ОАО «Научно-исследовательский институт металлургической теплотехники» –
ОАО «ВНИИМТ»
ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н.Ельцина»

На правах рукописи

ЗАХАРЧЕНКО Мария Владимировна

РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ УСТРОЙСТВА И ТЕХНОЛОГИИ УСКОРЕННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛА РЕЛЬСОВЫХ НАКЛАДОК

05.16.02 – Металлургия чёрных, цветных и редких металлов

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Ярошенко Юрий Гаврилович

Екатеринбург – 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ…….. …..4
1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СВОЙСТВ РЕЛЬСОВЫХ НАКЛАДОК……..... ….10
1.1 Анализ технологий и способов получения заданных механических характеристик железнодорожного проката…….. ….19
1.2 Охлаждающие среды и способы охлаждения в технологиях упрочнения стальных изделий……..... ….26
1.3 Анализ тепловых режимов охлаждения стального проката при его термоупрочнении…….33
1.4 Выводы и задачи исследования…… ….41
2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ СТРУЙНОМ ВОДЯНОМ ОХЛАЖДЕНИИ РЕЛЬСОВОЙ НАКЛАДКИ……... ….43
2.1 Математическое моделирование охлаждения рельсовой накладки в баке с маслом……..... ….44
2.2 Математическое моделирование охлаждения рельсовой накладки плоскими струями воды и обоснование выбора конструкции устройства…… ….49
2.3 Экспериментальная установка для реализации процесса струйного Охлаждения рельсовой накладки…….. ….62
2.4 Теплотехнические эксперименты по охлаждению накладки и адаптация математической модели…….…….. ….66
2.5 Технологические эксперименты и полученные результаты механических свойств накладки…….. ….78
2.6 Выводы по разделу……..…….. ….84
3 ПРОМЫШЛЕННОЕ ВНЕДРЕНИЕ СТРУЙНОГО ВОДЯНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ РЕЛЬСОВОЙ НАКЛАДКИ НА ФИЛИАЛЕ ОАО «ЕВРАЗ НТМК»-НСМЗ…..... ….86
3.1 Устройство закалки накладок и тепловые режимы его работы…… ….91

3.2 Результаты исследования механических свойств, прямолинейности и микроструктуры рельсовой накладки……... …100
3.3 Выводы по главе……...……..…106
ЗАКЛЮЧЕНИЕ……...……. …108
СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ…… …111
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ……..……. …113
Приложение А – К расчёту параметров конструкции устройства…….. …125
Приложение Б – Характеристики приборов измерительного комплекса…….. …127
Приложение В – Микроструктуры нижней головки рельсовой накладки.....… …128
Приложение Г – Микроструктуры верхней головки рельсовой накладки..…... …129
Приложение Д – Данные о метрологическом обеспечении исследований тепловых режимов УЗН…….…….. …130
Приложение Е – Микроструктуры шейки рельсовой накладки в горячекатаном состоянии…… …131
Приложение Ж – Микроструктуры верхней головки рельсовой накладки (%С=0,57) после термоупрочнения в объёме масла…… …132
Приложение И – Микроструктура верхней головки рельсовой накладки (%С=0,57) после охлаждения в УЗН (х1000)……..…….. …133
Приложение К – Микроструктура верхней головки рельсовой накладки (%С=0,57) после охлаждения в УЗН (х2000)……..…….. …134
Приложение Л – Микроструктуры верхней головки рельсовой накладки (%С=0,485) после термоупрочнения в объёме масла…….. …135
Приложение М – Микроструктура верхней головки рельсовой накладки (%С=0,50) после охлаждения в УЗН (х2000)…… …136

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. В 2008 году Правительством Российской Федерации была утверждена Стратегия развития железнодорожного транспорта в России до 2030 года, которая предусматривает расширение сети железных дорог. Рельсы и рельсовые скрепления являются основными элементами верхнего строения пути, которые в значительной степени определяют безопасность и скорость движения составов по железной дороге. В свою очередь, одним из ответственных элементов рельсового стыка является рельсовая накладка. Российскими стандартами предъявляются высокие требования к механическим свойствам накладок, для обеспечения которых необходима термическая обработка. Согласно ГОСТ 4133-73 рельсовые накладки подвергают объёмной закалке в масле, что является неуправляемым, неэкологичным и дорогостоящим процессом. Эта технология требует не только сложного сопутствующего оборудования, но и оборудования по утилизации отработанного масла, а работа персонала происходит в тяжёлых условиях. Невозможность регулирования скорости охлаждения в различных температурных интервалах не всегда позволяет обеспечить после термообработки оптимальное сочетание прочностных и пластических свойств изделий, минимизировать напряжения. Существуют технологии ускоренного охлаждения, где в качестве охлаждающего агента используются струи воды, что делает технологический процесс экологически чистым и экономичным. Применением технологий ускоренного охлаждения можно успешно заменить закалку изделий в масляных, щелочных, селитровых баках, таким образом, устранить пожароопасность, загрязнение окружающей среды, вредность для здоровья персонала, проблемы старения и утилизации охладителей, существенно можно понизить себестоимость готовых изделий за счёт уменьшения процентного содержания легирующих добавок. Возможность регулирования скорости охлаждения при водяном охлаждении позволяет получить требуемую структуру металла, а, следовательно, стабильные значения механических свойств и служебных характеристик, что недостижимо для изделий, за-

каливаемых погружением в бак. Особенно актуальна возможность управления процессом охлаждения для несимметричных разномассивных изделий, к которым относится рельсовая накладка. Технологии ускоренного водяного охлаждения реализованы для ряда изделий простой формы: пруток, толстый лист и т.п., а также опробованы для изделий сложной формы – рельсовая подкладка, головка рельса, насосная штанга. Таким образом, разработка конструкции устройства и технологии ускоренного охлаждения рельсовой накладки является актуальной задачей. Под разработкой технологии в данной работе понимается определение тепловых режимов работы устройства ускоренного струйного водяного охлаждения, на которых обеспечиваются механические свойства рельсовой накладки.

Цель работы. Разработка конструктивных параметров устройства и технологии ускоренного струйного водяного охлаждения с широким спектром режимов охлаждения рельсовой накладки Р50 и Р65 из рельсовой полосы различного химического состава и внедрение этой технологии и устройства на участке производства рельсовых накладок филиала ОАО «ЕВРАЗ НТМК» - Нижнесалдинский металлургический завод (НСМЗ).

Задачи исследования

Для реализации поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи:

1. Провести математическое моделирование процесса охлаждения рельсовой накладки как в баке с маслом, так и струями воды с учетом специфики закономерностей теплообмена на поверхности изделия при объёмном охлаждении в масле и струйном водяном.

2. Определить на основе математического моделирования процесса струйного водяного охлаждения основные конструктивные и режимные параметры устройства.

3. Провести экспериментальное исследование процесса струйного водяного охлаждения накладки в стендовых условиях для получения экспериментальных зависимостей температурного поля накладки от режима охлаждения для опреде-

ления режимов работы устройства, при которых достигаются требования к механическим свойствам и прямолинейности накладки, уточнения конструктивных параметров устройства и получения данных для адаптации математической модели.

4. Внедрить в эксплуатацию промышленное устройство струйного водяного охлаждения рельсовой накладки. Определить режимы работы устройства в условиях производства, при которых достигаются требования к качеству накладок, изготовленных из полосы различного химического состава.

5. Получить экспериментальные данные для адаптации математической модели к расчёту процесса струйного водяного охлаждения несимметричных изделий с разномассивными элементами.

Для достижения поставленных задач:

1. проведено математическое моделирование охлаждения накладки в объёме масла на основе зависимости среднего коэффициента теплоотдачи от температуры поверхности изделия, полученной по данным разных авторов. Моделирование осуществлялось с применением ранее разработанной в ОАО «Научно-исследовательском институте металлургической теплотехники» - ОАО «ВНИИМТ» математической модели, в основе которой – решение двумерного уравнения нестационарной теплопроводности с учётом зависимости теплофизических характеристик материала от температуры.

2. проведено математическое моделирование процесса струйного охлаждения рельсовой накладки с учётом зависимости плотности теплового потока на её поверхности от плотности орошения водой, полученной при охлаждении плоского раската.

3. проведены исследования процесса охлаждения накладки на экспериментальной установке Центра новых систем охлаждения и термоупрочнения металлов ОАО «ВНИИМТ». Установка оснащена современным измерительным комплексом, предел погрешности которого не превышает значений, допустимых для

инженерных экспериментов. При анализе результатов были использованы методы расчётно-статистического анализа.

4. проведены исследования процесса термоупрочнения накладки на промышленном устройстве, смонтированном на участке производства накладок Цеха рельсовых скреплений филиала ОАО «ЕВРАЗ НТМК» - Нижнесалдинский металлургический завод.

Научная новизна

1. получены экспериментальные и расчётные данные по изменению температурного поля накладки в процессе её струйного водяного охлаждения.

2. определены режимные характеристики устройства охлаждения, установлены соотношения расходов на поверхности разномассивных элементов накладки (верхняя, нижняя, боковая поверхности), при которых обеспечивается прямолинейность изделия и требуемые механические свойства.

3. получены зависимости плотности теплового потока от плотности орошения для процесса струйного охлаждения накладки, по которым проведена адаптация математической модели процесса.

Практическая значимость

1. Разработано и внедрено в промышленную эксплуатацию в цехе филиала ОАО «ЕВРАЗ НТМК» - Нижнесалдинский металлургический завод устройство ускоренного струйного охлаждения рельсовой накладки, в котором реализован экологически чистый способ струйного водяного охлаждения.

2. На промышленном устройстве обработаны партии накладок из накладочной полосы производства ОАО «Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» и ОАО «Нижне-Тагильский металлургический комбинат», отличающиеся содержанием углерода. Получены соответствующие требованиям нормативной документации механические свойства накладок.

3. Математическая модель адаптирована для расчёта струйного водяного охлаждения тела несимметричного профиля с разномассивными элементами и мо-

жет быть использована для прогнозного расчета конструкции устройства охлаждения.

На защиту диссертации выносятся следующие положения:

1. Результаты математического моделирования процесса охлаждения накладки в масляном баке.
2. Результаты математического моделирования процесса охлаждения накладки струями воды.
3. Режимные и конструктивные параметры устройства струйного водяного охлаждения, обеспечивающие получение требуемых механических свойств и прямолинейность готового изделия.
4. Полученные аналитические зависимости плотности теплового потока от плотности орошения в промышленном устройстве.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались: на XVI Уральской международной конференции молодых учёных (секция «Металлургия») в 2009 г., I Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве» в 2012 г., на IX Конгрессе прокатчиков в 2013 г., II Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных с международным участием «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве» в 2013 г., научно-практической конференции с международным участием и элементами школы для молодых учёных «Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершённых фундаментальных исследований и НИОКР» в 2013 г., международной научно-практической конференции «Творческое наследие В.Е. Грум-Гржимайло» в 2014 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 19 печатных работ, из них 3 – в изданиях, рекомендованных ВАК для опубликования результатов кандидатской диссертации.

Личный вклад автора. Настоящая работа является обобщением результатов расчётных и экспериментальных исследований по выбору типа, установлению рациональных конструктивных и режимных параметров, созданию и запуску в промышленную эксплуатацию устройства ускоренного охлаждения рельсовой накладки, проведенных в ОАО «ВНИИМТ», при непосредственном участии автора как ответственного исполнителя.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, списка литературы, включающего 101 наименование, и приложений, содержит 136 страниц, 49 рисунков и 24 таблицы по тексту, 17 формул, а также 12 страниц приложений.

1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СВОЙСТВ РЕЛЬСОВЫХ НАКЛАДОК

Железнодорожные перевозки являются преобладающими в российской транспортной системе: на их долю приходится более 40% от грузооборота по всем видам транспорта в стране [1]. Эксплуатационная длина железнодорожных путей к началу 2012 года составила 85,5 тыс.км. [2] – по общей протяжённости это третье место после США и Китая.

Правительством Российской Федерации была утверждена Стратегия развития железнодорожного транспорта в России до 2030 года [3], которая включает два этапа: этап модернизации (завершится в 2015 году) и этап динамичного расширения сети железных дорог (с 2016 по 2030 годы). Последний предусматривает создание инфраструктурных условий для развития новых точек экономического роста в стране, выход на мировой уровень и повышение конкурентоспособности российского железнодорожного транспорта. В таблице 1.1 приведены данные по планируемому объёму расширения сети железных дорог согласно максимальному и минимальному вариантам развития второго этапа (с 2016 по 2030 годы).

Таблица 1.1 – Ориентировочная протяжённость новых линий железных дорог в России к 2030 году [3]

Категории железнодорожных линий	Протяжённость согласно минимальному варианту развития, км	Протяжённость согласно максимальному варианту развития, км
Стратегические	2246	4112
Социально значимые	1262	1262
Грузообразующие	4573	4660
Технологические	7277	9168
Высокоскоростные	659	1528
Всего	16017	20730

Уже к 2015 году прогнозируют, что доля тяжеловесного грузооборота для Уральского, Центрального, Южного и Северо-Западного регионов возрастёт до 40-50 процентов, а к 2030 г. превысит 50 процентов от общего объёма перевозок.

Планируется увеличение интенсивности движения на подходах к Уралу в 1,3 раза, а также ожидается рост в 1,5 раза пассажирских поездопотоков по всем основным направлениям. Данные по увеличению протяжённости железных дорог в Уральском Федеральном округе (УрФО) без учёта смежных урало-сибирских линий представлены в таблице 1.2. Приведённая информация справедлива для железной дороги широкой колеи, узкая колея не рассматривается, т.к. такое полотно имеет сугубо служебное назначение и ограниченное применение на небольших станциях.

Таблица 1.2 – Увеличение протяжённости железных дорог в УрФО к 2030 году (согласно минимальному плану развития [3])

Категории железнодорожных линий	Направление	Ориентировочная протяжённость, км
Высокоскоростные	Челябинск-Магнитогорск	417
Строительство главных путей	Полуночное-Обская-Салехард	856
	Ханты-Мансийск-Салым	200
	Русское-Заполярная	49
	Муслюмово-Теченское	20
	Паюта-Бованенково	331
	Бованенково-Харасавэй	130
	Паюта-Новый Порт	208
	Салехард-Надым	406
	Коротчаево-Русское	122
Повышение пропускной способности и строительство вторых, третьих и четвёртых главных путей	Богданович-Алапаевск-Смычка	210,5
	Путёвка-Богданович	90
	Челябинск-Нижняя-Каменск-Уральский	56
	Северный обход Свердловского железнодорожного узла	30
	Тобольск-Сургут	199
	Сургут-Ульт-Ягун	34,8
Всего		3359,3

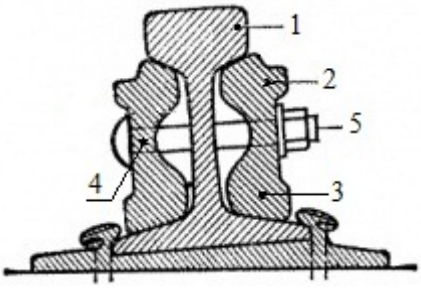
Очевидно, что реализация Стратегии [3] по увеличению сети железнодорожных перевозок, представленных в таблицах 1.1 и 1.2, потребует развития соответствующего металлургического производства железнодорожного проката: для решения упомянутых задач необходимо как увеличение объёмов производст-

ва специального фасонного проката, так и повышение качества готовой продукции, в том числе за счёт разработки и внедрения новых технологических приёмов термоупрочнения.

Рельсы и рельсовые скрепления являются ответственными элементами верхнего строения пути. Каждый элемент во взаимосвязи с другими образует единую конструкцию, безопасность которой зависит от состояния и положения элементов в отдельности и относительно друг друга.

Известно, что самое напряжённое место – это стыковое соединение рельсов, которое для уменьшения износа концов располагают «на весу» [4]. Стык рельсов представлен на рисунке 1.1. Как видно из рисунка 1.1, рельсы скрепляются накладками, прижимаемыми к ним с двух сторон 6 болтами. Именно плотное прилегание накладки к элементам головки и подошвы рельса (рисунок 1.1 б) обеспечивает надёжную фиксацию стыка, поэтому нормативными документами устанавливаются строгие требования к прямолинейности готовых накладок.

а



б

а – общий вид; *б* – вид в разрезе: 1 – головка рельса; 2 – верхняя головка рельсовой накладки; 3 – нижняя головка рельсовой накладки; 4 – шейка накладки; 5 – стыковой болт.

Рисунок 1.1 – Стандартный рельсовый стык с накладками Р65

На стыковое соединение действуют следующие основные силы [5]:

1. вертикальная и боковая (при повороте и вилянии) от колесных пар тележек подвижного состава;
2. продольные сжимающие и растягивающие, связанные с температурными градиентами в течение года;

3. ударно-динамическое воздействие от колёс состава.

В результате ударно-динамического воздействия колёс подвижного состава на стык концы рельсов прогибаются, что приводит к разрушению их головок, усталостному разрыву шеек и болтового крепления, при этом рельсовые накладки работают на изгиб в тяжёлых условиях. Это особенно проявляется в условиях низких температур, при увеличении скорости движения железнодорожного транспорта и его грузоподъёмности [4]. Отмечено [6], что отслоение и выкрашивание металла на поверхности катания головки рельсов происходит в стыковой зоне в два-три раза чаще, чем вне стыка. В работе [7] сообщается, что около 30% ремонтных работ по восстановлению целостности пути приходится именно на стык рельсов.

Служебные свойства рельсовых накладок играют едва ли не ключевую роль в сроке службы рельсового стыка. Как показано в работе [8], зона образования дефектов накладок приходится на зазор между рельсами. В работе [9] приводятся данные, что до 31% процента случаев излома происходит на середине накладки и до 16% трещин – на центре верхней головки, общее количество дефектов составляют 62% изломов и 38% трещин.

Снижение количества стыковых соединений, т.е. строительство так называемого бесстыкового или «бархатного» пути, считается наиболее перспективным благодаря его высоким эксплуатационным качествам. Бесстыковой путь способен обеспечить высокоскоростное движение поездов, снижение расходов на содержание подвижного состава и пути, а также увеличение комфортабельности проезда. Для его создания применяют сварку рельсов в рельсовые плети длиной от 800 м. Чтобы обеспечить потребности бесстыкового пути наряду с выпускаемыми в настоящее время рельсами длиной 25 м, целесообразно производить рельсы длиной до 100 м. Несмотря на то, что ликвидация коротких рельсовых плетей удлинением их сваркой значительно повышает технический уровень путевого хозяйства [10], пока не представляется возможным отказаться от применения накладок на «бархатном» пути. Рельсовые накладки необходимы для соединения уравнительных

пролетов (стыков плетей) и ремонта сварной плети, когда в случае возникновения дефекта на участке рельса в процессе эксплуатации, для его устранения устанавливают накладку, укрепляя её крайними болтами. Такой способ позволяет отказаться от трудоёмкой и дорогостоящей замены всей плети, а также в несколько раз увеличивает рабочий ресурс рельса, предотвращая его излом и повышая безопасность движения [11].

Рельсовые накладки требуют высокого качества изготовления наряду с постоянным контролем их состояния, текущего содержания и своевременной замены. Их эксплуатационные характеристики определяются требованиями к химическому составу, механическим свойствам и др., которые устанавливаются действующей нормативной документацией.

Таким образом, проблема качества накладок является актуальной, особенно, если иметь в виду развитие железнодорожного транспорта в России, для которого сохраняется высокая востребованность рельсовых накладок при строительстве новых путей и ремонте существующих.

Эксплуатационные характеристики рельсовых накладок зависят от способов выплавки и внепечной обработки определенных марок стали, от способов разливки стали, прокатки заготовки и тепловых режимов термоупрочнения прокатанной накладки. Важнейшей стадией в этой «цепочке» технологий является завершающая. Лишь научно разработанные и грамотно реализованные тепловые режимы термоупрочнения способны удовлетворить требованиям действующего на территории России государственного стандарта.

Цель настоящего исследования состоит в выборе оборудования и тепловых режимов его работы для технологии термоупрочнения, внедрение которых обеспечит механические свойства и прямолинейность рельсовых накладок.

Требования стандартов разных стран к химическому составу и механическим характеристикам рельсовых накладок широкой колеи представлены в таблицах 1.3 и 1.4 соответственно.

