относиться к исполнению услуг, указанных в п. 2.1.1 настоящего договора.

2.1.3 Не разглашать информацию и сведения, являющиеся коммерческой тайной Заказчика.

2.1.4 Выполнять качественно и своевременно поручения, задания и указания руководящих должностных лиц Заказчика, данных ими в соответствии с их компетенцией.

2.1.5 Не давать интервью, не проводить встречи и переговоры, касающиеся деятельности Заказчика, без разрешения его администрации.

2.2 Заказчик обязуется:

2.2.1. Предоставить Исполнителю все необходимые материалы и документы в соответствии с условиями настоящего трудового договора. Заказчик вправе требовать от Исполнителя оказания услуг, не обусловленных настоящим договором, только в случаях, предусмотренных действующим законодательством Республики Казахстан.

2.2.2 Выдать Исполнителю экземпляр настоящего договора и приложений к нему.

### 3 Ответственность сторон

3.1 В случае неисполнения или ненадлежащего исполнения Исполнителем своих обязанностей, указанных в настоящем договоре, нарушения законодательства, правил трудового распорядка, а также причинения Заказчику материального ущерба, он несет дисциплинарную, материальную и иную ответственность согласно действующему законодательству.

3.2 При одностороннем расторжении договора Исполнителем настоящего договора, сумма предварительной оплаты возвращается в полном объеме Заказчику.

### 4 Прекращение договора

4.1 Основанием для прекращения настоящего договора являются:

4.1.1 Соглашение сторон.

4.1.2 Расторжение договора по инициативе Исполнителя по основаниям, предусмотренным законодательством.

4.1.3 Расторжение договора по инициативе Заказчика по основаниям, предусмотренным законодательством.

### 5 Особые условия

5.1 Условия настоящего договора носят конфиденциальный характер и разглашению не подлежат.

5.2 Во всем остальном, что не предусмотрено настоящим договором, стороны руководствуются действующим законодательством.

5.3 Споры между сторонами, возникающие при исполнении договора, рассматриваются в порядке, установленном действующим законодательством.

5.4 Договор составлен в 3-х экземплярах, имеющих одинаковую юридическую силу, два из которых хранятся у Заказчика, а другой у Исполнителя.

### Подписи сторон:

#### ЗАКАЗЧИК:

РГП на ПХВ «Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева» МОН РК  
010008, г. Астана, ул. Сатпаева, 2  
Тел. 8 (7172) 70-95-46, 70-94-56  
ИИК KZ816 010 111 000 363 791  
АО «Народный Банк Казахстана»  
БИК HSBKZKZKX  
БИН 010 140 003 594  
КБЕ 16

#### ИСПОЛНИТЕЛЬ:

Сарсембаева Толкын Ержановна  
г. Астана, ул. Д.Карбышева, д. 49  
Тел. 8-707-841-74-825  
№ уд/лич 022734254 от 25.08.2008 г.  
МЮ РК  
ИИН 820501400724  
ИИК KZ67 6010 0020 0127 1692  
АО «Народный банк»

Проректор  
по научно-исследовательской работе



Г. Мерзалинова

м.п.

Т. Сарсембаева

Руководитель проекта

А. Канаяв



**Техническая спецификация**

По договору №132 от «12» марта 2018 года

**Приоритет:** Рациональное использование природных, и том числе водных ресурсов, геология, переработка, новые материалы и технологии, безопасные изделия и конструкции

**Подприоритет:** Производство и обработка металлов и материалов

**Тема проекта:** AP05131581 «Развитие кластера железнодорожного машиностроения в Казахстане внедрением инновационной плазменной технологии упрочнения колесных пар»

**Наименование работ, сроки их реализации и результаты**

Шифр задания, этапа согласно календарного плана	Наименование работ по Договору и основные этапы его выполнения	Срок выполнения	Ожидаемый результат
8	Исследования по выбору оптимального диапазона твердости в паре трения «колесо-рельс», обеспечивающего повышение износостойкости.	до 1 ноября 2019 г.	Будут проведены исследования по выбору оптимального диапазона твердости в паре трения «колесо-рельс», обеспечивающего повышение износостойкости.

**ЗАКАЗЧИК:**

РГП на ПХВ «Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева» МОН РК

Проректор  
по научно-исследовательской работе



Г. Мерзалинова

мл.

Руководитель проекта

А. Канаев

**ИСПОЛНИТЕЛЬ:**

Сарсембаева Толкын Ержановна

Т. Сарсембаева

Министерство образования и науки Республики Казахстан

НЕКОММЕРЧЕСКОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «ЕВРАЗИЙСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Д.Н. ГУМИЛЕВА»  
(ЕНУ им. Л.Н.Гумилева)

УДК 621.791.9: 629.4.027  
№ гос. регистрации 0118РК00627  
Инв. №

УТВЕРЖДАЮ:  
Ректор НАО  
«ЕНУ им. Л.Н.Гумилева»




ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

РАЗВИТИЕ КЛАСТЕРА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ В  
КАЗАХСТАНЕ ВНЕДРЕНИЕМ ИННОВАЦИОННОЙ ПЛАЗМЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ  
УПРОЧНЕНИЯ КОЛЕСНЫХ ПАР  
(заключительный)

Руководитель темы  А. I. Канаяев  
ИЗДАНИЕ: 2020

Нур-Султан 2020

**СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ**

Руководитель НИР	 подпись, дата	А.Т. Канаев
Главный научный сотрудник, д-р. техн. наук		(Введение, разделы 1; 1,1-1,3; 2; 2,1-2,2; Заключение)
Исполнители:		
Старший научный сотрудник, канд. техн. наук	 подпись, дата	Д.Р. Орынбеков (разделы 1; 1,2-1,3; 2; 2,1)
Старший научный сотрудник, канд. техн. наук	 подпись, дата	А.В. Богомолов (раздел 2; 2,1)
Старший научный сотрудник, инженер-технолог	 подпись, дата	И.Н. Дылко (раздел 2; 2,2)
Младший научный сотрудник, докторант	 подпись, дата	Т.Е. Сарсембаева (раздел 1; 1,3)
Младший научный сотрудник, докторант	 подпись, дата	С.К. Буйжанов (раздел 2; 2,2)
Нормаконтроль	 подпись, дата	А.Е. Молдахметова

669:621.785(047.31)  
P17

Министерство образования и науки Республики Казахстан  
Комитет науки

АО «КАЗАХСКИЙ АГРОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ С.СЕЙФУЛЛИНА»

МРНТИ 55.21.99  
УДК 669.01: 621.785  
№ гос. регистрации 0115РК00454  
Инв. № 0217РК02076

УТВЕРЖДАЮ:  
Проректор по научной  
и инновационной деятельности  
АО «КАГУ им. С.Сейфуллина»  
И.Токбергенов  
« / » 2017 г.

ОТЧЕТ

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Разработка инновационной технологии и оборудования для организации  
производства новых термоупрочненных материалов, востребованных  
стройиндустрией страны  
(Заключительный)

500704

Бюджетная программа 217 «Развитие науки», подпрограмма 102  
«Грантовое финансирование научных исследований» на 2015-2017 гг.


Научный руководитель НИР  А.Т. Канаев




Астана 2017

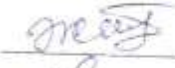
### СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ


Руководитель НИР,  
д.т.н., профессор  
проектом, введение  
разделы 1, 2, 3; заключение)  
Исполнители темы:


 А.Т. Канаев (руководство

СНС, к.т.н., доцент  А. В. Богомолов (2.1; 2.2; 2.3)

СНС, к.т.н., доцент  Г. К. Тайманова (1.2,1.3)

СНС, к.т.н., доцент  Б.Т. Жусин (1.1; 1.3)

МНС, докторант  Т.Е. Сарсембаева (1.1; 1.2; 1.3)

Нормоконтролер  Г.Мауина

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### Акт об использовании в учебном процессе результатов НИР

«Утверждаю»  
Первый проректор НАО КАТУ  
им. С. Сейфуллина  
Абдыров А.М.  
2020 г.