Таблица 1.3 – Требования разных стран к химическому составу рельсовых накладок железных дорог широкой колеи

Страна	Номер стандарта	Сталь	C, %	Mn, %	Si, %	P, %	S, %	Ni, %	Cr	Cu,%	As,%	Nb,%	Источник
						не более							
Россия	ГОСТ 4199-73	М54	0,45-0,62	0,50-0,85	0,15-0,35	0,04	0,05				0,08		[12]
Китай	TB/T 2345-2008	55	0,52-0,60	0,50-0,80	0,17-0,37	0,035	0,035	0,30	0,25	0,25		-	[13]
		56Nb	0,50-0,62	0,50-0,80	0,20-0,40	0,035	0,035	-	-	-		0,015-0,050	
Индия	T-1-2012	0,40-0,50	0,60-0,90	0,15-0,35	0,04	0,04							[14]
Япония	JIS E 1102:2001	30,37,40N, 50,50N,60	0,35-0,53	0,15-0,35	0,60-0,90	0,030	0,035						[15]
		30H,37H,40NH, 50H, 50NH,60H											
США	ASTM A49-12	Нелегированная и легированная (Nb, V, N)	0,35-0,60	1,20	0,04	0,05							[16]
	ASTM A3-01	Низкоуглеродистая			0,05								[17]
		Среднеуглеродистая	не менее 0,30		0,05								
		Высокоуглеродистая	не менее 0,45		0,04								

Таблица 1.4 – Требования разных стран к механическим свойствам рельсовых накладок железных дорог широкой колеи

Страна	Номер стандарта	Вид термообработки	Сталь	$\sigma_в$, Н/мм^2	$\sigma_т$, Н/мм^2	δ, %	ψ, %	ζ, град.	HB	Источник
				не менее/в указанных пределах					в пределах	
Россия	ГОСТ 4199-73	объёмная закалка в масле	М54	844	530	10	30	20	235-388	[12]
Китай	TB/T 2345-2008	объёмная закалка в воде или масле + высокотемпературный отпуск	55	785	520	9	20	30	227-388	[13]
			56Nb	845	530	10	30	30	235-388	
Индия	T-1-2012	нормализация	0,40-0,50	620	320	15		120	175	[14]
Япония	JIS E 1102:2001	нет	30,37,40N, 50,50N,60	470-510		20				[15]
				550-650		18				
				569		15				
		закалка+отпуск	30H,37H,40NH, 50H, 50NH,60H	690	480	12				
				686	12				262-331	
США	ASTM A49-12	закалка легирование	Нелегированная и легированная (Nb, V, N)	690	485	12	15	90	227-388	[16]
	ASTM A3-01	нет	Низкоуглеродистая	380		22				[17]
			Среднеуглеродистая	470		20				
			Высокоуглеродистая	585		15				

При анализе нормативных требований существенное внимание необходимо обратить на место отбора образцов для проведения механических испытаний, т.к. для разных стран характерна своя регламентация, а от места отбора проб напрямую зависит уровень получаемых свойств, что следует учитывать при сопоставлении результатов исследований механических свойств рельсовых накладок в разных странах.

В России согласно стандарту [12] рельсовые накладки подвергают объёмной закалке в масле (тогда как для рельсов действующим отечественным нормативным документом [18] вид термической обработки не регламентирован). По стандарту [12] отбор проб на растяжение ведётся из верхней головки ближе к её опорной поверхности, твёрдость измеряют на внешней поверхности шейки, а испытания образца на величину холодного загиба проводят для наружной поверхности нижней части нижней головки накладки.

Стандартом Китая [13] предусмотрена закалка в воде или масле и обязателен высокотемпературный отпуск. Отбор проб на испытания осуществляется аналогично стандарту России [12].

Стандарт Индии [14] предусматривает после горячей прокатки, резки на мерные длины и охлаждения на воздухе ниже 300 ^{o}C проведение нормализации при температуре 830-860 ^{o}C с последующим повторным охлаждением на воздухе. Отбор проб для механических испытаний ведут из центральной части нижней головки, а образец для холодного загиба отбирается от шейки между отверстиями и должен выдержать без трещин изгиб наружной поверхности на 120°. Стандартом [14] регламентирован размер зерна: не выше балла №6 по стандарту IS:4748-1988. Для повышения коррозионной стойкости накладки после всех операций необходимо окунуть в кипящее льняное масло, либо покрыть антикоррозионной защитой.

Стандарт Японии [15] предусматривает производство как термообработанных, так и нетермообработанных накладок, причём термообработка проводится по заказу потребителя и её вид нормативными документами не установлен. Из

таблицы 1.4 видно, насколько уровень прочностных свойств нетермообработанных накладок уступает уровню термоупрочнённых накладок.

В Китае [13] по усмотрению потребителя или изготовителя допускается правка накладок в холодном состоянии после термообработки, в Японии [15] разрешена правка накладок при медленном нагружении, в Росси холодная правка также допускается при плавных усилиях без ударов [12].

В США действуют два вида стандартов для рельсовых накладок: первый [16] предусматривает производство как закалённых нелегированных, так и микролегированных накладок. Химический состав последних определяется соглашениями между производителем и заказчиком. Стандартом отмечено, что легированный металл должен содержать такие элементы как ниобий, ванадий и азот, допускается различное их сочетание, а процентное содержание не регламентируется. Вид закалки стандартом не установлен. Такие накладки предназначены для типового железнодорожного пути. Второй стандарт [17] предусматривает изготовление накладок без какой-либо термообработки, и устанавливает применение низко- и среднеуглеродистых накладок в промышленности и на шахтных рельсовых путях, высокоуглеродистые могут быть использованы на типовом железнодорожном пути.

Прошивка отверстий в накладках отечественного и китайского производства выполняется горячей штамповкой, в накладках производства Индии либо сверлением после термообработки, либо горячей штамповкой, после чего накладки должны быть вновь подвергнуты нормализации. Отверстия в накладках производства Японии по соглашению производителя и потребителя могут быть изготовлены как штамповкой, так и сверлением.

Сопоставив данные по требованиям к механическим свойствам в разных странах, можно сделать вывод, что наиболее высокие требования предъявляются отечественным ГОСТом [12], что обусловлено российскими климатическими условиями. Стандарт Китая устанавливает аналогичные значения механических свойств, но для легированной ниобием стали с обязательным проведением высо-

котемпературного отпуска. Это соответственно приводит к удорожанию производства.

1.1. Анализ технологий и способов получения заданных механических характеристик железнодорожного проката

Как следует из представленных ниже сведений, наряду с термоупрочнением для получения необходимых механических свойств в ряде стран применяется легирование (микролегирование), что предполагает производство металла в горячекатаном состоянии с обеспечением требуемых свойств. Особенно широкое развитие это направление получило в США.

В работах [19…21] была исследована возможность повышения механических характеристик незакалённых рельсовых накладок путем легирования. В таблице 1.5 представлен химический состав исследованных опытных накладок, а в таблице 1.6 – их механические свойства.

Таблица 1.5 – Химический состав (в %) легированных сталей для накладок

	C	Si	Mn	Cr	P	Ni	Cu	S	V	Al	N	Источник
Образец *A*	0,15	0,576	1,026	0,299	0,006	0,030	0,121	0,007	0,028	-	-	[19]
Образец *B*	0,10	0,461	1,528	0,377	-	0,048	0,177	0,001	-	-	-	
Образец *MA2*	0,38	0,25	1,180	-	0,010	-	-	0,008	0,160	0,017	0,018	[20]
Образец *Mic.*	0,27	0,32	1,65	-	0,021	-	-	0,020	0,130	0,022	0,017	
М66ХГСМ	0,70	0,30	0,95	0,60	0,007	-	-	0,026	-	-	-	[21]
М70ХГСМ	0,74	0,50	1,08	0,85	0,005	-	-	0,030	-	-	-	

Структура накладки *A* представляла собой мелкозернистый бейнит, накладки *B* – нестабильный бейнит.

В состав стали *MA2* [20], как и в случае с рельсовой сталью, введены ванадий и азот для последующего образования карбонитридов, которые позволяют компенсировать потери прочностных характеристик. Наличие потерь обусловлено

Таблица 1.6 – Механические свойства накладок из легированных сталей

	$\sigma_в$, Н/мм^2	$\sigma_т$, Н/мм^2	δ, %	ψ, %	НВ	ζ, град.	Источник
Образец *A*	не менее 950	722	не менее 15	60,7	нет данных	нет данных	[19]
Образец *B*	не менее 850	568,5	не менее 20	63,5	нет данных	нет данных	
Образец *MA2*	911	628	14,5	30,6	нет данных	90	[20]
Образец *Mic.*	857	628	20,6	55,1	нет данных	90	
М66ХГСМ после отпуска (400 ^{o}С, 3ч.)	1180	680	13,4	30	в пределах 341-352	нет данных	[21]
М70ХГСМ после отпуска (400 ^{o}С, 3ч.)	1163	684	14,6	34	в пределах 341-352	нет данных	

изменением количества углерода и марганца и, как следствие, снижением объёмной доли перлита.

Температура нагрева слитка под прокатку составила приблизительно 1180°С, прокатка была осуществлена в лабораторных условиях в пять проходов с последующим охлаждением на воздухе, температура металла после прокатки – 1024 ^{o}С. Условия опыта позволили смоделировать промышленные условия производства рельсовой накладки. Восемь образцов стали *Mic* [20] были получены прокаткой в профиль рельсовой накладки в промышленных условиях, при этом отверстия в шейке накладок под болтовые соединения сделаны сверлением.

Температура окончания процесса прокатки находилась в пределах 1030-1077°С. В таблице 1.6 приведены усреднённые данные механических свойств всех восьми образцов *Mic*.

Отечественный опыт опробования низколегированных незакалённых сталей [21] даёт удовлетворительные результаты по механическим свойствам лишь после проведения отпуска в интервале температур 300-500°С с выдержкой не менее 1,5 ч. При этом металл имеет мелкодисперсную структуру сорбита и сорбитообразного перлита. В горячекатаном состоянии (без проведения отпуска) исследованные

сплавы М66ХГСМ и М70ХГСМ не достигли требований [12] по относительному сужению, имея значение данного показателя 27% и 23% соответственно.

Из приведённых в таблице 1.6 данных видно, что испытания в полном объёме согласно требованиям ГОСТ [12] проведены не для всех образцов. В связи с этим сделать вывод о возможности применения представленных составов сталей для производства нетермоупрочнённых накладок не представляется возможным.

В работе [20] предлагается заменить закалку накладок в масле на микролегирование, при этом отмечена возможность сокращения затрат на производство накладок за счёт исключения операции термообработки. Следует отметить и подчеркнуть, что за последние 5 лет (2009 г .по 2013 г.) наблюдается тенденция к увеличению стоимости ферросплавов. На рынке стран Западной Европы цена кускового феррохрома выросла на 8,5%, ферросилиция – на 17%, феррованадия – почти на 10% [22,23], в России с октября 2011 г. по октябрь 2013 г. цена феррохрома снизилась на 17%, стоимость ферросилиция увеличилась на 20%, феррованадия – на 9,4% [24, 25]. Поэтому однозначно судить о легировании, как наиболее экономически выгодном способе обеспечения качества рельсовых накладок, невозможно. Кроме того, отсутствие термообработки исключает горячую прошивку отверстий накладок, поэтому авторы [20] предлагают заменить эту операцию сверлением или фрезерованием, что потребует наличия соответствующего оборудования и может усложнить цикл производства накладки.

Легирование имеет ряд существенных преимуществ, в частности, можно получить более низкий уровень напряжений, чем после термоупрочнения, а также снизить величину усилия при правке, либо исключить её вовсе. Отсутствие необходимости правки служит одной из причин производства нетермоупрочнённых рельсовых накладок в Японии [21].

Как будет показано ниже, зарубежный опыт при учете требований нормативных документов к уровню механических свойств не применим для российских условий.

На сегодняшний день ведущую роль в получении качественных рельсов и рельсовых накладок играет процесс термообработки, который является одним из завершающих при их производстве.

Закалка в объёме охладителя любого типа является процессом неуправляемым с точки зрения отвода тепла от разномассивных элементов изделия, поэтому затруднительно в промышленных условиях обеспечить требования к прямолинейности готового изделия, а в случае с рельсами правка обязательна. Перемешивание охладителя, безусловно, даёт некоторый эффект по интенсификации процесса, но решающего влияния на теплофизику процесса не оказывает. Получаемые механические свойства существенно зависят и от параметров закалочной среды: её температуры и вязкости, количества циклов термообработки, которое она претерпела, т.е. насколько среда «постарела».

Важной особенностью изделий из железнодорожного проката является их сложная форма и, как следствие, разномассивность элементов профиля. Разная скорость остывания разномассивных частей элементов сложного профиля обусловливает неодновременное протекание структурных превращений в них, и в результате изменения объёмов структурных составляющих возникает разный уровень напряжений по элементам профиля, что является основной причиной искривления рельсов и рельсовых накладок при термообработке. В частности, из-за разной массивности элементов профиля рельса разные его части – головка, шейка и подошва – на воздухе охлаждаются с разными скоростями, вызывая искривления и возникновение напряжений. Как показано в работе [26], теплоты превращения выделяются сначала в подошве и шейке, а затем в головке, в результате чего он претерпевает многочисленные искривления: сначала изгиб происходит на подошву, далее на головку и затем снова на подошву.

Закалка в масле – это традиционный способ термоупрочнения рельсов и рельсовых накладок [12, 27]. Известно, насколько масло является экологически небезопасным: при его испарении образуются углеводороды, оксикислоты, оксиды серы, серосодержащие соединения – меркаптаны, дисульфиды, оксиды азота,

нитросоединения, фенолы, полиароматические углеводороды, фосфоросодержащие органические соединения [28]. Есть данные [29], свидетельствующие, что превышение ПДК по содержанию масляного аэрозоля в атмосфере цехов, использующих нефтяные масла типа И20А, составляет от 8 до 30 раз. В случае если закалочный бак с маслом открытого типа, то необходима мощная система вентиляции, к которой предъявляются специальные требования по пожаробезопасности. В холодное время года требуется подогрев масла, в тёплое – охлаждение, следовательно, для обслуживания данного процесса требуется вспомогательный участок, что является затратным.

Экспериментальные данные на рисунке 1.2 [30] показывают, что стабильных механических свойств при закалке рельсовых накладок в масле получить не удаётся – разброс значений относительного сужения при одинаковых значениях предела прочности довольно широк, и имеются несоответствия требованиям [12].

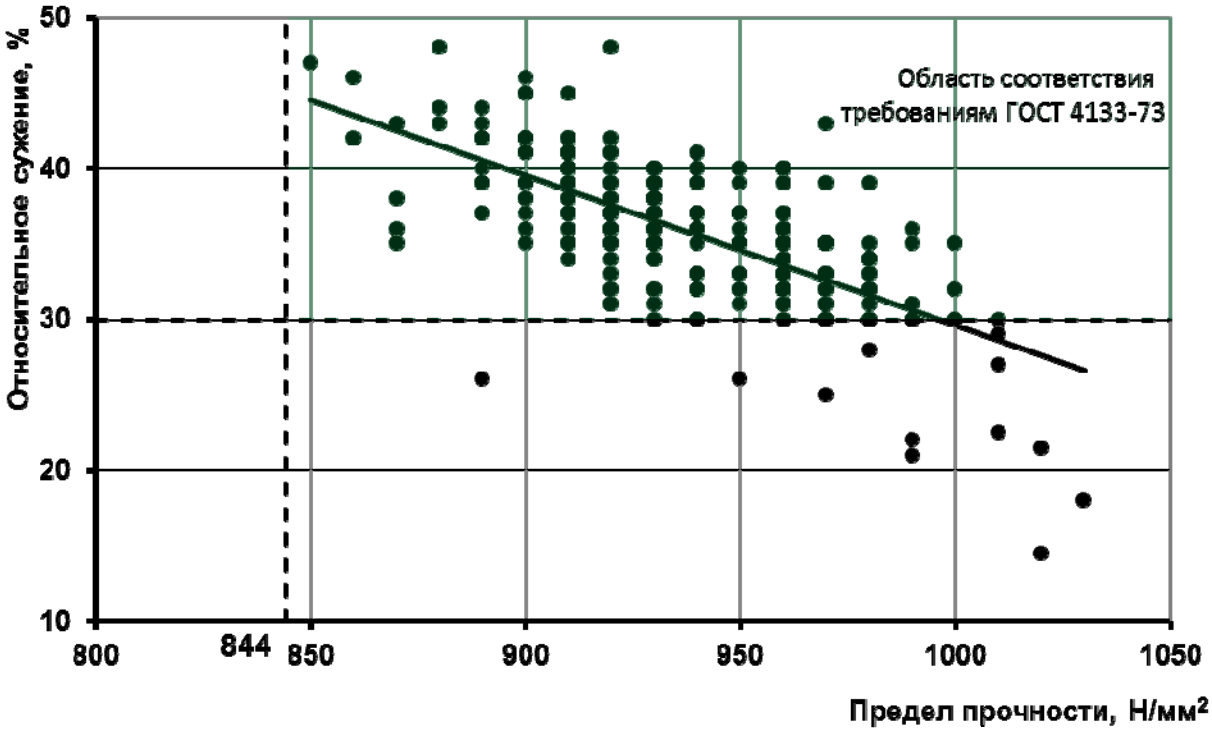


Рисунок 1.2 – Зависимость между относительным сужением и пределом прочности для рельсовых накладок Р65, закалённых в масле на предприятии ОАО «ЕВРАЗ-Объединённый Западно-Сибирский металлургический комбинат» (ОАО «ЕВРАЗ-ОЗСМК») [30]

Полимерные закалочные среды расширяют возможности термоупрочнения, т.к. могут занимать промежуточное положение между водой и маслом по охлаждающей способности. Важным их достоинством является отсутствие пожароопасности и выделения вредных веществ при испарении [31], а их охлаждающая способность регулируется изменением концентрации полимерного раствора. Автором [32] в качестве безопасной среды для применения признана лишь Na-КМЦ, т.к. при использовании распространённой среды ПК-2 и некоторых других в результате разрушения органических компонентов образуются оксиды азота, отрицательно влияющие на психику человека.

При всех неоспоримых преимуществах синтетические закалочные среды не являются универсальными. Это значит, что подбирать параметры процесса с использованием таких сред необходимо в каждом конкретном случае отдельно, а при эксплуатации нужно обеспечивать постоянный контроль её технологических и физических параметров. В отечественной практике были проведены исследования применимости некоторых полимерных сред для закалки рельсов и накладок.

Рядом авторов [33…35] при исследовании процессов термоупрочнения рельсовых накладок в средах ПК-М, ПК-2 и Na-КМЦ было установлено, что повышение эксплуатационной стойкости накладок при закалке в полимерной среде ПК-2 достигается за счёт уменьшения межпластиночного расстояния перлита и количества структурно-свободного феррита в поверхностном слое накладок. Был также определён порядок операций по подготовке растворов ПК-2 и Na-КМЦ для проведения термообработки. В работе [34], где получены соответствующие требованиям механические свойства, предложен режим охлаждения с последующим самоотпуском при концентрации раствора 0,3-0,7%, температуры среды 20-40 ^{o}C, продолжительности процесса 2-2,5 мин. В статье [35] при концентрации раствора 11,1%, температуре 20, 45, 60 ^{o}C получены механические свойства, также соответствующие требованиям, но изменение температуры раствора на 5°C в сторону понижения уже не позволяет получать удовлетворительный результат по величине угла холодного загиба. Данных по прямолинейности накладок после термооб-

работки в синтетических средах в литературе не приводится, так же как и нет статистических данных о стабильности получения механических характеристик. В работе [36] было установлено, что при охлаждении в полимерах с охлаждающей способностью близкой к маслу, в деталях создаётся более высокий уровень внутренних напряжений, чем после закалки в масле. Возможной причиной этому являются условия синтеза полимерных сред, поэтому крайне важен постоянный тщательный контроль их физических параметров, т.к. даже небольшое изменение состава среды играет решающую роль в обеспечении требуемых механических свойств.

Нетривиальный способ получения свойств рельсов и рельсовых накладок предложен в работе [37], где приведены данные по закалке в объёме воды с температурой 75-100°С. Количество стадий охлаждения рельсовой накладки в этом случае должно быть не менее трёх: продолжительность первых двух 10-20 с., третьей – может превышать 60с., вторая стадия должна осуществляться обязательно на воздухе. В таблице 1.7 приведены данные о влиянии температуры на скорость охлаждения рельсовых накладок.