#### АКТ об использовании в учебном процессе результатов НИР докторанта PhD Сарсембаевой Толкын Ержановны

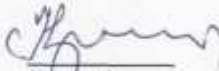
Мы, нижеподписавшиеся, декан технического факультета д.т.н., профессор Нукешев С.О, заведующая кафедрой «Стандартизация, метрология и сертификация» Курмангалиева Д.Б и научный руководитель докторанта д.т.н., профессор Канаев А.Т., составили настоящий АКТ об использовании результатов научных исследований по теме докторской диссертации Сарсембаевой Т.Е «Исследование плазменного упрочнения цельнокатаных колес для повышения технического уровня обработки и качества по международному стандарту ИСО 1005-6» в учебном процессе для подготовки бакалавров по специальности «Стандартизация, метрология и сертификация».

Результаты исследований Сарсембаевой Т.Е используются при проведении лабораторных и практических работ по дисциплинам «Метрология» и «Испытание, контроль и безопасность продукции».

Эффект от использования результатов НИР:

- 1) обучение студентов методике приготовления образцов металлов и сплавов для микроскопического исследования;
- 2) изучение и освоение устройства оптического исследовательского микроскопа;
- 3) обучение студентов определению твердости металлических материалов.

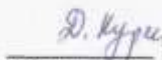
Декан факультета,  
д.т.н., профессор



(подпись)

Нукешев С.О.

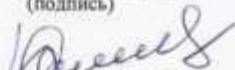
Зав.кафедрой «СМС»,  
д.т.н., доцент



(подпись)

Курмангалиева Д.Б.

Научный руководитель,  
д.т.н., профессор



(подпись)

Канаев А.Т.

PhD докторант



(подпись)

Сарсембаева Т.Е.

*Канаев А. Т., Жусип Б. Т., Ибжанова А.А., Т.Е. Сарсембаева*

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к лабораторным работам «Изучение устройства оптического  
исследовательского микроскопа и приготовление микропрепарата для  
изучения микроструктуры»

по дисциплине Метрология  
для специальности 5В073200-«Стандартизация, сертификация и  
метрология»

Астана 2016

А.Т.Қанаев, Т.Е.Сарсембаева, А.А.Ибжанова, С.К.Байжанов.

5В073200 - «Стандартты және сертификатты» мамандығының студенттері үшін «Сынау, бақылау және есеп Кәуіпсіздігі» тіршілік еткен зертханалық жұмыстарға «Металл материалдардың қаттылығын анықтау» тақырыбына арналған  
**ӘДІСТЕМЕЛІК НУСКАУ**



Астана 2018



## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Фотографии микроструктур по сечению упрочненной зоны