Таблица 1.7 – Скорость охлаждения рельсовых накладок в интервале температур диффузионного превращения [37]

Элемент профиля	Охлаждающая среда			
	вода, 25°С	вода, 75-100°С	вода 75-100°С, 20с., воздух, 20с., вода 75-100°С, 2 мин.	масло
Поверхность шейки	26	12,5	7,5	5,0
Середина шейки	13	10,5	7,0	-
Середина головки	12,5	8,5	6,0	-

Таким образом, прерывистая закалка позволяет приблизить скорость охлаждения накладок в интервале температур диффузионного превращения (700-400°С) к скорости закалки в масле.

При применении этого способа возникает задача поддержания температуры воды, а кроме того, остаются проблемы, связанные с закалкой в объёме и обеспечением прямолинейности готовых изделий.

1.2 Охлаждающие среды и способы охлаждения в технологиях термоупрочнения стальных изделий

Для оценки охлаждающей способности среды по экспериментальным данным строят зависимости коэффициентов теплоотдачи α от температуры поверхности t_n. Ряд исследователей использует в своей работе понятие «резкости закалки» H, характеризующее способность среды отводить тепло в течение процесса [38]. Критическая скорость закалки – это минимальная скорость охлаждения, при которой ещё существует аустенит, т.е. не происходит образования ферритокарбидной смеси. Величина критических скоростей закалки выбирается по термокинетическим диаграммам (ТКД) превращения переохлаждённого аустенита, которые для различных марок стали приведены в [39]. Известно, что на положение линий ТКД влияет множество факторов: исходный размер зерна аустенита, химический состав и др., а значит, положение линий будет существенно отличаться для разных плавок в пределах требований ГОСТ. В таком случае можно построить ТКД для данного сплава или использовать разработанные способы прогнозирования, описанные в работах [40…42].

На протекание процесса охлаждения значительно влияет окисление и обезуглероживание поверхности, которое неизбежно происходит при нагреве металла до начала термоупрочнения. Это влияние можно оценить по данным рисунка 1.3 [43], где значение коэффициента теплоотдачи для не окисленной поверхности превышает этот параметр для окисленной стали.

Объясняется это тем, что теплопроводность оксидных плёнок, образующихся на поверхности нагретого изделия, в десятки раз ниже теплопроводности не окисленной стали. Авторами [44] показано, что сталь М54, из которой иготавли-

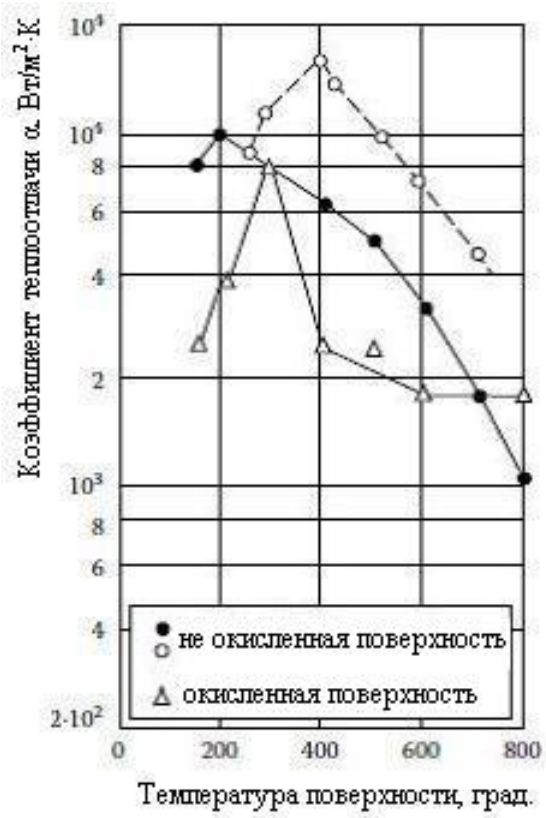
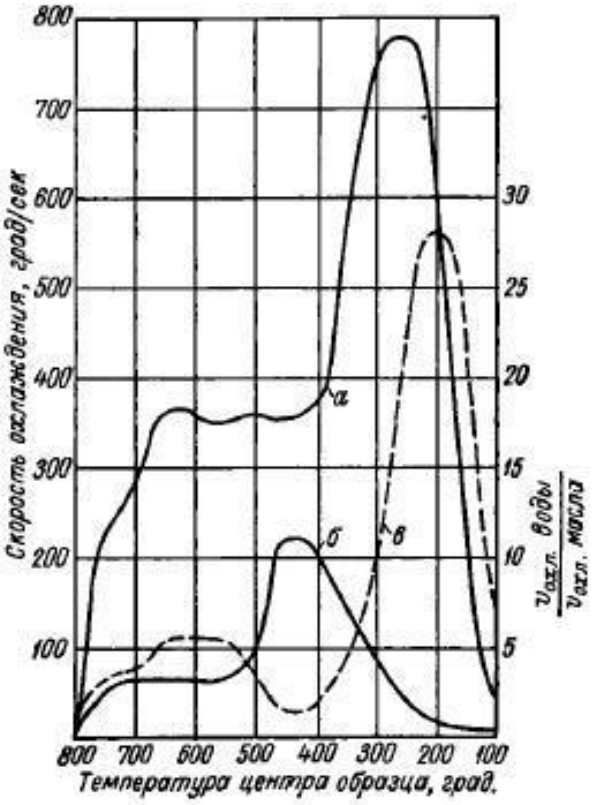


Рисунок 1.3 – Зависимость коэффициента теплоотдачи α от температуры поверхности окисленного и не окисленного стального образца при погружении его в воду с температурой 20°С [43]

вают рельсовые накладки, характеризуется более интенсивным окислением, чем рельсовая сталь М76. Это связано с различием их химического состава: при содержании углерода в стали свыше 0,5% наблюдается снижение интенсивности её окисления.

Все охлаждающие среды подразделяют на кипящие: вода, масло, полимеры, и некипящие: воздух, расплавы металлов, солей, щелочей. Для кипящих сред характерно наличие стадий кипения: плёночной, пузырьковой и конвективного теплообмена, соответственно скорости охлаждения изделия в течение процесса существенно меняются. При охлаждении в некипящих средах скорости охлаждения изделия постепенно уменьшаются. Рассмотрим наиболее часто применяемые охлаждающие среды.

Самой распространённой и недорогой охлаждающей средой является вода. Для неё характерны высокие скорости охлаждения до 770°С/с при температуре поверхности изделия 250-280 °С, различная охлаждающая способность в разных интервалах температур, что обусловлено наличием двух режимов кипения – пузырькового и плёночного [45]. По этим причинам непрерывное охлаждение изделия в воде может вызывать большие внутренние напряжения в нём и приводить к образованию трещин. На рисунке 1.4 [45] приведена охлаждающая способность воды и масла.



образец – серебряный сферический шарик Ø 20мм, скорость перемещения 25см/с

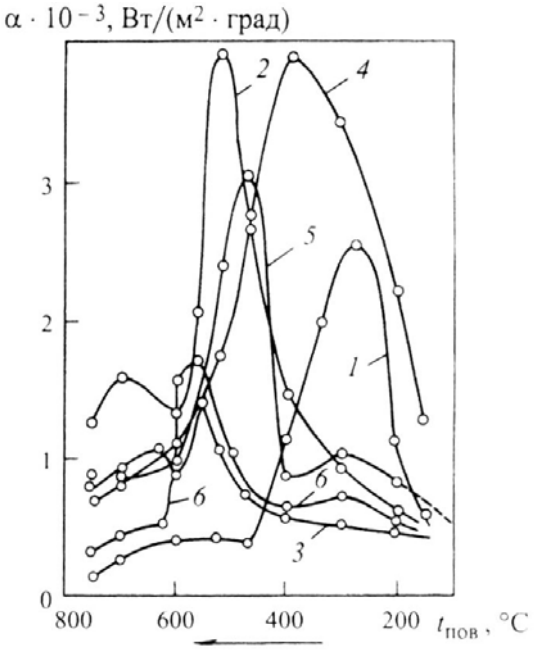
Рисунок 1.4 – Охлаждающая способность воды (*а*), индустриального масла 20 при температуре 50°С (*б*) и отношение скоростей охлаждения в воде и масле (*в*) [45]

Из анализа сведений, представленных на этом рисунке, следует, что режим плёночного кипения масла находится в более узком интервале температур – от 750 до 500°С, чем для воды – 750 – 400°С. По этой причине при охлаждении в масле максимум его охлаждающей способности смещается в область интервалов более высоких температур, а стадия конвективного теплообмена располагается с

380°С до комнатной температуры. Это объясняется возникновением при закалке в масле не паровой, а газопаровой плёнки на поверхности изделия, которая является устойчивой при температурах 450-700°С [45]. По этим причинам скорости теплоотвода ниже по сравнению с водой. Это позволяет считать охлаждение в масле «мягким», что означает меньший перепад температуры поверхности и середины изделия по сравнению с водой в течение всего цикла охлаждения. Следовательно, масло, как правило, используется для легированных сталей со сравнительно небольшими критическими скоростями закалки. Оно мало изменяет свою закаливающую способность в широком интервале температур и, обеспечивая небольшую скорость охлаждения в мартенситном интервале температур, уменьшает вероятность появления трещин и уровень остаточных напряжений [46]. Вместе с тем охлаждающая способность масел значительно зависит от их вязкости [32,45]. Для получения оптимальной охлаждающей способности масло подогревают до температуры 40-80°С, которую необходимо поддерживать, что требует довольно значительных затрат энергии. При повышении температуры увеличивается скорость окисления масла, и образуются смолистые вещества, предельно допустимая концентрация (ПДК) масляных аэрозолей составляет 5 мг/м^3, тогда как их содержание в термических цехах оценивается в 50-58 мг/м^3 [32]. Кроме этого, хорошо известна высокая пожароопасность процесса и необходимость промывки изделий после закалки.

Широко вошли в промышленное применение полимерные среды как исключающие часть перечисленных недостатков. Они представляют собой раствор органических или неорганических веществ в воде. При охлаждении в полимере нагретого изделия на его поверхности образуется полимерная плёнка, которая интенсифицирует теплоотвод в стадии плёночного кипения и замедляет в стадии пузырькового. В работе [47] отмечено существование двух групп полимеров: первая – обладает инверсной растворимостью, когда плёнка полимера растворяется при понижении температуры, благодаря чему промывать изделия после охлаждения не нужно («Аквапласт», полиэтиленоксид). Вторую группу составляют полимеры,

в которых плёнка стабилизирует паровую рубашку и в конце охлаждения оседает на поверхности изделия, замедляя скорость охлаждения в мартенситном интервале температур (водные растворы полиакриламида). Достоинством синтетических закалочных сред является возможность создавать различные режимы охлаждения, подобные маслу, воде и даже воздуху в зависимости от концентрации полимера и других параметров. На рисунке 1.5 приведены кривые охлаждения в среде ПК-2, воде и масле при разных температурах [48]. Анализ данных рисунка 1.5 позволяет прийти к заключению: максимум интенсивности теплоотвода синтетической среды смещён в сторону более высоких температур и значительно превышает эту характеристику для масла.



1 – масло И20А, t = 50 °С; 2 – 1,2% ПК-2, t = 25 °С свежеприготовленный; 3 – 1,2% ПК-2, t = 25 °С состаренный; 4 – то же, что 5, после добавления 5л воды; 5 – 0,9% ПК-2, t = 25 °С; 6 – 0,9 ПК-2, t = 45 °С

Рисунок 1.5 – Зависимость коэффициента теплоотдачи α от температуры поверхности $t_{пов}$ образца при охлаждении погружением в масло или растворы ПК-2 с разной концентрацией и температурой [48]

На характер охлаждающей способности полимерного раствора ПК-2 влияет количество циклов охлаждения, которое в нём было проведено. Для свежеприготовленного раствора величина коэффициента теплоотдачи значительно выше, чем

для состаренного, и с уменьшением концентрации полимера и увеличением его температуры коэффициент α уменьшается. Такая картина характерна для многих полимерных сред.

Большими преимуществами полимерных сред являются отсутствие необходимости организации специальной системы вентиляции и полной их замены (требуется только корректировка состава), улучшаются условия работы персонала, пожаробезопасность, а также увеличиваются сроки в 2-3 раза между ремонтами цеховых помещений и оборудования [47].

Определяющими факторами теплообмена в полимерных средах являются: температура, концентрация раствора и скорость его перемешивания. Для поддержания концентрации раствора необходим регулярный контроль охлаждающей способности ванны. Важно также контролировать температуру среды, т.к. в противном случае можно не получить требуемых свойств. Подбор оптимальных концентраций полимерной среды для конкретного вида полимера и изделия производится только эмпирическим путём с определением его охлаждающей способности. Данные по этим характеристикам, а также рекомендации по выбору синтетических сред представлены в работах [32…36, 46…51].

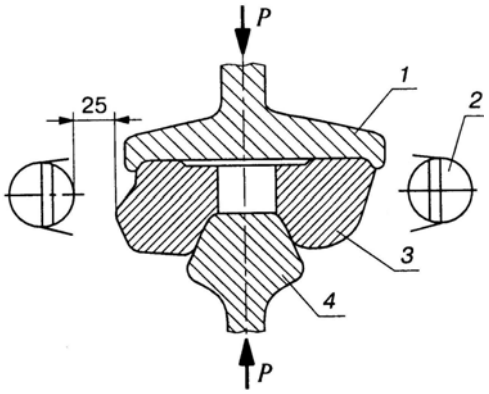
Несмотря на многообразие охлаждающих сред – воды, масел, растворов полимеров разных концентраций в воде, существенный недостаток их применения в традиционных технологиях термоупрочнения металлопродукции заключается в отсутствии способов и устройств, способных обеспечить управление режимами охлаждения. Это обстоятельство не позволяет выполнять гарантии по удовлетворению требований прямолинейности изделий из-за невозможности обеспечения одинаковых скоростей охлаждения разномассивных элементов сложного профиля, что актуально для железнодорожного проката.

Решение этих задач можно обеспечить не типом применяемой закалочной среды, а организацией её подвода к поверхности изделия.

Одним из таких наиболее оптимальных решений является дифференцированное охлаждение, которое способно обеспечить термоупрочнение проката

сложного профиля за счёт организации на каждом элементе профиля изделия определенной скорости охлаждения и тем самым создать возможности частичного самоотпуска, если это требуется, за счёт остаточного тепла массивных элементов. Такой процесс позволяет снизить уровень остаточных напряжений, повысить уровень механических свойств и удовлетворить требования по прямолинейности изделий без использования правки.

Для рельсовых накладок в лабораторных условиях была отработана технология закалки в штампе быстродвижущимся потоком воды [52]. На рисунке 1.6 приведена схема закалки.



1 – верхний захват штампа; 2 – устройство подачи закалочной воды со вставками для регулирования направления потоков; 3 – закаливаемая рельсовая накладка; 4 – нижний захват штампа.

Рисунок 1.6 – Схема закалки рельсовой накладки Р65 [52]

Был отмечен высокий уровень циклической долговечности накладок благодаря наличию сжимающих напряжений в поверхностном слое и обеспечение высокого уровня прямолинейности. Данный способ не нашёл применения в промышленности [52,53]. Причинами этого могли быть низкая пропускная способность штампа, что не позволило обеспечить требуемую производительность накладок, а также высокая стоимость закалочных штампов, которая существенно влияла на себестоимость металлопродукции.

1.3 Анализ тепловых режимов охлаждения стального проката при его термоупрочнении

Известны два основных способа повышения прочности сплавов: создание сплавов с бездефектной структурой, а также повышение плотности дислокаций и создание структурных препятствий при измельчении зерна. Границы зёрен являются эффективным барьером для движения дислокаций, поэтому с уменьшением размера зерна прочностные характеристики металла возрастают. Это находит своё отражение в следующих зависимостях предела текучести и прочности от диаметра зерна [54]:

$$\sigma_m = \sigma_0 + K_y \cdot d_з^{-1/2} \quad (1.1)$$

$$\sigma_в = \sigma_0 + K_в \cdot d_з^{-1/2} \quad (1.2)$$

Измельчение зерна происходит при высоких скоростях охлаждения, получение которых достигается интенсификацией процессов теплообмена при термообработке. В зависимости от скорости охлаждения можно получать различные структуры, которые определяются по изотермическим и термокинетическим диаграммам (ТКД) превращения переохлаждённого аустенита для конкретной марки стали. Именно с их использованием выбирают способ термоупрочнения: вид закалки, отпуска и т.д., а также тип охлаждающей среды [54,55]. Выбор режима охлаждения подразумевает решение двух теплотехнических задач: внешней – организация теплоотвода от поверхности изделия в окружающую среду, и внутренней – передача тепла теплопроводностью из внутренних слоёв изделия к его поверхности. Рассмотрим их подробнее.

Несмотря на то, что и при струйном охлаждении и охлаждении в объёме имеет место сложный теплообмен, когда явления теплопроводности, конвекции и излучения протекают одновременно, оба способа имеют свои теплофизические особенности.

При охлаждении изделия в объёме различают три основных стадии процесса: плёночное кипение, пузырьковое кипение и конвективный теплообмен, хотя ряд авторов выделяет и большее число [56,57]. В момент погружения изделия с

высокой температурой в воду или полимер в первоначальный момент всё изделие покрывается паровой плёнкой, которая устойчиво держится на поверхности металла. Она имеет низкую теплопроводность, а значит охлаждение на этой стадии замедленно. В этот момент имеет место минимальная тепловая нагрузка, что носит название второй критической плотности теплового потока, которой соответствует минимальное значение коэффициента теплоотдачи α. На основе экспериментов была определена связь этого явления с внезапным расширением сухого пятна на охлаждаемой поверхности и ростом локальной температуры поверхности изделия в месте этого пятна. Рост сухого пятна обусловлен снижением количества жидкости, поступающей между растущими паровыми пузырями к нагретой поверхности, поэтому определяющим параметром, как показано автором [58], при переходе к пузырьковому режиму является критическая скорость парообразования. Со снижением температуры изделия среда начинает периодически смачивать поверхность, и образуются пузырьки пара. Интенсивность охлаждения резко возрастает, и температура поверхности изделия быстро снижается до температуры кипения охлаждающей среды. В этот момент наблюдается максимальное значение тепловой нагрузки, что носит название первой критической плотности теплового потока. Интенсивность теплоотдачи при плёночном кипении на порядок меньше, чем при пузырьковом [59,60].

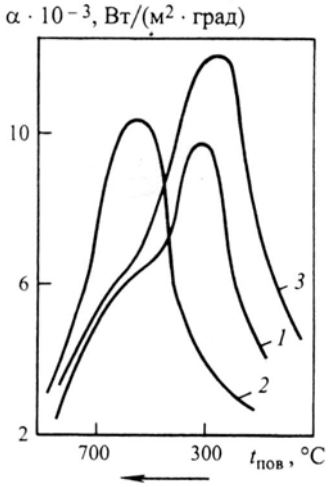
В работе [57] представлено несколько типов повторного смачивания т.е. способов перехода от плёночного кипения к пузырьковому. По первому типу переход осуществляется при постоянном движении границы раздела плёнка пара/пузырьки. При продвижении фронта смачивания снизу образца вверх, в нижней его части достигается бóльшая прокаливаемость, чем в верхней. Это может быть полезно, если требуется получить высокие значения твёрдости на рабочих частях изделия. Второй тип повторного смачивания характеризуется одновременным резким переходом плёночного режима кипения к пузырьковому по всей поверхности изделия. Данный тип относится к интенсивному методу закалки и существует при закалке в водных растворах солей и в потоке воды при струйном и

спрейерном охлаждении. Температура поверхности изделия отличается от температуры кипения закалочной среды на величину перегрева ΔT:

$$T_п = T_к + \Delta T \tag{1.3}$$

Установлено, что для воды величина ΔT при атмосферном давлении для пузырькового кипения достигает 25-35 ^{o}С, при бóльших температурах наступает второй кризис кипения. Для ΔT = 35 ^{o}С коэффициент теплоотдачи при будет равен α = 33000 Вт/м^2·К [57]. Таким образом, в случае пузырькового кипения превалирующим является конвективный теплообмен, а при плёночном кипении необходимо учитывать излучение между паровой плёнкой и поверхностью нагретого изделия.