Рисунок Г.1 – Зона исходной структуры и твердости, 404 HV, x200

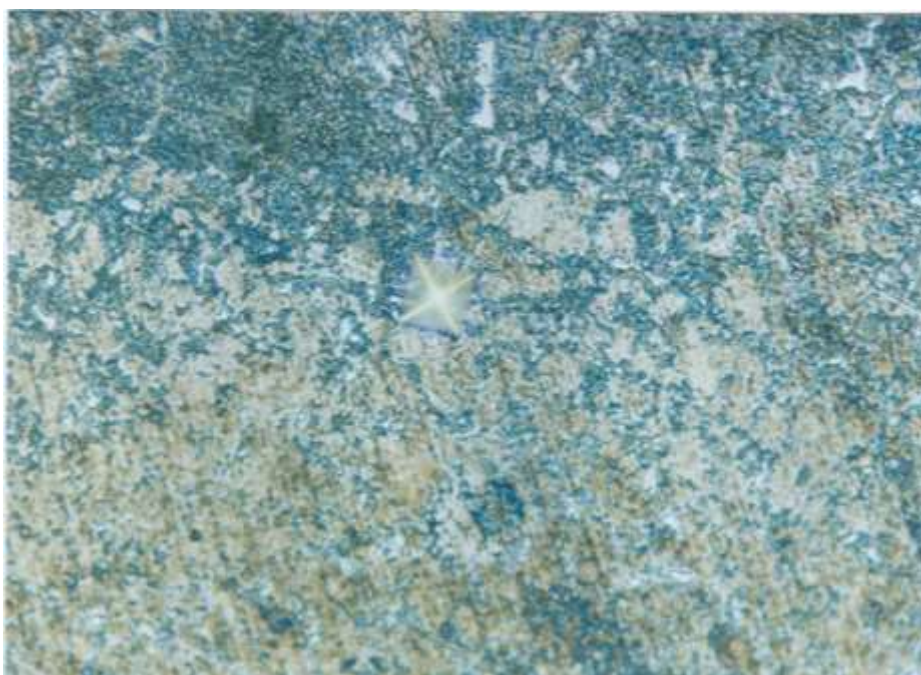


Рисунок Г.2 – Пограничная зона, 646,9 HV, x500



Рисунок Г.3 – Структура зоны микроплавления поверхности,  
1589 HV, x100

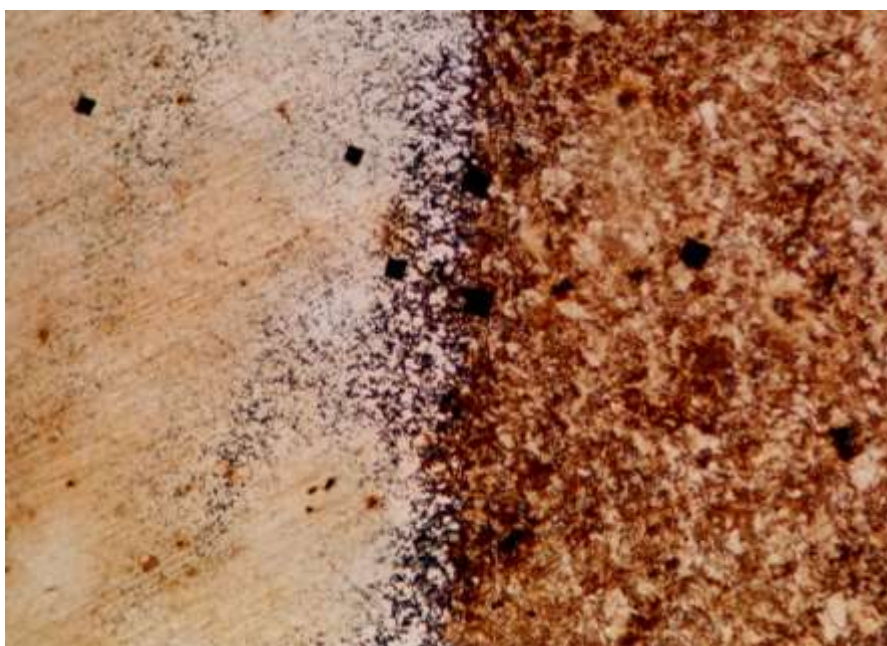


Рисунок Г.4 – Переходная зона от аморфной структуры к  
кристаллической, 1021 HV, x100