Интенсивность подвода охлаждающей среды к поверхности разных элементов изделия определяется их термической массивностью: от более массивных элементов требуется более интенсивный отвод тепла. С этой целью организуется дифференцированный подвод охладителя к поверхности изделия с помощью форсунок, которые могут иметь разнообразную конструкцию в зависимости от требований к скорости процесса. Подведение охлаждающего агента может осуществляться сплошной водяной струёй, отдельными каплями воды или мелкодисперсной смесью воды и воздуха. Главной характеристикой работы таких устройств является плотность орошения поверхности изделия ω, измеряемая в м^3/м^2·ч, т.е. это объём воды, который подводится к единице площади поверхности изделия в единицу времени. Естественно, что плотность орошения находится в прямой зависимости от конструкции форсунки и параметров процесса – температуры, давления подаваемой воды, расстояния от кромки сопла до поверхности изделия и ориентации его относительно поверхности изделия. На рисунке 1.7 из анализа данных работы [48] видно, что с помощью упомянутых факторов можно управлять скоростью охлаждения и охлаждающей способностью при спрейерном охлаждении.



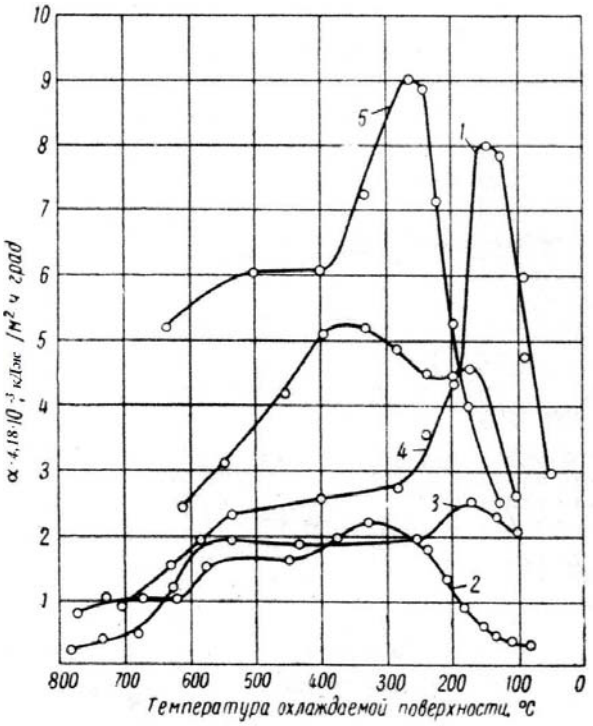
1 – ω = 15 л/м^2·с, р = 0,05 МПа; 2 – ω = 15 л/м^2·с, р = 0,3 МПа;
3 – ω = 60 л/м^2·с, р = 0,05 МПа

Рисунок 1.7 – Зависимость коэффициента теплоотдачи α от температуры поверхности $t_{пов}$ образца при спрейерном охлаждении с различной плотностью орошения ω и давлением воды p [48]

При увеличении давления интервал пузырькового кипения сдвигается в область более высоких температур, т.к. направленные струи воды разрушают паровую рубашку и интенсифицируют теплообмен. Увеличение же плотности орошения при одинаковом давлении расширяет температурный интервал пузырькового кипения. На основании этого в работе [48] сделан ряд практических выводов о том, что такие устройства просты в исполнении и легко управляемы, а главным их преимуществом является возможность управлять процессом термоупрочнения. В работе [52] отмечено, что при водо-воздушном охлаждении не наблюдается плёночного кипения, что объясняется сильной диспергацией частиц воды и при соприкосновении с нагретой поверхностью они мгновенно испаряются, поэтому плёнка пара не успевает образоваться из-за большой скорости отвода пара. В настоящее время существуют способы определения охлаждающей способности таких сред [48,52,61]. Важным достоинством таких устройств является также автоматизация их работы в производственных условиях [62]. Эти устройства очень часто являются частью систем термомеханической обработки сталей разного ма-

рочного состава и изделий разной формы [63…65]. Дифференцированное охлаждение водо-воздушной смесью применяется и при сварке рельсов разной степени прочности [66].

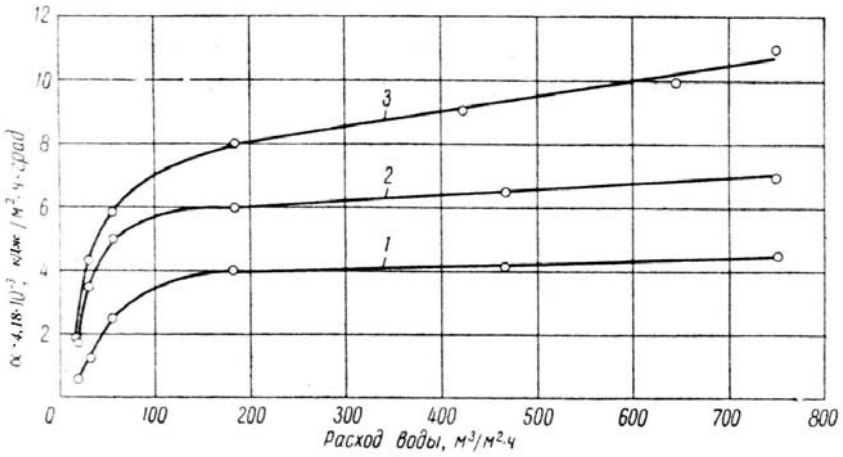
Охлаждение струями воды даёт возможность изменять скорость охлаждения изделия в довольно широком диапазоне. В работе [67] приводятся данные, что средняя скорость охлаждения проката по его сечению может достигать 100°С/с. На рисунке 1.8 представлена зависимость коэффициента теплообмена от температуры охлаждаемой поверхности, полученная авторами [68], из анализа которой следует, что данный способ охлаждения позволяет получать значения коэффициента теплообмена α характерные для воды и для масла, а также превышающие их величины в зависимости от давления, расхода воды, а, следовательно, параметров сопла.



1 – вода 12 °С, 2 – масло 20 °С, 3 – ω = 19 м^3/м^2·ч, р = 0,05 ати, 4 – ω = 56 м^3/м^2·ч, р = 0,4 ати, 5 – ω = 150 м^3/м^2·ч, р = 2,6 ати

Рисунок 1.8 – Изменение коэффициента теплообмена α в зависимости от температуры охлаждаемой поверхности [68]

При спрейерном охлаждении с увеличением давления максимальное значение коэффициента α смещается в сторону более высоких температур, тогда как при более низких давлениях паровая рубашка устойчива до более низких температур. В этой связи данный способ превосходит по удобству и управляемости выше приведённые. На рисунке 1.9 [68] приведено изменение коэффициента конвективного теплообмена α при различных расходах воды в 3-х интервалах температур поверхности изделия. Здесь важно обратить внимание на то, что существует определённый предел расхода воды, после которого значение коэффициента α уже не меняется (кривая 1 на рисунке 1.9) и подаваемая вода будет балластной. Это необходимо учитывать при выборе параметров форсунок, через которые производится подача воды на поверхность изделия.



1 – 820-600°С, 2 – 600-400°С, 3 – 300-200°С. Давление 0,4 ати.

Рисунок 1.9 – Изменение коэффициента α в зависимости от расхода воды для интервалов температур [68]

Спрейерная закалка также названа одним из эффективным методов термической обработки сплавов, особенно когда необходимо отвести тепловой поток с большей интенсивностью от поверхности изделия [69]. Этот способ подходит для сложных изделий с участками разной толщины, когда струи воды направляют под давлением в центральную часть массивных элементов для сбалансирования температуры в различных участках изделия. Отмечено, что коэффициент теплопередачи, а значит и плотность теплового потока, могут быть увеличены в несколько

раз при использовании водяной струи. Для оценки коэффициента конвективного теплообмена авторами [69] были применены зависимости для принудительной конвекции, а скорость истечения струи была определена по эмпирической зависимости:

$$\upsilon_{u} = 44 \cdot \sqrt{p} \qquad (1.4)$$

Несмотря на то, что механизмы теплопередачи при воздействии струй воды являются достаточно сложными и пока недостаточно изучены, данный способ хорошо себя зарекомендовал для листа, прутка, изделий сложного профиля и в ряде случаев позволяет отказаться от применения дорогостоящих легирующих элементов [70]. Такой способ охлаждения позволяет создать компактные установки, хотя в [67] отмечен ряд недостатков: необходимость строгой фиксации охлаждаемого профиля относительно струй воды, необходимость водоочистки, низкий коэффициент использования воды и трудности с обеспечением сплошного охлаждения всей поверхности. Последние два недостатка не представляются автору данной работы непреодолимыми, т.к. зависят от рациональности выбора параметров и конструкции форсунки.

Все виды термоупрочнения связаны с процессами теплообмена, причем эти процессы характеризуются значительной нестационарностью, определяющей изменение температур охлаждаемого (нагреваемого) изделия по координатам и во времени. Решения подобных нестационарных задач состоят в определении изменений температурных полей изделия во времени при использовании дифференциального уравнения теплопроводности Фурье с учетом начальных и граничных условий. Именно в точном определении начальных и граничных условий и состоит вся суть подготовки решения. Начальное условие в случае закалки, как правило, представлено определенной температурой, зависящей от марки стали. Такое задание начального условия стало возможным, благодаря тому, что обычно изделие перед закалкой выдерживается в печи для выравнивания температурного поля. Граничными условиями, наиболее полно определяющими процесс охлаждения при термоупрочнении, являются граничные условия теплообмена III рода, когда

задаются температура поверхности охлаждаемого изделия и коэффициент теплоотдачи между этой поверхностью и охлаждающей средой. Следует, однако, иметь в виду, что коэффициент теплоотдачи для рассматриваемой системы зависит от значительного числа факторов, а исчерпывающие данные о величине этой характеристики для тепловых процессов термоупрочнения рельсовых накладок в литературе отсутствуют. По этой причине при использовании граничных условий теплообмена III рода удовлетворительного решения задачи охлаждения накладки получить не удается [71]. Поэтому в практических расчетах используют граничные условия теплообмена II рода, когда на поверхности изделия задаются значения плотности теплового потока и далее путем сравнения заданных (расчётных) и экспериментальных данных устанавливаются значения тепловых потоков, необходимых для обеспечения требуемых условий теплообмена при термоупрочнении. По существу, прибегают к решению обратной задачи теплопроводности, сопоставляя заданный режим охлаждения с получаемым при соответствующих тепловых потоках.

В зависимости от термической массивности подвергаемых тепловой обработке изделий последние подразделяются на термически тонкие и термически массивные. Термическую массивность тел определяют по критерию Био. По рекомендации автора [72] область термически тонких изделий находится при $Bi \leq 0{,}25$, а для термически массивных - $Bi \geq 0{,}5$. В области $0{,}25<Bi<0{,}5$ охлаждаемые (нагреваемые) тела можно принимать либо термически тонкими, либо термически массивными в зависимости от требований решаемой задачи. Данная классификация не является единственной. В [73] показано, что в зависимости от величины погрешности расчёта принимаемых величин число Био может принимать разные значения: при погрешности расчетов 5% для термически тонкого тела $Bi=1{,}0$, при погрешности в 10% - $Bi \leq 2{,}0$. В том же литературном источнике автором предложена формула для расчёта коэффициента термической массивности тела, использование которой существенно упрощает расчёты температурного поля при регулярном режиме. Им также изложена последовательность расчётов при определе-

нии температурного поля изделия, обеспечивающая необходимую точность расчётов.

Классические решения задач нестационарной теплопроводности относятся к телам простой формы: пластине, цилиндру, шару, кубу. В практических условиях зачастую приходится иметь дело с телами сложной формы: профиль рельса, рельсовой накладки и т.п., термическая массивность элементов которых значительно отличается друг от друга. Например, термическая массивность головки рельса значительно больше, чем шейки рельса. Такие особенности изделий сложной конфигурации определяют необходимость различного теплоотвода с головки и шейки рельса при его термоупрочнении. При этом могут быть использованы для охлаждения различные охлаждающие среды – вода, воздух, их комбинация, способные обеспечить требуемую интенсивность охлаждения.

Таким образом, выбор тепловых режимов ускоренного охлаждения, основанный на расчёте теплоотдачи изделий сложной формы, особенно для такой технологии, как струйное охлаждение необходимо производить для каждого конкретного изделия с учётом марки стали, его геометрической формы, термической массивности составляющих его элементов и других важных параметров.

1.4 Выводы и задачи исследования

Охлаждение в объёме охладителя железнодорожного проката не является оптимальным способом термоупрочнения с точки зрения величины коробления изделий, управляемости процессом и стабильности получения свойств. Хорошие результаты в этом отношении даёт легирование, но данный способ не позволяет полностью отказаться от необходимости закалки (для рельсов и отпуска), а также является довольно дорогостоящим. Улучшение профиля рельса и рельсовой накладки увеличивает их износостойкость, но не отменяет необходимости термообработки [4,74]. Наиболее перспективным способом термоупрочнения проката сложного профиля можно считать дифференцированное охлаждение, т.к. позво-

ляет обеспечить управляемость процесса, гарантировать прямолинейность изделий и стабильность механических свойств. Для рельсов такие установки уже применяются, а для рельсовых накладок подобных устройств не существует, единственный предложенный способ закалки в штампе быстродвижущимся потоком воды имеет ряд серьёзных недостатков и не применяется в промышленности. В этой связи задача разработки технологии дифференцированного ускоренного охлаждения накладки и устройства для его реализации является актуальной. Целью разработки технологии ускоренного охлаждения в представленной работе является определение тепловых режимов работы устройства струйного водяного охлаждения, которые обеспечивают требуемые механические свойства и прямолинейность готового изделия.

Основными задачами исследования дифференцированного охлаждения рельсовой накладки являются:

1.Адаптация математической модели нестационарного процесса охлаждения рельсовой накладки для технологии ускоренного водяного охлаждения изделий, имеющих разную массивность элементов профиля, при последующем использовании результатов моделирования для прогнозирования возможных тепловых режимов работы и конструкции устройства ускоренного охлаждения.

2. Исследование на экспериментальной установке ускоренного охлаждения рельсовой накладки тепловых режимов её термоупрочнения, опытная оценка возможностей использования аналога в промышленных условиях, а также разработка рациональной конструкции системы струйного водяного охлаждения, действующей в линии проката рельсовой накладки.

3. Освоение системы струйного охлаждения рельсовой накладки в промышленных условиях, анализ полученных результатов и разработка основных положений технологической инструкции, выполнение которых обеспечит требуемый уровень механических свойств и прямолинейности рельсовых накладок.

2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ СТРУЙНОМ ВОДЯНОМ ОХЛАЖДЕНИИ РЕЛЬСОВОЙ НАКЛАДКИ

Для достижения требуемого нормативной документацией уровня механических свойств после термообработки изделия из металла необходимо получить определённого вида структуру, для чего требуется обеспечить определённые скорости охлаждения в заданных интервалах температур. По сечению изделия эти скорости будут разными, но в первом приближении для предварительной оценки можно использовать среднемассовую скорость охлаждения изделия. За весь период охлаждения она определяется по выражению:

$$\upsilon_{см} = \frac{t_{см_к} - t_{см_н}}{\tau}, \tag{2.1}$$

Среднемассовая скорость охлаждения зависит от многих факторов, в частности, от условий теплообмена на поверхности изделия, его температуры и теплофизических свойств, и изменяется в процессе охлаждения. Экспериментальное её определение составляет предмет отдельного исследования, поэтому на первом этапе целесообразно провести математическое моделирование процесса охлаждения.

В общем случае охлаждение твёрдого тела описывается трёхмерным уравнением нестационарной теплопроводности. Условия охлаждения рельсовой накладки по её длине не меняются, однако её поперечное сечение несимметрично, поэтому для моделирования процесса охлаждения накладки необходимо использовать двумерное уравнение теплопроводности:

$$\rho(t) \cdot c(t) \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda(t) \cdot \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right) \tag{2.2}$$

При задании начальных и граничных условий численное решение этого уравнения позволяет получить динамику температурного поля по поперечному сечению накладки. В ОАО «ВНИИМТ» разработан программный модуль, в кото-

ром решение уравнения (2.2) производится с применением явной схемы конечно-разностной аппроксимации с учётом зависимости теплофизических свойств материала от температуры [75]. Исходные данные для расчёта задаются в виде графического изображения сечения тела и точек расчёта (рисунок 2.1), в качестве начальных условий задавалось распределение температуры по сечению изделия, а граничные условия выбирались в зависимости вида теплообмена на его поверхности.

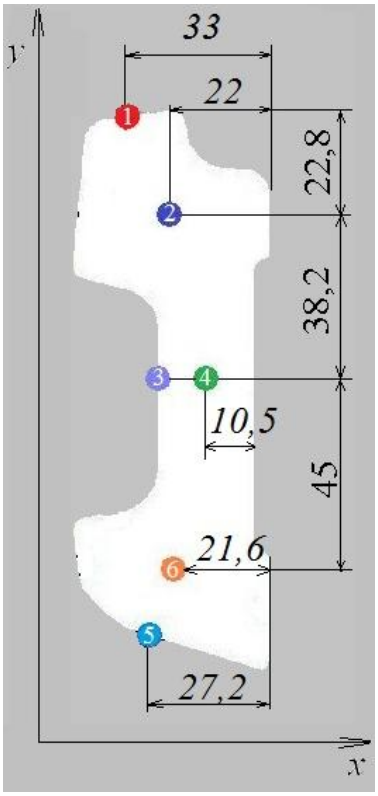


Рисунок 2.1 – Расположение точек расчета по сечению рельсовой накладки Р65 (расстояние в мм)

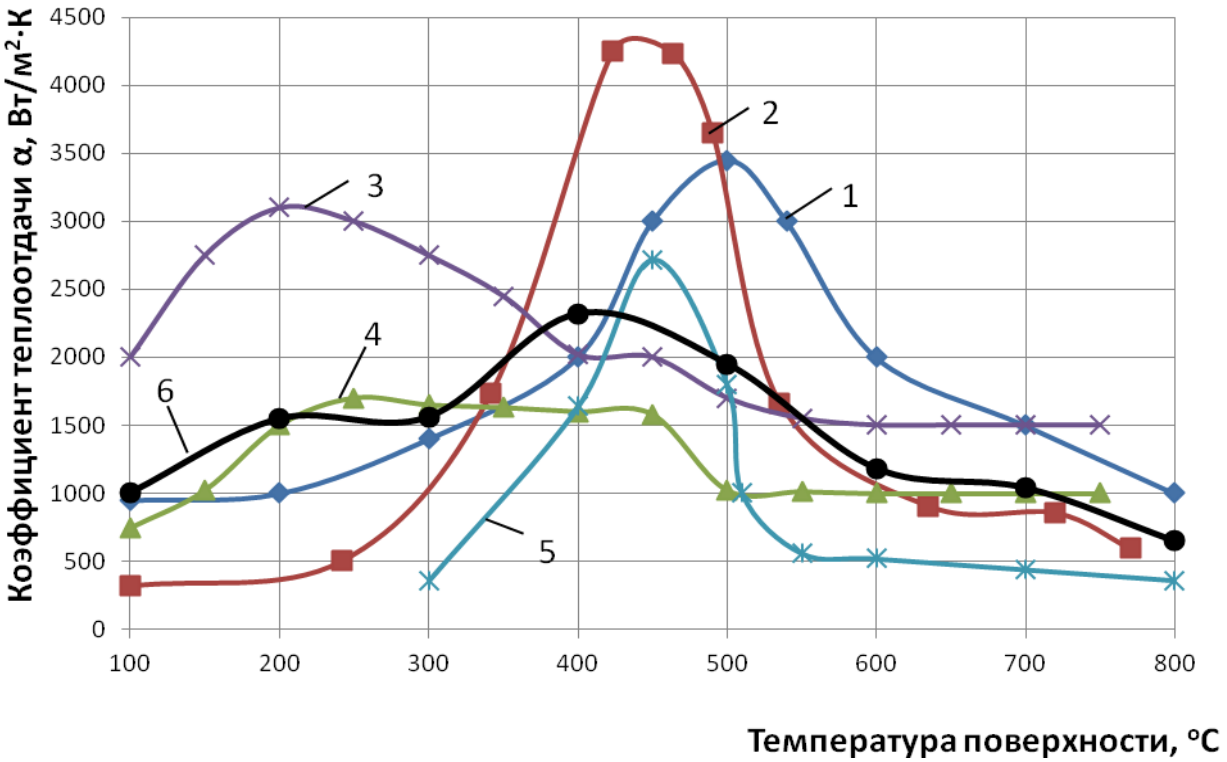
2.1 Математическое моделирование охлаждения рельсовой накладки в баке с маслом

Традиционный способ производства рельсовых накладок предусматривает на последнем этапе закалку в баке с маслом, поэтому изначально было проведено математическое моделирования охлаждение накладки в объёме масла.

Решение уравнения (2.2) для случая охлаждения накладки в баке с маслом производилось с использованием граничных условий третьего рода (закон Ньютона-Рихмана):

$$\begin{cases} \lambda(t)\dfrac{\partial t}{\partial x}\Big|_{x=0} = \alpha(t)\cdot\left(t_{пов} - t_{окр.ср.}\right) \\ \lambda(t)\dfrac{\partial t}{\partial y}\Big|_{y=0} = \alpha(t)\cdot\left(t_{пов} - t_{окр.ср.}\right) \end{cases} \qquad (2.3)$$

Для расчёта коэффициент теплоотдачи α определён обобщением экспериментальных данных ряда авторов [76-79], получено усреднённое значение $\overline{\alpha}$ для температур 800, 700, 600 и далее с шагом 100°С (кривая 6 на рисунке 2.2).



1 – данные [77]; 2 – серебряный шарик Ø20 мм [78]; 3,4 – призматический термозонд 40х40х200 [76]; 5 – масло И-20 при $t_{масла}$= 25 °С [79]; 6 – усреднённое значение коэффициента теплоотдачи $\overline{\alpha}$ по кривым 1-5

Рисунок 2.2 – Зависимость коэффициента теплоотдачи α от температуры поверхности изделия t_n при охлаждении в баке с маслом

Согласно технологической инструкции на производство рельсовых накладок на предприятии ОАО «Объединённый Западно-Сибирский комбинат» [80] на-

кладки после пресса горячей прошивки с температурой порядка 810 ^{o}C поступают на конвейер подачи в масляный бак, температура масла в котором поддерживается в пределах 60-70 ^{o}C. В масле накладка охлаждается в течение приблизительно 5 минут, затем поступает в моечный бак и укладывается на стеллаж готовой продукции. Масло в баке в течение всего процесса перемешивается специальной мешалкой. Исходные данные для расчёта охлаждения накладки в баке с маслом сведены в таблицу 2.1. Охлаждение на воздухе до погружения в бак не учитывалось.

Таблица 2.1– Исходные данные для расчёта охлаждения накладки в баке с маслом

Исходные данные для расчёта в программном модуле	Значение
Температура окружающей среды, т.е. масла, ^{o}C	65
Начальная температура накладки, ^{o}C	810
Время охлаждения, сек.	300
Усреднённые коэффициенты теплоотдачи $\overline{\alpha}$, Вт/м^2·К, (по данным рисунка 2.1) для температур:	
800	800
700	1042
600	1300
500	1900
400	2200
300	1800
200	1549
100	1005

Расчёт охлаждения в масле выполнен для разных точек по сечению накладки, координаты которых приведены на рисунке 2.1. Геометрические размеры накладки Р65 взяты из источника [81]. Изменение температуры в разных точках накладки во времени и распределение температуры по сечению накладки в разные моменты времени показано на рисунках 2.3 и 2.4 соответственно.

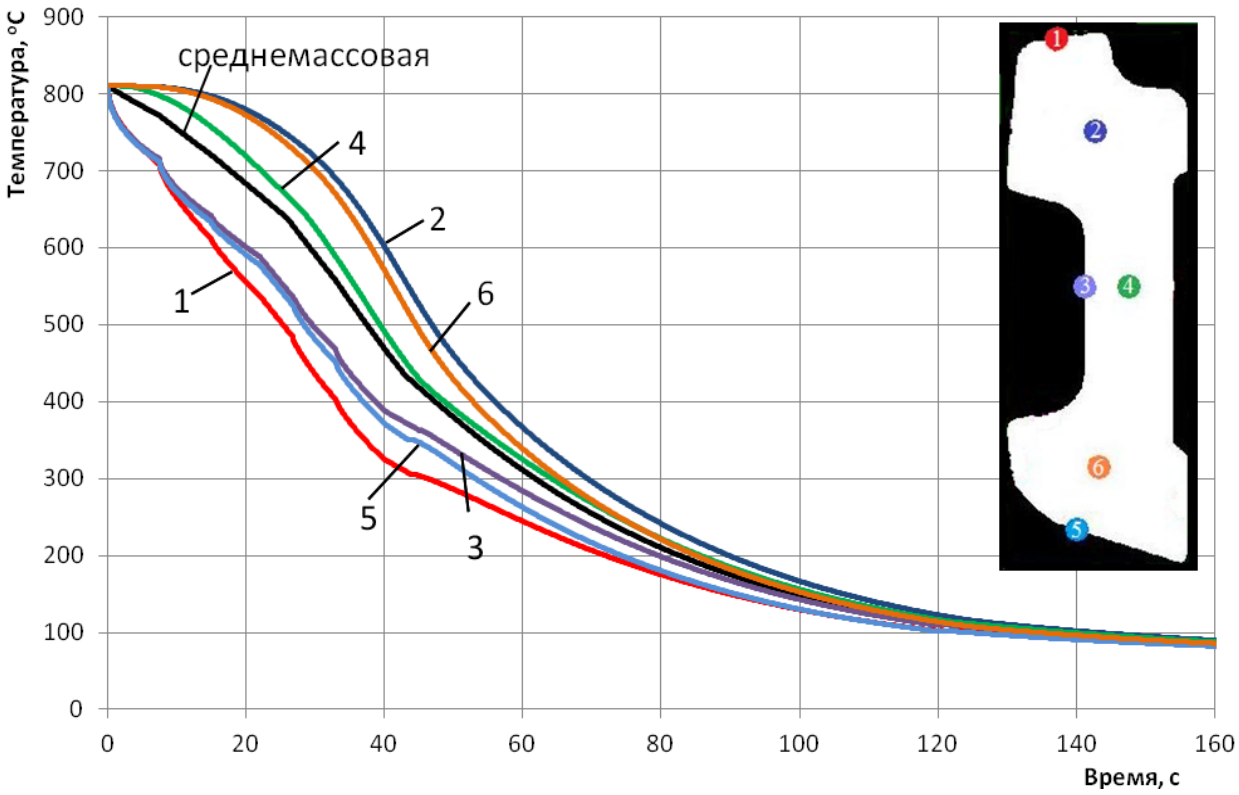
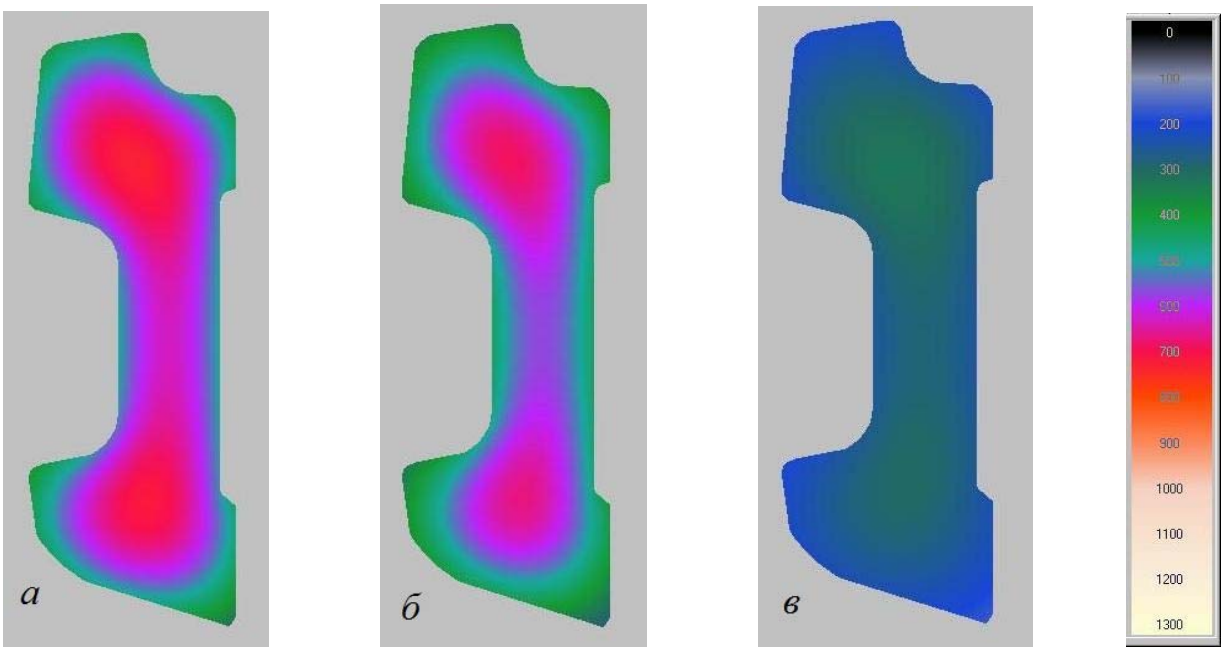


Рисунок 2.3 – Расчётное изменение температуры в точках накладки во времени при охлаждении в масле (номер кривой соответствует номеру расчётной точки)



Время после начала охлаждения: *а* –28 с.; *б* – 35 с.; *в* – 67 с.

Рисунок 2.4 – Расчётное распределение температуры по сечению накладки при охлаждении в масляной ванне

На рисунке 2.3 видно, что середины трёх основных элементов накладки: верхняя, нижняя головки и шейка, охлаждаются с разными скоростями по причине разной их геометрической массивности. Под геометрической массивностью в данном случае понимается отношение объёма к площади охлаждаемой поверхности металла, в которую этот объём заключен. Расчётом, проведенным по размерам сечения накладки Р65, получены следующие значения геометрической массивности её элементов (в мм): верхняя головка – 12,05, шейка – 10,65, нижняя головка – 13,54. Рисунок 2.4 показывает, как происходит перераспределение тепла по профилю накладки между головками и шейкой ввиду разной массивности этих элементов. Шейка остывает быстрее, а головки являются источниками тепла шейки, разогревая её (рисунок 2.4 б). Существующий способ объёмной закалки накладок никак не учитывает разную массивность её элементов, поэтому представленные на рисунке 2.3 скорости охлаждения головок и шейки значительно отличаются.

Усреднённый коэффициент конвективной теплоодачи $\overline{\alpha}$ был определён с шагом 100 ^{o}C (таблица 2.1), поэтому все дальнейшие расчёты производились с этим же шагом. Средние по массе скорости охлаждения в расчётных интервалах температур были определены из выражения:

$$\upsilon_{см} = \frac{\Delta t_{см}}{\Delta \tau} = \frac{t_{см1} - t_{см2}}{\tau_1 - \tau_2} \qquad (2.4)$$

Кроме распределения температуры по сечению накладки программный модуль также позволяет определить плотности теплового потока на каждом расчётном промежутке, соответствующему температурному интервалу в 100 ^{o}C, по уравнению:

$$q = \frac{\rho \cdot V \cdot (c_1 \cdot t_{см1} - c_2 \cdot t_{см2})}{S \cdot \tau} \qquad (2.5)$$

Расчётные средние скорости охлаждения и плотности теплового потока в температурных интервалах представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Расчётная среднемассовая скорость охлаждения и плотность теплового потока в различных интервалах температур при охлаждении рельсовой накладки в оюъёме масла

Интервал температур, ^{o}C	Расчётная среднемассовая скорость охлаждения, ^{o}C/с	Расчётная плотность теплового потока, МВт/м^2
800-700	6,2	0,45
700-600	8,7	0,55
600-500	12,2	0,58
500-400	10,1	0,70
400-300	6,9	0,50
300-200	4,8	0,25
200-100	1,9	0,06

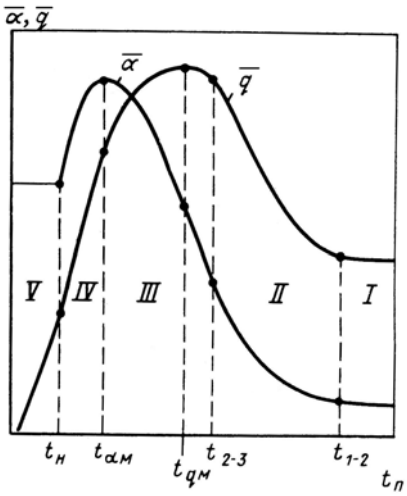
Таким образом, с помощью математического моделирования с применением усреднённых коэффициентов теплоотдачи, определённых по температуре поверхности для разных изделий, были получены средние по массе скорости охлаждения рельсовой накладки в различных температурных интервалах.

Как видно из представленных данных, закалка в масле – это довольно «мягкое» охлаждение по сравнению с охлаждением водяными струями, где скорости охлаждения могут составлять до сотен градусов в секунду [54]. Для имитации относительно «невысоких» средних скоростей охлаждения был рассмотрен вариант прерванного струйного водяного охлаждения с самоотпуском.

2.2 Математическое моделирование охлаждения рельсовой накладки плоскими струями воды и обоснование выбора конструкции устройства

Наибольшую сложность, определяющую адекватность результатов расчёта в случае струйного охлаждения, представляет задание граничных условий, т.е. условий теплового взаимодействия поверхности тела с окружающей средой. Охлаждение струями воды – процесс чрезвычайно сложный вследствие наличия различных режимов кипения воды, выраженной нестационарности процесса при одновременном протекании всех трёх видов теплообмена: конвекции, излучения и

теплопроводности. Локальные параметры теплообмена в месте натекания струи могут в десятки раз отличаться от их усреднённых значений по длине секции или всего устройства охлаждения [82, 83]. На рисунке 2.5 в общем виде приведены сведения о качественном характере изменения средней плотности теплового потока $\bar{q}$ и среднего коэффициента теплоотдачи $\bar{\alpha}$ от температуры поверхности изделия t_n, полученные на основе экспериментальных данных.



I–V – периоды охлаждений, отличающимися закономерностями теплообмена

Рисунок 2.5 – Зависимость средней плотности теплового потока $\bar{q}$ и среднего коэффициента теплоотдачи $\bar{\alpha}$ при струйном водяном и водо-воздушном охлаждении от температуры поверхности t_n охлаждаемого металла [82]

Как видно из рисунка 2.5, в периоды охлаждений I-III при изменении плотности теплового потока до максимума средний коэффициент теплоотдачи $\bar{\alpha}$ меняется в несколько раз, тогда как значение $\bar{q}$ гораздо стабильнее, поэтому при расчёте в течение периодов I-III следует использовать граничные условия второго рода. В последующие периоды перехода к конвективному теплообмену IV-V более стабильной является величина $\bar{\alpha}$, а значит, здесь применимы граничные условия третьего рода. Вид зависимостей $\bar{q} = f(t_n)$ и $\bar{\alpha} = f(t_n)$ для конкретного устройства охлаждения и охлаждаемого изделия определяются экспериментально.

Для толстого листа экспериментами [76, 84] не удалось установить чётко выраженную зависимость усреднённых по длине секции величин тепловых пото-

ков от температуры поверхности $\bar{q} = f(\overline{t_n})$ при t_n>100 °С. Эксперименты показали линейное возрастание плотности теплового потока с увеличением плотности орошения ω, $\frac{м^3}{м^2 \cdot ч}$, т.е. $\bar{q} = f(\omega)$ при t_n>100°С. В итоге был сделан вывод [84], что в инженерных расчётах при t_n>100 °С можно использовать эмпирические выражения $\bar{q} = a + b(\omega)$. Увеличение плотности орошения приводит к возрастанию значения $t_{1\text{-}2}$ (рисунок 2.5) и смещению максимума плотности тепловых потоков в область более высоких температур и за счёт сокращения длительности периода I, расширяются периоды II и III.

Таким образом, только в случае t_n<100 °С применение граничных условий третьего рода при струйном водяном охлаждении изделия будет корректным. Когда же t_n>100 °С, то при расчётном моделировании необходимо использовать граничные условия второго рода, которые требуют адаптации модели к реально существующим условиям теплового взаимодействия поверхности изделия и водяных струй. В процессе адаптации обычно используются экспериментальные данные, отражающие интенсивность теплообменных процессов при охлаждении изделия.

Для изделий простой формы, как для толстого листа разного сортамента, прутка, накоплены обширные экспериментальные данные по охлаждению водяными струями, известен вид выражения $\bar{q} = f(\omega)$, что с успехом может применяться при расчётном моделировании без проведения промышленных и экспериментальных исследований. Для изделий сложного профиля с различной термической массивностью элементов таких, как рельсовая накладка, подобных экспериментальных данных нет. Поэтому требуется наряду с аналитическими исследованиями проведение экспериментального моделирования процесса охлаждения для уточнения граничных условий и оценки основных конструктивных характеристик устройства (количество и параметры форсунок, длина устройства и т.д.). Проведение экспериментов на выбранной с учётом результатов моделирования конструкции устройства позволит осуществить адаптацию математической модели к

существующим условиям (т.е. уточнять граничные условия), при необходимости вносить корректировку в параметры устройства, выбирая наиболее оптимальные режимы его работы.

При расчётном моделировании были заданы следующие начальные и граничные условия:

Начальное условие:

$$T(\tau_0) = T_{нач} = \text{const}, \tag{2.6}$$

Граничные условия:

- третьего рода (при естественном охлаждении на воздухе – закон Ньютона-Рихмана и излучение):

$$\begin{cases} \lambda(t)\dfrac{\partial t}{\partial x}\Big|_{x=0} = \alpha\left(t_{пов} - t_{окр.ср.}\right) + \varepsilon_м c_0\left[\left(\dfrac{T_{пов}}{100}\right)^4 - \left(\dfrac{T_{окр.ср.}}{100}\right)^4\right] \\ \lambda(t)\dfrac{\partial t}{\partial y}\Big|_{y=0} = \alpha\left(t_{пов} - t_{окр.ср.}\right) + \varepsilon_м c_0\left[\left(\dfrac{T_{пов}}{100}\right)^4 - \left(\dfrac{T_{окр.ср.}}{100}\right)^4\right] \end{cases}, \tag{2.7}$$

- второго рода при $t_п$>100 ^oC и третьего рода при $t_п$<100 ^oC (охлаждение струями воды):

$$\begin{cases} \lambda(t)\dfrac{\partial t}{\partial x}\Big|_{x=0} = \begin{cases} q \text{ при } \quad T_{пов} \geq 100^o C \\ \alpha\left(t_{пов} - t_{окр.ср.}\right) \quad \text{при } T_{пов} < 100^o C \end{cases} \\ \lambda(t)\dfrac{\partial t}{\partial y}\Big|_{y=0} = \begin{cases} q \text{ при } \quad T_{пов} \geq 100^o C \\ \alpha\left(t_{пов} - t_{окр.ср.}\right) \quad \text{при } T_{пов} < 100^o C \end{cases} \end{cases}, \tag{2.8}$$

При задании граничных условий (2.8) использовали аналитические зависимости удельного теплового потока от плотности орошения водой, полученные экспериментально в промышленных условиях на устройствах контролируемого охлаждения разного типа [76, 85]. На рисунке 2.6 приведена такая зависимость для толстого листа стана 5000 (г.Колпино) [76].