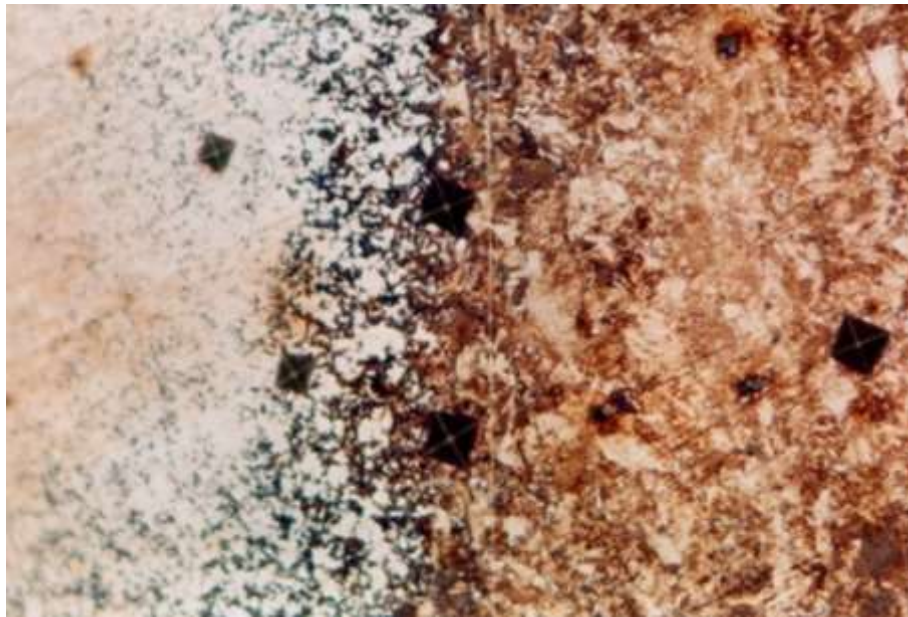


Рисунок Г.5 – Переходная зона от аморфной структуры к кристаллической, 1012,9 HV6 x200

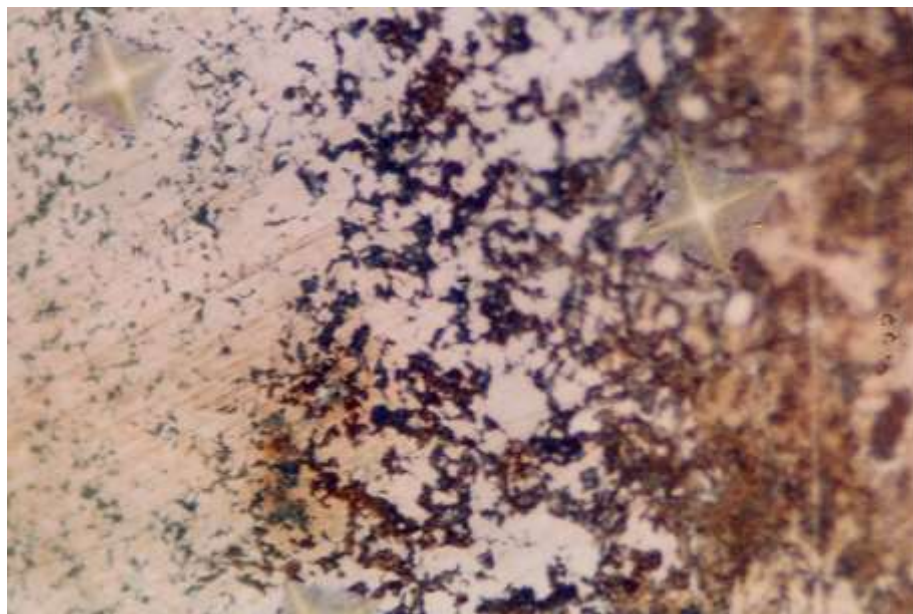


Рисунок Г.6 – Переходная зона от аморфной структуры к кристаллической, 820,3 HV, x500