Учитывая, что максимальное расчётное значение плотности теплового потока при охлаждении накладки в баке с маслом составило 0,7 МВт/м^2 (таблица 2.2), то по данным рисунка 2.6, оцениваем необходимую плотность орошения: для

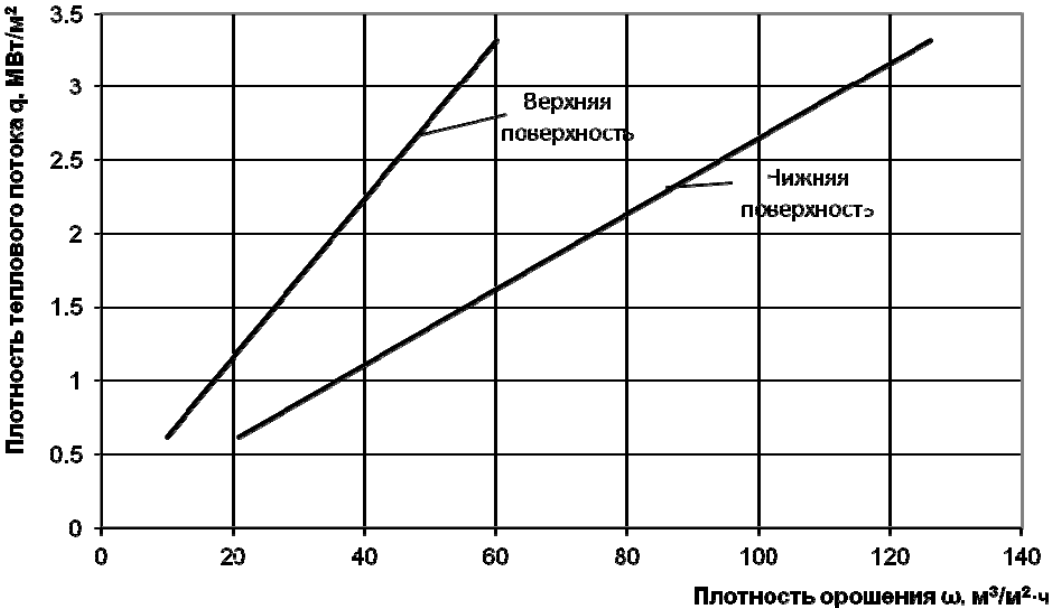


Рисунок 2.6 – Экспериментально полученная аналитическая зависимость плотности теплового потока от плотности орошения для верхней и нижней поверхностей толстого листа [76]

верхней поверхности накладки не менее 15 $м^3/м^2·ч$, для нижней – 30 $м^3/м^2·ч$. При этом необходимо предусмотреть широкий диапазон режимов охлаждения в устройстве, а значит, высокие значения плотностей орошения, следовательно, и расходов воды. В частности для нижней поверхности накладки по данным рисунка 2.6 максимальное значение плотности орошения составит 130 $м^3/м^2·ч$, а плотность теплового потока – 3,3 $МВт/м^2$, для верхней – 60 $м^3/м^2·ч$ и 3,3 $МВт/м^2$ соответственно. По выбранным параметрам охлаждения проведён многовариантный расчёт температурного поля по сечению накладки при разных значениях плотностей тепловых потоков на шейке и головках. Таким образом, были смоделированы различные режимы охлаждения от полной закалки до закалки с самоотпуском. Расположение расчётных точек приведено на рисунке 2.1. Исходные данные, необходимые для расчёта, сведены в таблицу 2.3.

Таблица 2.3 – Исходные данные для расчёта охлаждения накладки струями воды

Исходные данные для расчёта в программном модуле	Значение
Температура окружающей среды, ^{o}C	20
Начальная температура накладки, ^{o}C	880
Коэффициент теплоотдачи при охлаждении на воздухе α, Вт/м^2·К	12
Степень черноты металла, ε	0,85
Время охлаждения на воздухе, с	10
Время охлаждения в воде, с	30
Плотность теплового потока, МВт/м^2:	
нижней и верхней поверхности накладки	3,3
боковых поверхностей	2,8

На рисунке 2.7 представлен результат расчёта по данным таблицы 2.3. При этом на протяжении всего времени охлаждения для верхней и нижней поверхности принято максимальное значение плотности теплового потока, выбранное по рисунку 2.6, для боковых поверхностей это значение было снижено на 15%. На рисунке 2.8 приведён результат расчёта при охлаждении в воде с максимальным значением плотности теплового потока, соответствующем маслу, – 0,7 МВт/м^2 (таблица 2.2) в течение – 90 с. Полученное таким способом время охлаждения в дальнейшем позволит определить длину устройства.

Проведён расчёт прерванного охлаждения с заданием различных значений плотности тепловых потоков на шейке и головках. В первом варианте расчёта прерывание охлаждения производилось однократно, во втором – двукратно.

В этих вариантах расчёта плотности тепловых потоков на верхней, нижней и боковых поверхностях выбраны таким образом, чтобы обеспечить одинаковую интенсивность охлаждения разномассивных элементов накладки. Исходные данные, задаваемые в программный модуль для обоих вариантов, сведены в таблицу 2.4.

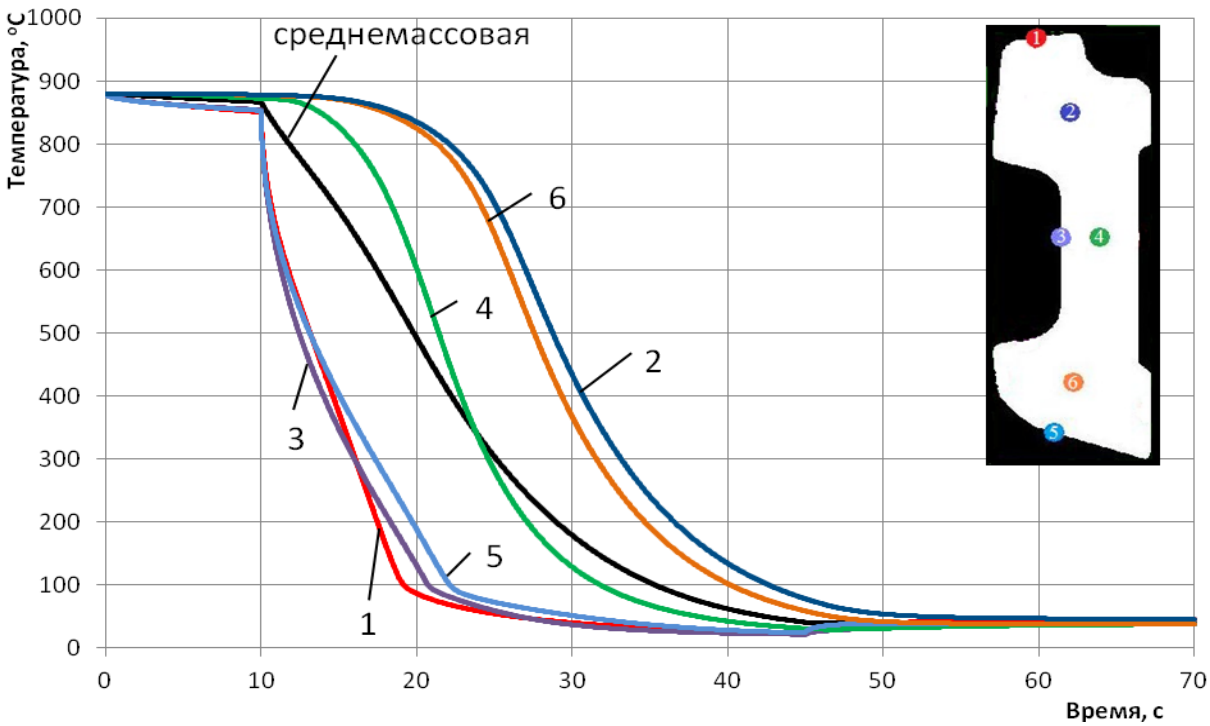


Рисунок 2.7 – Расчётное изменение температуры разных точек накладки во времени при полной закалке при q = 3,3 и 2,8 МВт/м^2 для верхних/нижних и боковых поверхностей накладки соответственно (номер кривой соответствует номеру расчётной точки)

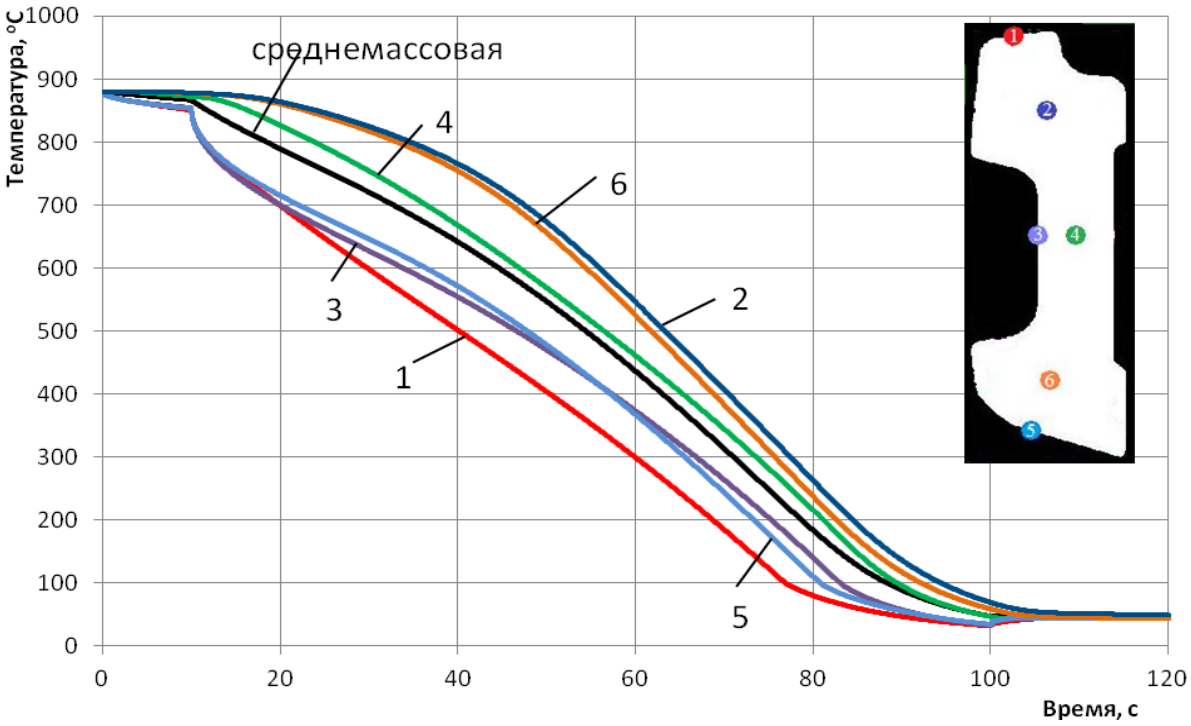


Рисунок 2.8 – Расчётное изменение температуры разных точек накладки во времени при полной закалке при q = 0,7 МВт/м^2

Таблица 2.4 – Исходные данные для расчёта прерванного охлаждения накладки струями воды

Исходные данные для расчёта в программном модуле	Значение
Температура окружающей среды, ^{o}C	20
Начальная температура накладки, ^{o}C	880
Коэффициент теплоотдачи при охлаждении на воздухе α, Вт/м^2·К	12
Степень черноты металла, ε	0,85
Время движения на воздухе до начала охлаждения, с	10
Однократное прерывание охлаждения:	
Плотность теплового потока, МВт/м^2:	
нижней и верхней поверхностей накладки	3,8
боковой поверхности верхней головки	2,8
боковой поверхности нижней головки	2,4
Длительность прерывания охлаждения, с	5
Плотность теплового потока, МВт/м^2:	
нижней и верхней поверхности накладки	2,3
боковой поверхности верхней головки	1,8
боковой поверхности нижней головки	1,7
Двукратное прерывание охлаждения:	
Плотность теплового потока, МВт/м^2:	
нижней и верхней поверхности накладки	3,8
боковой поверхности верхней головки	2,8
боковой поверхности нижней головки	2,4
Длительность прерывания охлаждения, с	5
Плотность теплового потока, МВт/м^2:	
нижней и верхней поверхности накладки	3,3
боковой поверхности верхней головки	2,43
боковой поверхности нижней головки	2,1
Длительность прерывания охлаждения, с	4
Плотность теплового потока, МВт/м^2:	
нижней и верхней поверхности накладки	1,57
боковой поверхности верхней головки	1,12
боковой поверхности нижней головки	1,0

Полученные расчётные кривые изменения температуры во времени различных точек накладки приведены на рисунках 2.9 и 2.10.

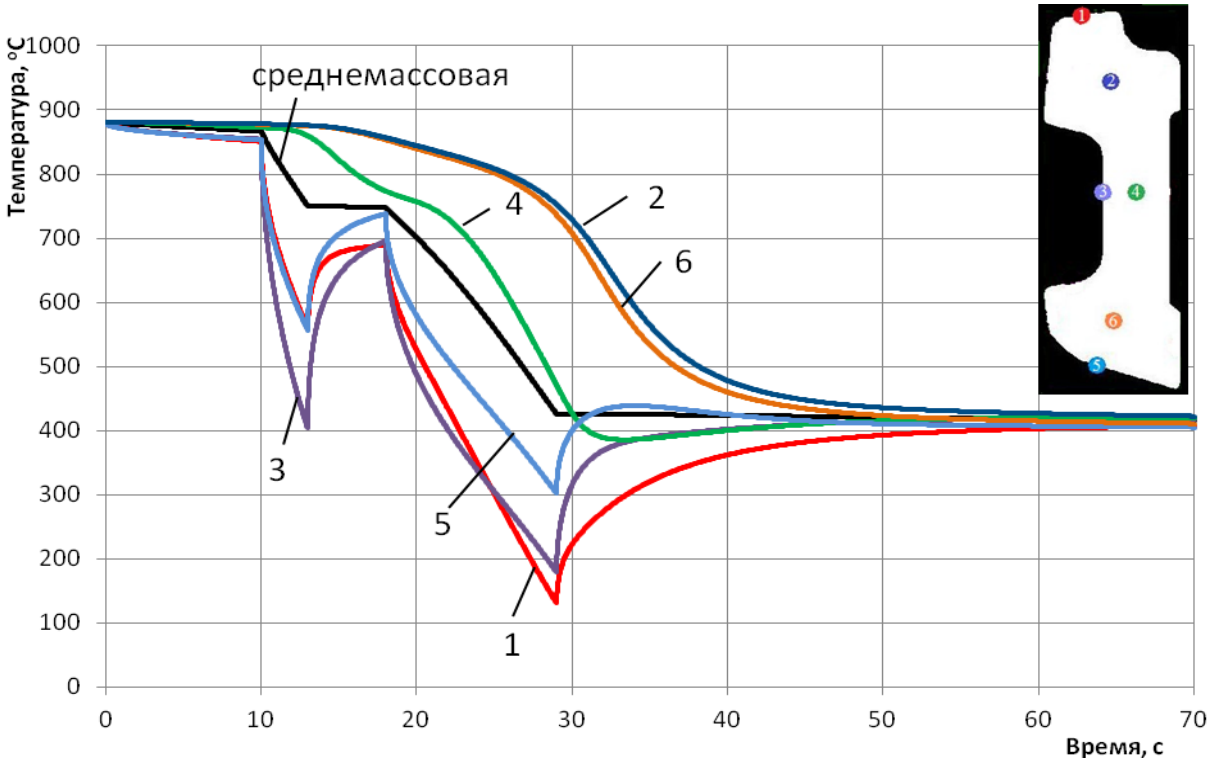


Рисунок 2.9 – Расчётное изменение температуры разных точек накладки во времени при однократном прерывании охлаждения (номер кривой соответствует номеру расчётной точки)

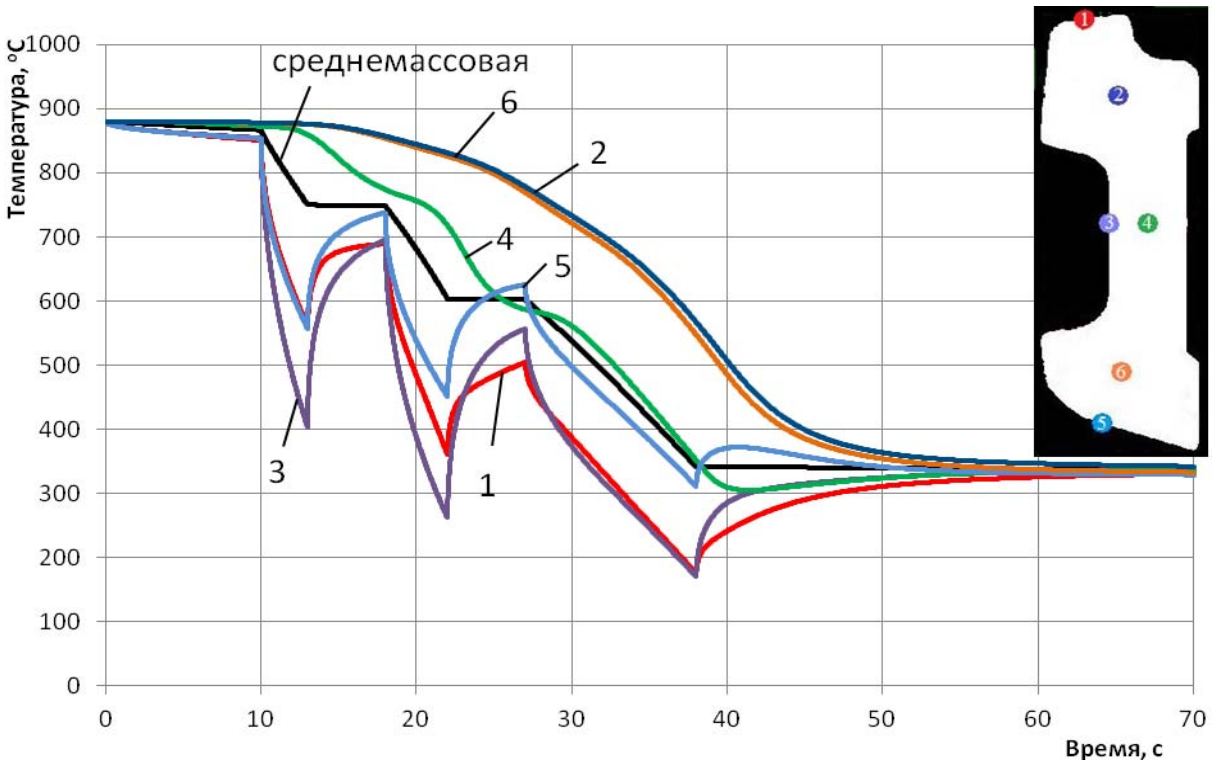


Рисунок 2.10 – Расчётное изменение температуры разных точек накладки во времени при двукратном прерывании охлаждения

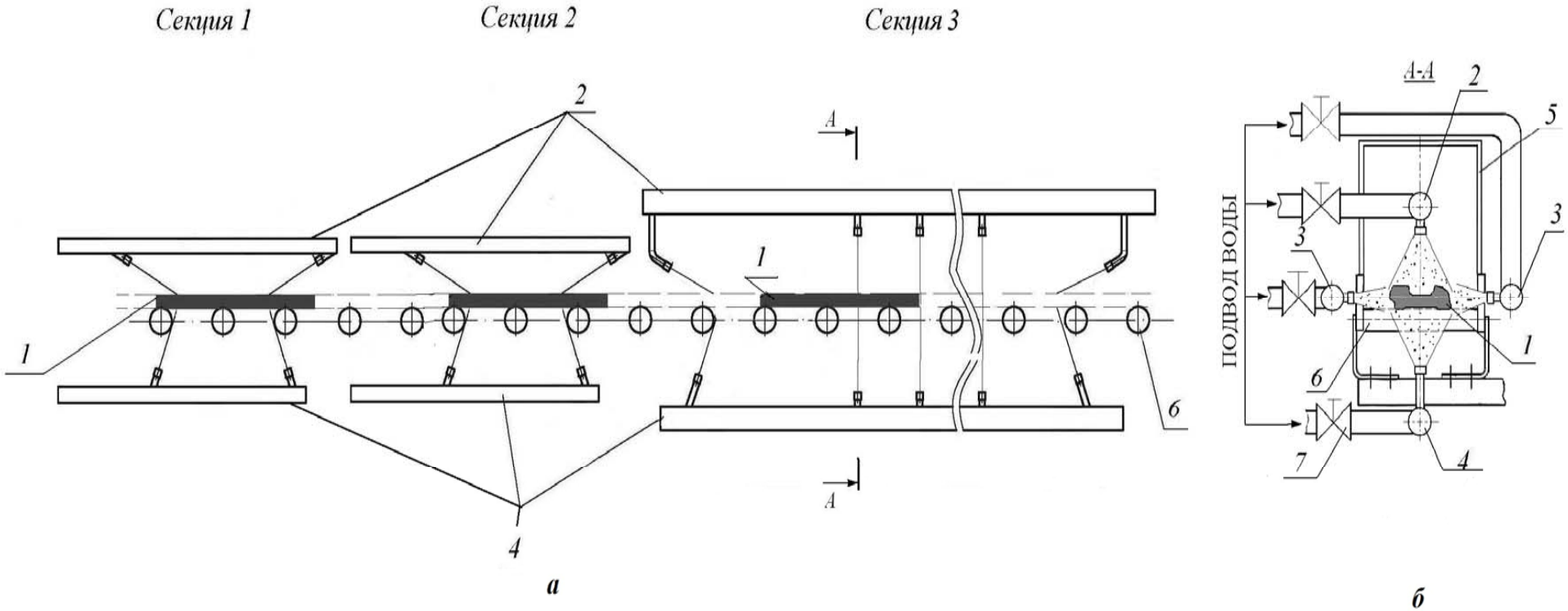
Средние по массе скорости охлаждения накладки в случае осуществления режимов, представленных на рисунках 2.7–2.10, сведены в таблицу 2.5.

Таблица 2.5 – Расчётные среднемассовые значения скоростей охлаждения накладки по режимам рисунков 2.7–2.10

Среднемассовая скорость охлаждения	Значение, ^{o}C/c
На рисунке 2.7	23,6
На рисунке 2.8	9,10
На рисунке 2.9 первый период охлаждения водой второй период охлаждения водой	 39 29,3
На рисунке 2.10 первый период охлаждения водой второй период охлаждения водой третий период охлаждения водой	 39,0 36,1 21,7

Как видно из таблицы 2.5 обработка накладок по рассчитанным в ходе численного моделирования тепловым режимам позволит получить широкий диапазон среднемассовых скоростей охлаждения накладки: от высокоинтенсивных до значений близких к маслу. Такой способ обработки накладок позволит осуществлять управление процессом охлаждения, а также обеспечивать одинаковые условия охлаждения для разномассивных элементов накладки, что недостижимо при объёмной закалке в масле.

По результатам расчётного моделирования была предложена конструкция устройства, состоящая из трёх секций, между которыми организовано два воздушных промежутка (рисунок 2.11). Такая конструкция позволит осуществлять охлаждение накладки с различными скоростями, тем самым даст возможность опробовать широкий диапазон режимов охлаждения и выбрать наиболее подходящий. Было предложено использовать форсунки с плоским факелом, установленные перпендикулярно к поверхности накладки с четырёх сторон.



а – вид сбоку: ***б*** – один контур охлаждения.

1 – рельсовая накладка; 2 – верхний подводящий коллектор; 3 – боковые подводящие коллекторы; 4 – нижний подводящий коллектор;

5 – защитный кожух; 6 – ролики; 7 – вентиль

Рисунок 2.11 – Схема экспериментального устройства ускоренного струйного охлаждения рельсовых накладок

Плоский факел позволит избежать возникновения «паровой рубашки» на поверхности накладки. Кроме того, регулируя плотность орошения, можно управлять процессом охлаждения, следовательно, влиять на прямолинейность готового изделия, к чему предъявляются довольно жёсткие требования[12].

Полученные расчётные данные в первом приближении позволяют оценить расходы воды будущего устройства для верхней и нижней поверхностей накладки по следующему выражению:

$$G = \omega \cdot S_{пов} \tag{2.9}$$

Площадь нижней поверхности рассчитываем с помощью уравнения:

$$S_{пов} = l \cdot b \tag{2.10}$$

Подробные расчёты характеристик по выражениям (2.9) и (2.10) приведены в приложении А.

Определённые расходы воды (приложение А) позволили оценить диаметр форсунок по выражению:

$$d = \mu \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot G}{\pi \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h}}} \tag{2.11}$$

Диаметры верхних форсунок были оценены в 4,7-6,9 мм. В случае необходимости получения бóльших значений расходов, можно установить несколько форсунок с диаметрами отверстия в соответствии с выбранными пределами.

Расчётное время охлаждения, представленное на рисунках 2.7–2.10, позволило определить длину устройства. При скорости движения накладки 0,061 м/с, которую способно обеспечить действующее на стенде ВНИИМТ оборудование, и минимальном времени охлаждения, равном 20 с (рисунок 2.9), получаем длину устройства 1,5 м, при времени охлаждения, представленном на рисунке 2.7, равном 35 с, длина устройства будет 2,2 м, при максимальном времени охлаждения, равном 90 с (рисунок 2.8), – 5,5 м. Ввиду ограниченности стендовой площади разместить установку длиной 5,5 м не

представлялось возможным, поэтому для осуществления охлаждения согласно рисунку 2.8 можно провести «покачивание» накладки в последней секции. Таким образом, для проведения различных режимов охлаждения оцениваем длину устройства в 2,5–2,7 м.

Количество форсунок в конечном итоге будет зависеть от расхода воды и принятой интенсивности охлаждения в каждой секции устройства. Предварительно необходимо было заложить наибольшее их число, чтобы в случае необходимости можно было обеспечить максимальные расходы воды. Для получения минимальных расходов воды часть форсунок можно заглушить. Общее количество форсунок для верхней поверхности составило 9 шт., столько же потребовалось для нижней и боковых поверхностей накладки.

Все рассчитанные конструктивные параметры устройства сведены в таблицу 2.6.

Таблица 2.6 – Основные конструктивные параметры устройства, определённые в ходе численного моделирования процесса охлаждения рельсовой накладки

Параметр устройства	Значение
Длина устройства, м	2,5-2,7
Расходы воды, $м^3$/ч: верх низ	 1,1-8,64 1,8-15,6
Ориентировочный диаметр форсунок, мм верх низ	 6-7 8-9
Общее количество форсунок на устройстве, шт	36

Таким образом, на основе проведённого расчётного моделирования предварительно были оценены конструктивные параметры устройства и намечены различные режимы охлаждения, которые требуют уточнения в условиях эксперимента.

2.3 Экспериментальная установка для реализации процесса струйного охлаждения рельсовой накладки.

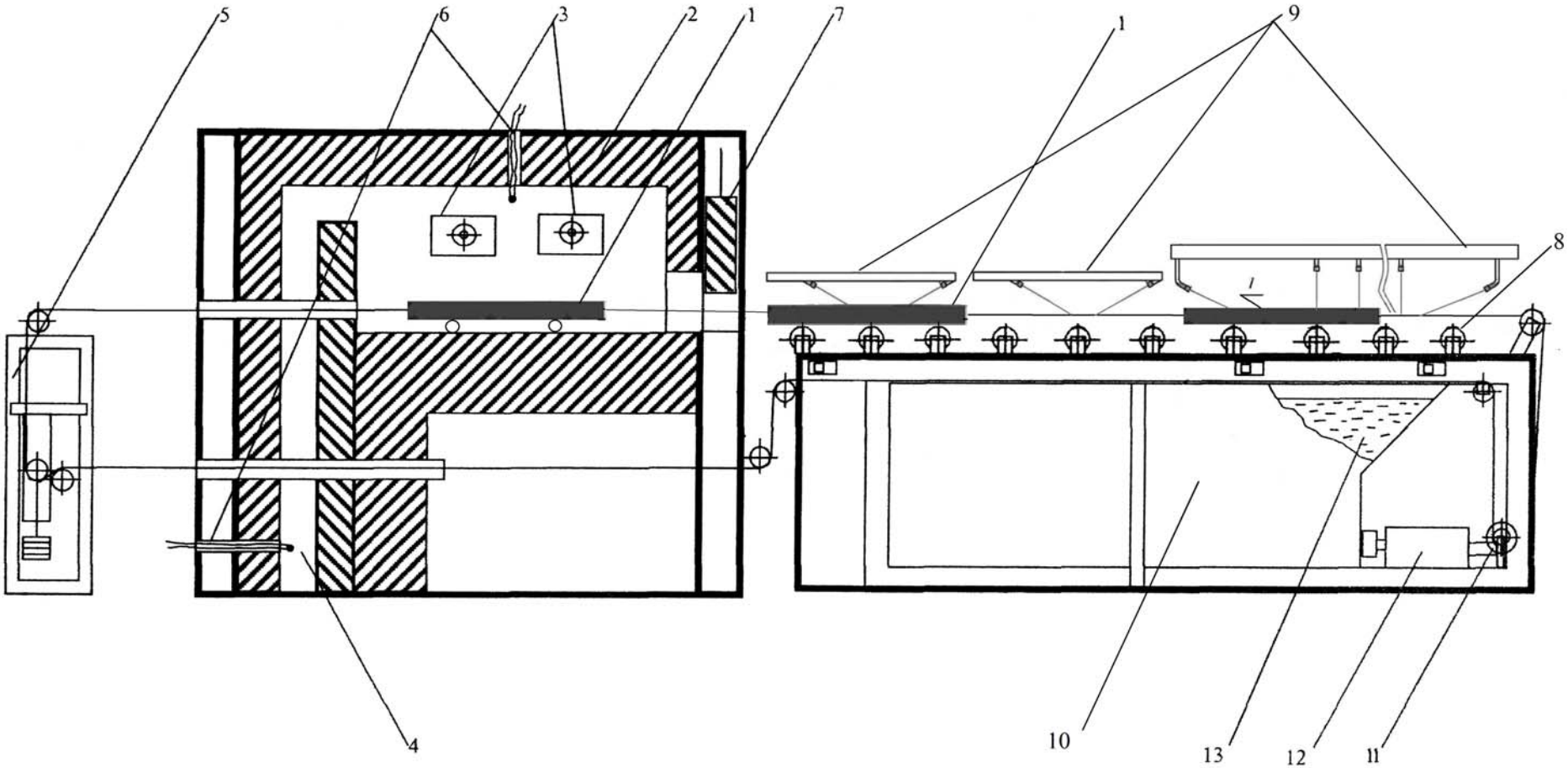
Для проведения экспериментальных исследований по охлаждению рельсовой накладки струями воды на стенде ОАО «ВНИИМТ» смонтирована установка с устройством ускоренного охлаждения. Установка соответствовала следующим требованиям:

1. физическая модель экспериментальной установки являлась прототипом промышленного устройства;
2. установка оборудована средствами КИПиА, необходимыми для контроля и управления процессами нагрева и охлаждения;

Общий вид установки представлен на рисунке 2.12. Она включала: камерную газовую печь 2, оснащённую четырьмя горелками 3, с размером рабочего пространства 1,7×0,7×1,508 м, бак с водой 10 объёмом 13 м^3, откуда поступала вода как в систему охлаждения рельсовых накладок 9, так из неё с помощью насоса 12, то есть цикл водоснабжения являлся замкнутым. Для перемещения накладки по роликам рольганга 8 служила система натяжения, включающая натяжное устройство 5 и привод 11.

Расположение накладки Р65 длиной 1000 мм в нагревательной печи представлено на рисунке 2.13.

Контроль и запись температуры образца во время нагрева и охлаждения осуществлялись хромель-алюмелевыми термопарами. Термопары были приварены к поверхности рельсовой накладки контактной сваркой при помощи конденсаторного разрядного аппарата. Расположение термопар по длине образца, а также схема их заделки на поверхности накладки приведены на рисунках 2.14 и 2.15 соответственно.



1 – рельсовая накладка Р65; 2 – нагревательная печь; 3 – горелки; 4 – дымоудаление; 5 – натяжное устройство; 6 – термопары печи; 7 – заслонка печи; 8 –рольганг; 9 – система охлаждения рельсовой накладки; 10 – бак, 11 – привод; 12 – насос; 13 – вода

Рисунок 2.12 – Общая схема экспериментальной установки по охлаждения рельсовой накладки водяными струями

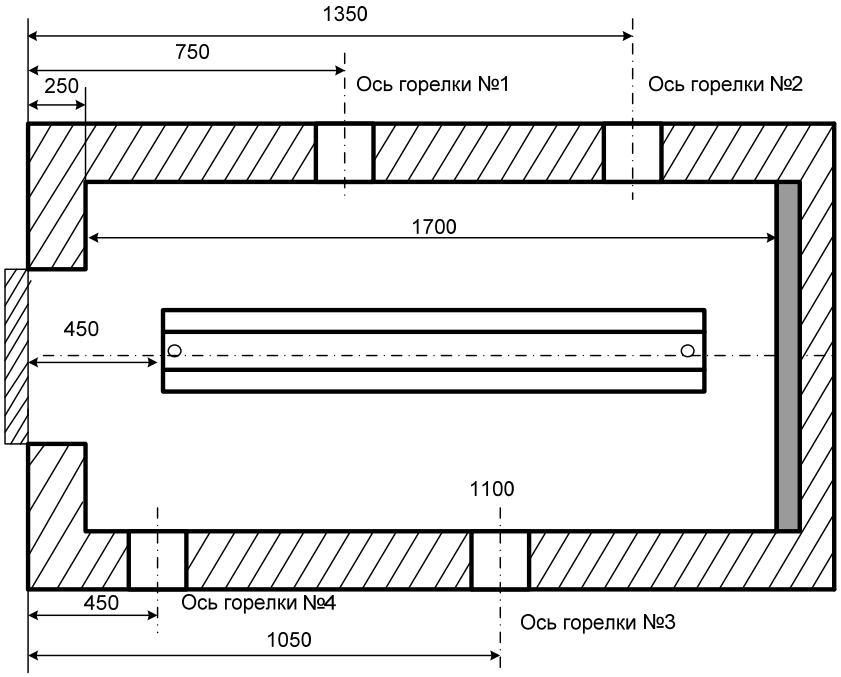
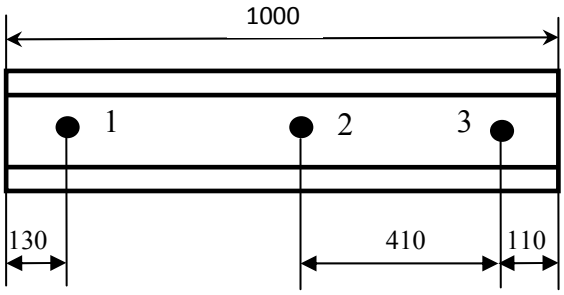
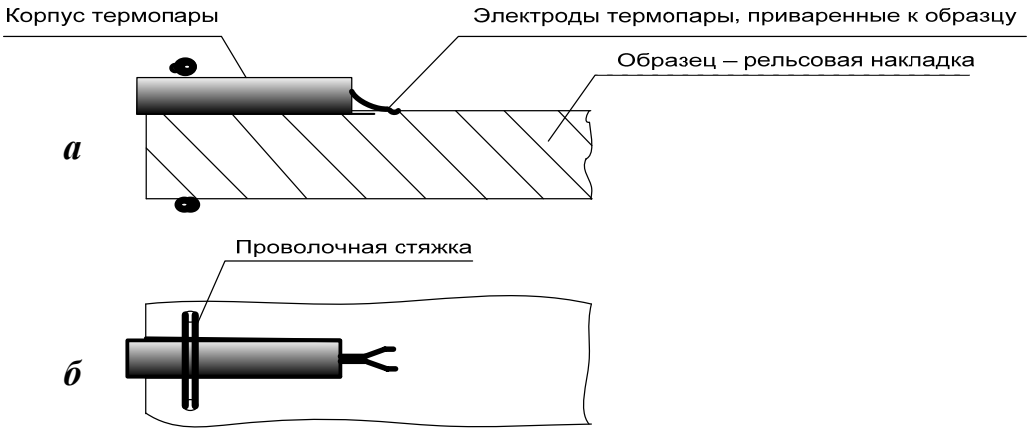


Рисунок 2.13 - Расположение рельсовой накладки в печи (вид сверху)



1,2,3 – номера термопар

Рисунок 2.14 – Расположение термопар на поверхности рельсовой накладки (накладка показана условно без отверстий)



а – вид сбоку, *б* – вид сверху

Рисунок 2.15 – Схема заделки термопары на поверхности образца

Устройство струйного водяного охлаждения состояло из трёх секций (рисунок 2.11). Первая секция высокоинтенсивного охлаждения обусловливала получение структуры накладки, вторая и третья секции низкоинтенсивного охлаждения позволяли минимизировать напряжения в теле накладки.

Подача воды на охлаждение накладок в каждой секции организована с 4-х сторон из коллекторов 2,3,4 с плоскоструйными форсунками специальной конструкции (рисунок 2.11). Расход воды на каждый коллектор регулировался раздельно вентилями 7. Регулирование расхода воды, подаваемой на охлаждение, в том числе с дифференциацией расхода на разномассивных элементах накладки (головка, шейка), позволило обеспечить одинаковые скорости охлаждения и устранить вероятность коробления.

Общий расход воды на установку охлаждения контролировался по показаниям расходомера типа «ВЗЛЁТ», расположенного на линии нагнетания насоса. Раскрытие факела в месте натекания на поверхность накладки составило: сверху и снизу 140-160 мм, на боковых частях 50-60 мм.

После последнего ряда форсунок был установлен сдув влаги с образца сжатым воздухом для устранения влияния остаточной воды на показания термопар после каждой секции.

Измерительный комплекс предназначен для регистрации динамики температуры накладки при нагреве, ускоренном охлаждении и после охлаждения. Включал в себя термоэлектрические преобразователи, компенсационные провода, аналоговый модуль ввода/вывода данных, портативный компьютер. Компенсационные провода соединяли термопару с вторичным измерительным прибором (модулем), который преобразовывал сигнал термоЭДС в цифровой (рисунок 2.16). Преобразованный сигнал выводился на экран ноутбука, что позволяло отслеживать температуру образца и одновременно проводить запись показаний в память компьютера. Частота записи показаний при охлаждении составила 0,1 секунды.

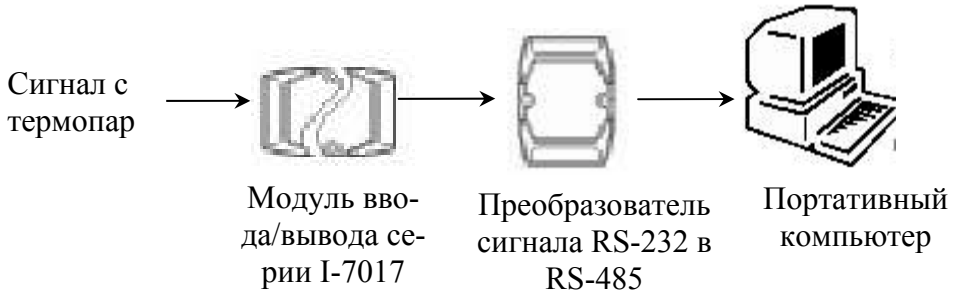


Рисунок 2.16 – Схема преобразования сигнала термопар и записи результатов измерений

Характеристики приборов измерительного приведены в приложении Б. Общая погрешность измерения термокабеля, компенсационных проводов и преобразователей составила не более ±5,2 ^{o}C, пирометров ±7°C.

Экспериментальные исследования были разделены два этапа: теплотехнические и технологические эксперименты. В ходе теплотехнических экспериментов проводилось охлаждение накладок на разных режимах от прерванного охлаждения до полной закалки (рисунки 2.7–2.10). Технологические эксперименты предполагали исследование механических свойств и микроструктуры накладки после охлаждения на выбранных при проведении теплотехнических экспериментов режимах работы устройства.

2.4 Теплотехнические эксперименты по охлаждению накладки и адаптация математической модели

Теплотехнические эксперименты проводились с целью уточнения фактических значений плотностей тепловых потоков по секциям при различной ориентации поверхности накладки и расходах воды, определения режимов работы системы охлаждения, обеспечивающих одинаковую температуру разномассивных элементов после окончания ускоренного охлаждения, и проведения адаптации математической модели.

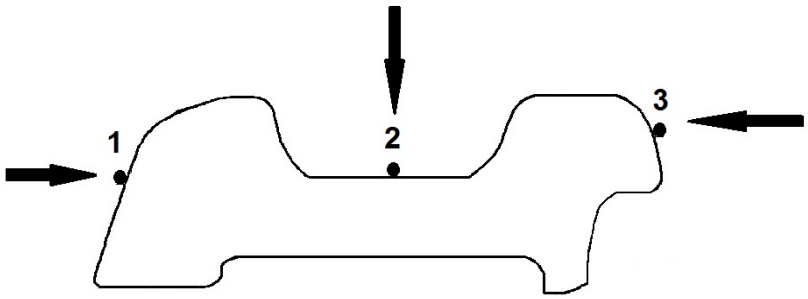
Для проведения экспериментальных исследований филиал ОАО «ЕВРАЗ НТМК»-Нижнесалдинский металлургический завод поставил ОАО

«ВНИИМТ» партию рельсовых накладок Р65 длиной 1000 мм и 800 мм с химическим составом, представленным в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Химический состав рельсовых накладок (в %), предоставленных для экспериментов

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu
0,53	0,22	0,81	0,017	0,015	0,09	0,10	0,21

При нагреве в печи для прогрева по сечению после достижения поверхностью накладки температуры 880-890 ^{o}C образец выдерживался не менее 20 минут. Нагретая накладка с заданной скоростью с помощью электропривода транспортировалась из печи через охлаждающее устройство, представляющее собой последовательную систему плоских водяных факелов (рисунок 2.11, разрез А-А). Температура поверхности накладки регистрировалась и контролировалась комбинированным способом: пирометрами полного и частичного излучения, а также термопарами. После выхода из устройства и выдержки на воздухе в течение 30 секунд для выравнивания температуры по сечению проводили измерения температуры по длине накладки пирометром частичного излучения в местах 1,2 и 3, показанных на рисунке 2.17. Указанные точки были выбраны с учётом того, что именно с данных элементов наиболее близко к поверхности производится отбор проб на механические испытания. В процессе экспериментов расход воды был подобран таким образом, чтобы разница температуры в точках 1 и 3 на поверхности обеих головок составляла не более 20°C. С целью контроля прямолинейности накладок и подбора оптимального соотношения расходов воды верх/низ, право/лево измерялось отклонение от прямолинейности каждого образца до и после опыта в соответствии с положениями ГОСТ [12].