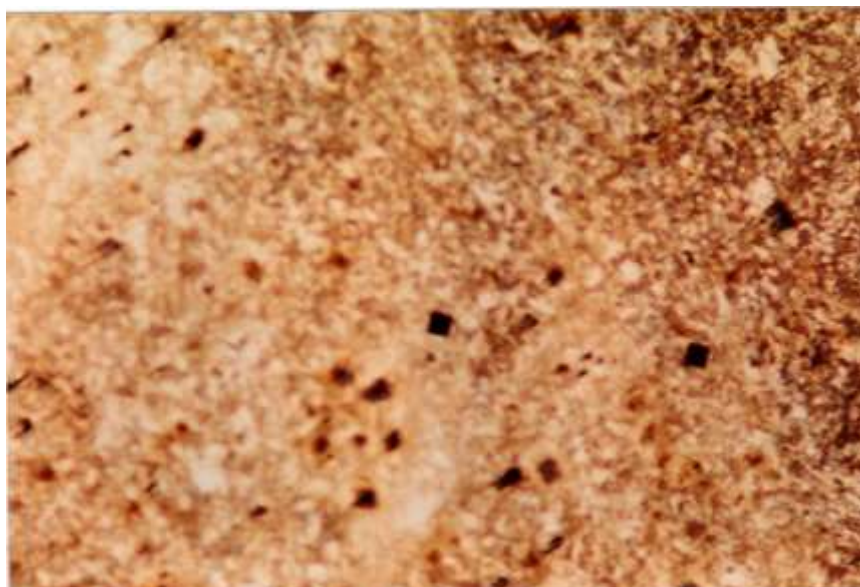


Рисунок Г.7 – Зона термического влияния, 662,7 HV, x100

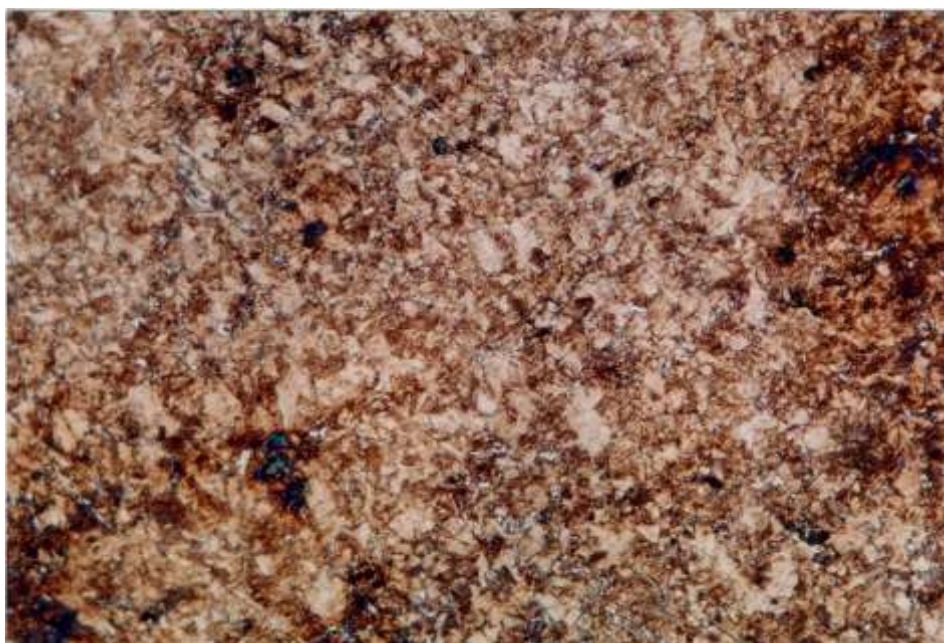


Рисунок Г.8 – Зона термического влияния, 443 HV, x200

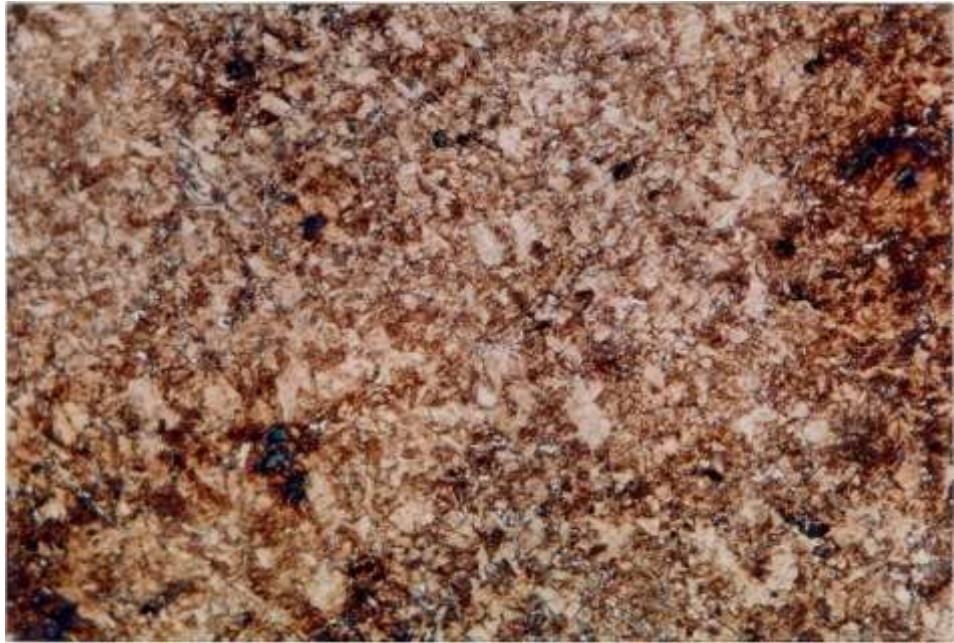

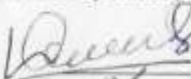




Рисунок Г.9 – Зона исходной структуры, 404,6 HV, x200

## ПРИЛОЖЕНИЕ Д

### Акты испытания

	Утверждаю: Проректор по НИР ЕНУ им. Л.Н. Гумилева ..... Т.Т. Мерзалинова		Утверждаю: ..... Скобелев И.Д.
<b>Акт испытания установки для ручной плазменной закалки УДГЗ -200</b>			
<p>От ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, г. Нур-Султан, Алматинский район, ул. К. Сатпаева,2 Руководитель проекта, д. т. н., профессор Канаев А.Т., МНС, докторант Бийжанов С.К.; МНС, докторант Сарсембаева Т.И. От ИП OIL «TIM», г. Нур-Султан, Алматинский район, ул. Пушкина 24/1 ИП Скобелова Д.К. № уведомления KZ44UWQ00309313 от 06.09.2017 Инженер – Астафьев В.Н. Сварщик-термист - Есенбаев Е.С.</p>			
<p>Составили настоящий акт испытания в том, что по договору № 5 о закупках научных средств в рамках проведения научных исследований по теме «Развитие кластера железнодорожного машиностроения в Казахстане внедрением инновационной плазменной технологии упрочнения колесных пар» между Республиканским государственным предприятием «Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева» и ИП OIL «TIM» испытана установка для ручной плазменной закалки УДГЗ -200</p>			
<p>После монтажа и настройки установки для ручной плазменной закалки УДГЗ -200 было проведено опытно-промышленное испытание установки в следующих условиях: Напряжение сети - 380 В, мощность 7 кВт, В качестве плазмообразующего (рабочего) газа использован аргон.</p>			
<p>Закалка гребня и обода происходила с охлаждением за счет отвода тепла во внутренние слои массивного образца, вырезанного из цельнокатаного железнодорожного колеса. В ходе опытно-промышленного испытания установки УДГЗ-200 <i>был получен</i> поверхностный закаленный слой со следующей характеристикой:</p>			
<p>Твердость на углеродистой стали марки 2 по ГОСТ10791-2011 (C-0,55-0,63%), HRC~55, Глубина закалки ~1,0 мм, диаметр сопла <math>\varnothing_{\text{внутр}} = 12\text{мм}</math></p>			
<p>В ходе опытно-промышленного испытания было показано, что установка поставляется согласно представленной технической характеристике и обеспечивает необходимую глубину закаливаемой поверхности ~ 1 мм и твердостью HRC ~ 55.</p>			
Подписи представителей ЕНУ им. Л.Н. Гумилева		Подписи представителей ИП OIL «TIM»	
 Канаев А.Т.,		 Скобелева Д.К.	
 Бийжанов С.К.		 Астафьев В.Н.	
 Сарсембаева Т.Е.		 Есенбаев Е.С.	

Утверждаю:  
Проректор по ИУМ ИДБ  
им. Л.Н. Гумилева Т. Мерзалинова



Утверждаю:  
И.о. генерального директора  
ТОО «Проммашкомплект» Г.Н. Дычко



**Акт испытания механизма вращения колесной пары**

От ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, г. Астана

Руководитель проекта, доктор технических наук, профессор Канаев А.Т.,  
ВНС, кандидат технических наук, ассоц. профессор Богомолов А.В.  
МНС, докторант Бийжанов С.К., МНС, докторант Сарсембаева Т. Е.

От ТОО «Проммашкомплект», г. Экибастуз Павлодарской области

Дычко Иван Николаевич, Заместитель директора по производству,  
Екатериушкин Олег Юрьевич, Главный инженер,  
Смирнов Алексей Вячеславович, Начальник службы эксплуатации оборудования

Составили настоящий акт испытания в том, что по договору № 53 о закупках услуг в рамках проведения научных исследований по теме «Развитие кластера железнодорожного машиностроения в Казахстане внедрением инновационной плазменной технологии упрочнения колесных пар» между Республиканским государственным предприятием «Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева» и ТОО «Проммашкомплект» разработана конструкторская документация, рабочие чертежи и изготовлен механизм вращения колесной пары установки поверхностной плазменной закалки железнодорожных колес.

Механизм вращения оснащен мотор-редуктором SK 9023 1-63L/4, мощность двигателя – 0,18kW, скорость на выходе – 1360/1,8 1/min, крутящий момент на выходе 955 Nm.

После монтажа в заводских условиях механизма вращения колесной пары было проведено опытно-промышленное опробование. В ходе опытно-промышленного опробования было показано, что механизм вращения колесной пары изготовлен согласно технической характеристике и обеспечивает частоту вращения колесной пары 0,143 об/мин, что соответствует полному обороту колеса за 7,0-7,5 минуты. Отмечено, что механизм вращения колесной пары обеспечивает вращение равномерно, без рывков, что исключает неровности на контактной поверхности колеса и дефекты в виде кратеров и микроплавления, имеющие важное значение при поверхностной плазменной закалке.

Подписи представителей Евразийского  
национального университета  
им. Л.Н. Гумилева

Подписи представителей ТОО «Проммашкомплект»

Канаев А.Т.  
Богомолов А.В.  
Бийжанов С.К.  
Сарсембаева Т.Е.

Дычко И.Н.  
Екатериушкин О.Ю.  
Смирнов А.В.

УТВЕРЖДАЮ  
Проректор по научной работе  
ЕНУ имени Л.Н. Гумилева  
Мерзадинова Г.Т.



УТВЕРЖДАЮ  
И.о. генерального директора  
ТОО «Проммашкомплект»  
Матасов Д.Е.



## АКТ ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ

по научному проекту

«Развитие кластера железнодорожного машиностроения в Казахстане  
внедрением инновационной плазменной технологии упрочнения колесных пар»

г. Экибастуз

01.10.2019 г.

Мы, нижеподписавшиеся, представители «Исполнителя» ТОО «Проммашкомплект» – главный инженер СП Апкаев Руслан Абдулгалимович, начальник службы эксплуатации оборудования СП Смирнов Алексей Вячеславович, заместитель директора по производству ТОО «R.W.S. Wheelset» Дычко Иван Николаевич и представители «Заказчика» в лице научного руководителя проекта Канаева Амангельды Токешевича, старшего научного сотрудника Богомолова Алексея Витальевича, докторантов-исследователей Сарсембаевой Толкын Ержановны и Бийжанова Серика Каимовича составили настоящий акт о нижеследующем:

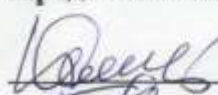



Согласно календарному плану проекта и договора о научно-техническом сотрудничестве №53 от 25.06. 2018г. на территории ТОО «Проммашкомплект» были проведены опытно-промышленные испытания технологии плазменного упрочнения железнодорожных колес грузовых вагонов.

На изготовленный механизм вращения колесной пары была установлена колесная пара. Для упрочнения использовали установку плазменной закалки УДГЗ-200.




1. Технические характеристики механизма вращения колесной пары установки плазменного упрочнения колес грузовых вагонов соответствуют приложению 1 к договору №53 от 25.06. 2018г., привод механизма вращения с цилиндро-коническим мотор-редуктором марки SK9023.1-63L/4 обеспечивает равномерное вращение колесной пары с заданными техническими характеристиками.

2. Технологические параметры процесса плазменной обработки были соблюдены согласно руководства по эксплуатации установки плазменной закалки УДГЗ-200. Считать работы по изготовлению механизма вращения колесной пары установки плазменного упрочнения колес грузовых вагонов выполненными и рекомендовать технологию плазменного упрочнения колесных пар с использованием данного механизма к внедрению.

Представители Заказчика:

 А.Т.Канаев  
 А.В.Богомолов  
 Т.Е. Сарсембаева  
 С.К. Бийжанов

Представители Исполнителя:

 Р.А. Апкаев  
 А.В. Смирнов  
 И.Н. Дычко