1,2,3 – линии измерения температуры по длине нижней головки, шейки и верхней головки соответственно

Рисунок 2.17 – Профиль рельсовой накладки Р65

Обработка накладок осуществлялась с изменением расхода воды на устройство в пределах от 15,8 до 45 м^3/час, давления воды от 2 кгс/см^2 до 6 кгс/см^2. Температура окончания охлаждения регулировалась скоростью транспортировки накладки через устройство и изменялась от 20 до 500°С. На различных режимах охлаждения обработано более 30 накладок.

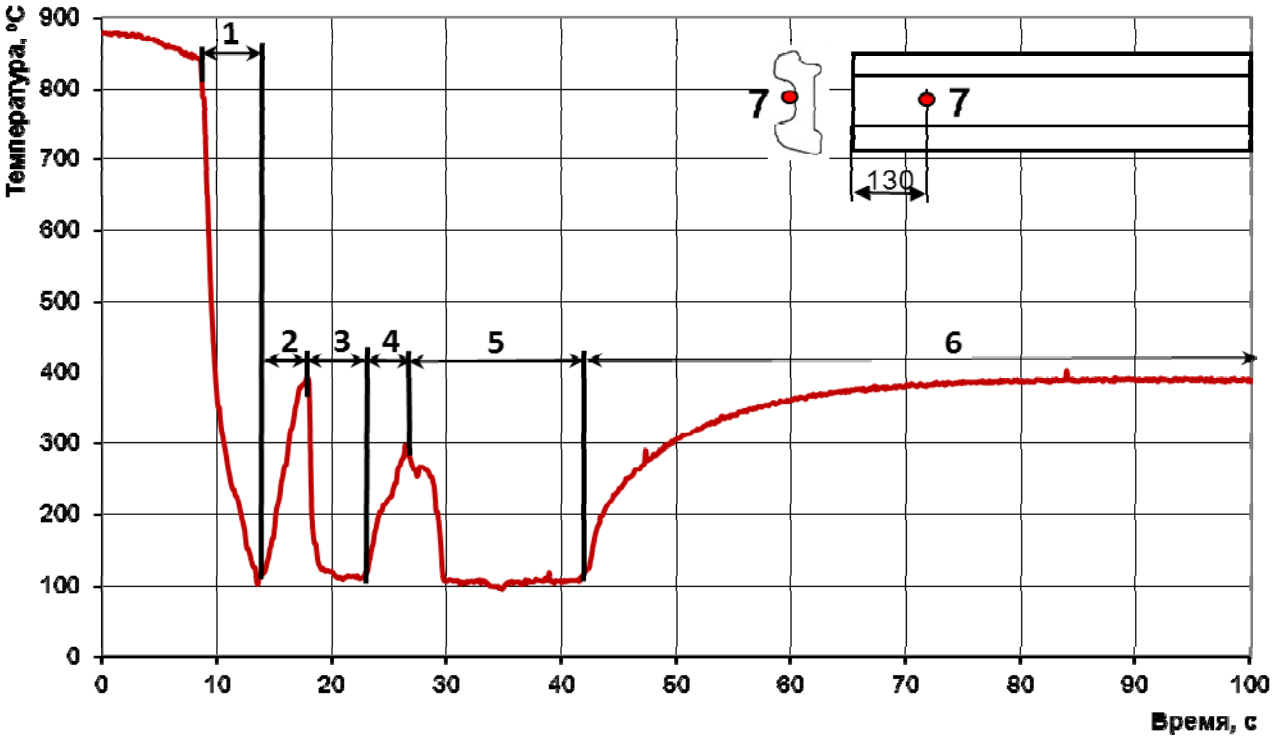
В таблице 2.8 сведены различные режимы работы устройства. Как видно из таблицы, был проведён спектр исследований от полной закалки образца до прерванного охлаждения с самоотпуском. Охлаждение осуществлялось как при работающих трёх секциях устройства, так и при работающих двух секциях №2 и №3 (рисунок 2.11), когда первая секция была заглушена.

На рисунках 2.18 и 2.19 представлены показания термопары верхней головки образца для двух опытов при охлаждении одной и той же накладки на одном и том же режиме (расходы воды, скорость транспортировки) в трёх секциях устройства. В опыте, результаты которого представлены на рисунке 2.19, образец нагрет в печи и охлажден повторно. Из сопоставления представленных на рисунках 2.18 и 2.19 данных видно, что температура самоотпуска повторно обработанного образца после выхода из устройства ниже на 110 ^{o}С. Следовательно, с увеличением количества циклов охлаждения наблюдается снижение температуры самоотпуска изделия. Отчасти это можно объяснить увеличением окалинообразования, а также не исключается и возможное влияние повторных обработок на структуру металла.

Таблица 2.8 – Параметры и тепловые режимы работы экспериментального устройства

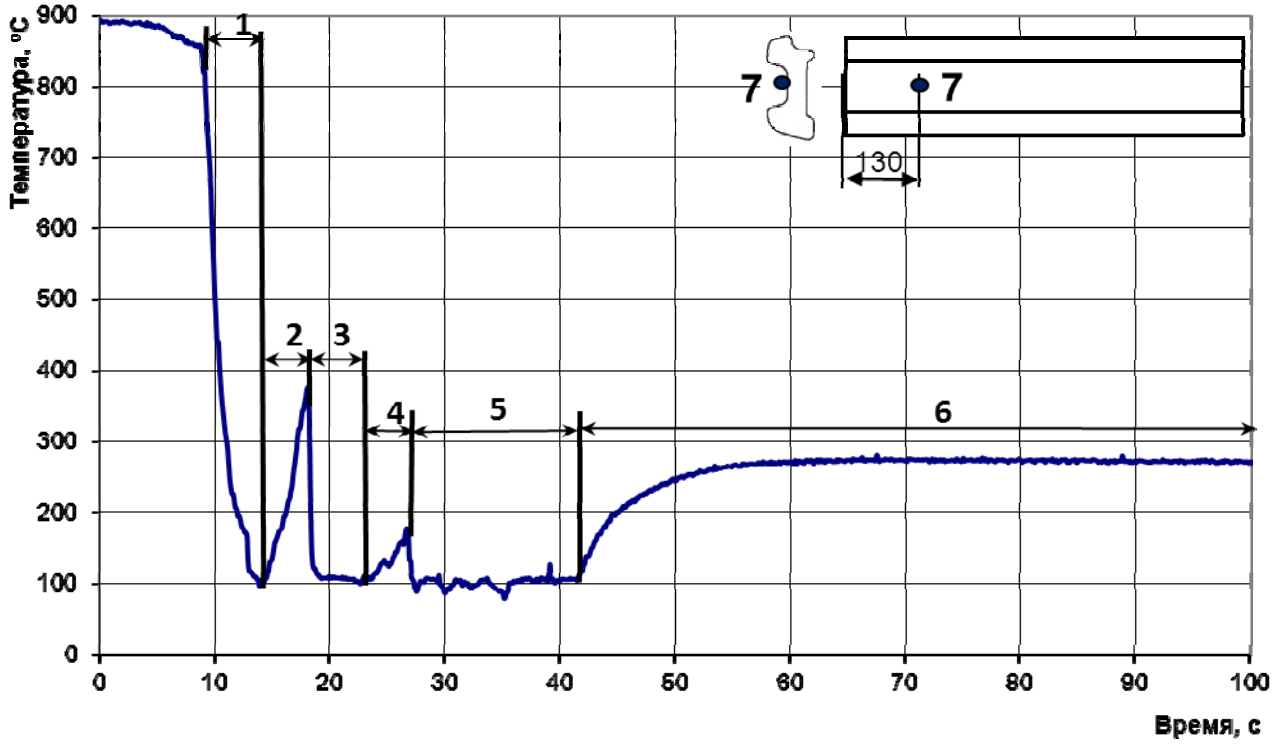
Три секции												
Номер секции	1				2				3			
Ориентация	верх	низ	бок верхней головки	бок нижней головки	верх	низ	бок верхней головки	бок нижней головки	верх	низ	бок верхней головки	бок нижней головки
Расход воды, $м^3/ч$	3,7	6,5	2,0	2,0	3,7	6,5	2,0	2,0	4,0	6,7	3,0	3,0
Соотношение расходов	1,76		1		1,76		1		1,68		1	
Скорость движения, м/с	0,061 с покачиванием в последней секции 0,075-0,11											
Температура окончания охлаждения, ^oC	20 280-450											

Две секции								
Номер секции	2				3			
Ориентация	верх	низ	бок верхней головки	бок нижней головки	верх	низ	бок верхней головки	бок нижней головки
Расход воды, $м^3/ч$	4,0	5,6	1,43	4,10	3,8	5,4	2,8	6,7
Соотношение расходов	1,4		2,8		1,4		2,4	
Скорость движения, м/с	0,064-0,090							
Температура окончания охлаждения, ^oC	300-500							



1,3,5 – охлаждение струями воды; 2,4,6 – охлаждение на воздухе

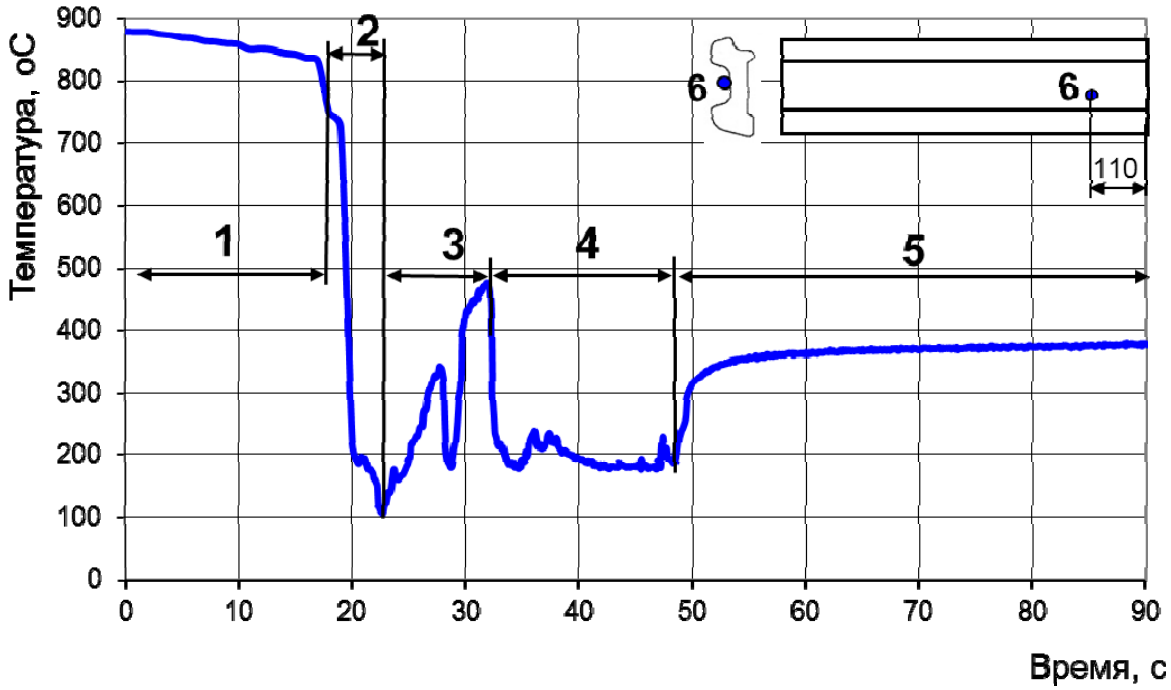
Рисунок 2.18 – Показания термопары при охлаждении накладки в трёх секциях устройства



1,3,5 – охлаждение струями воды; 2,4,6– охлаждение на воздухе

Рисунок 2.19 – Показания термопары при повторной обработке накладки в трёх секциях устройства

На рисунке 2.20 приведены показания термопар, установленных на образце при работающих двух секциях устройства: секциях №2 и №3 (таблица 2.8). Показания пирометра после выхода накладки из печи и охлаждения в двух секциях устройства №2 и №3 при выдержке на воздухе 30 секунд для выравнивания среднемассовой температуры приведены на рисунке 2.21.

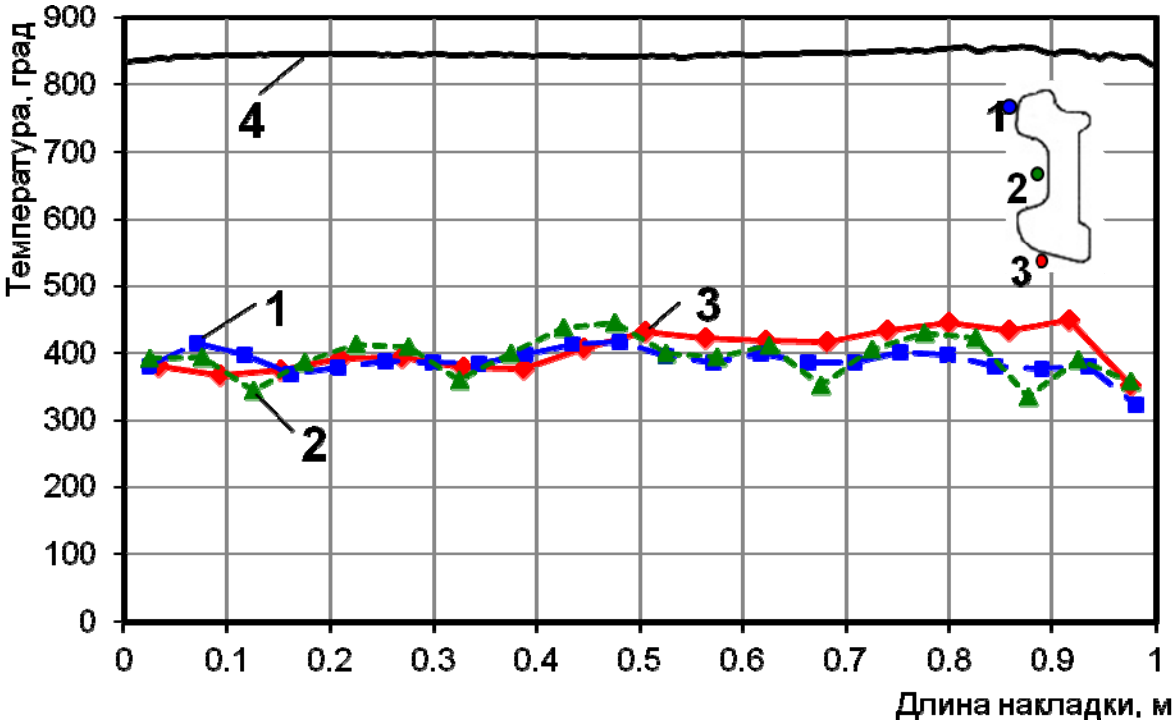


1 – на воздухе после выхода образца из печи; 2 – в секции №2; 3 – на воздухе между секциями №2 и №3; 4 – в секции №3; 5 – на воздухе после выхода образца из устройства; 6 – расположение термопары на поверхности шейки

Рисунок 2.20 – Изменение температуры шейки во время процесса ускоренного водяного охлаждения

Из представленных данных видно, что температуры разномассивных элементов практически одинаковы, при этом с шейки и головок накладки в процессе охлаждения отводилось разное количество тепла.

Основная часть экспериментов проведена на двух работающих секциях №2 и №3. Соотношение расходов, представленное в таблице 2.8, при охлаждении в двух секциях устройства позволило обеспечить прямолинейность накладки согласно требованиям [12].



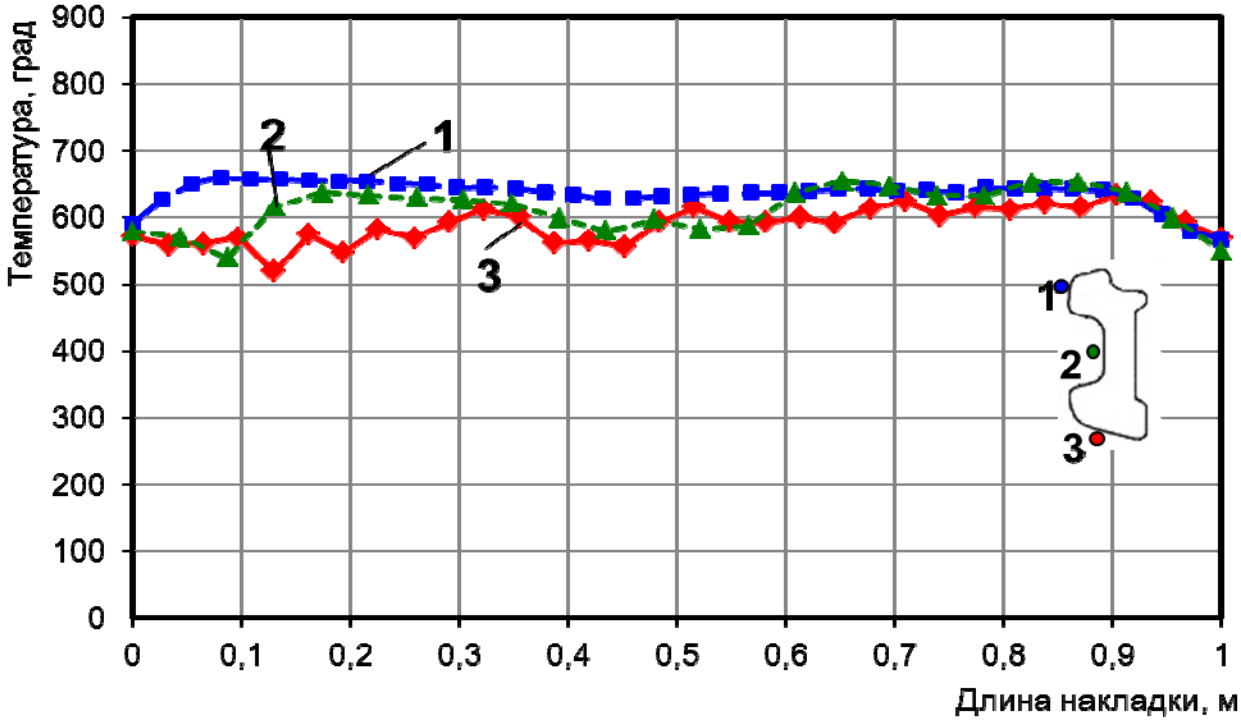
1 – верхняя головка, 2 - шейка, 3 – нижняя головка,

4 – температура шейки на выходе из печи

Рисунок 2.21 – Распределение температуры по длине накладки до и после охлаждения в опытном устройстве

Для проведения адаптации математической модели необходимо было определить плотность теплового потока отдельно для каждой секции устройства, для чего были проведены эксперименты по охлаждению накладки при включенной только одной секции. На рисунке 2.22 приведено распределение температуры по длине накладки после охлаждения только в секции №2 устройства.

Для расчёта плотностей теплового потока время охлаждения накладки в секциях устройства определялось по известной скорости транспортировки и длинам зон устройства, перепад температуры за время движения накладки в устройстве определяли по показаниям термопар и пирометров до и после охлаждения. Задаваемые в программный модуль исходные данные представлены в таблице 2.9.



1 – верхняя головка, 2 - шейка, 3 – нижняя головка

Рисунок 2.22 – Распределение температуры по длине накладки после охлаждения только в одной секции №2 опытного устройства

Таблица 2.9 – Исходные данные для расчёта охлаждения накладки струями воды в одной секции устройства №2

Исходные данные для расчёта в программном модуле	Значение
Температура окружающей среды, °С	20
Начальная температура накладки, °С	880
Коэффициент теплоотдачи при охлаждении на воздухе α, Вт/м^2·К	12
Степень черноты металла, ε	0,85
Время движения на воздухе до начала охлаждения, с	16
Время охлаждения в секции №2, с	5,3
Однократное прерывание охлаждения:	
Плотность теплового потока, МВт/м^2:	
нижней и верхней поверхностей накладки	4,1
боковой поверхности верхней головки до начала выкружки	2,4
выкружка	3,2
боковой поверхности нижней головки	2,5

Таким образом, задаваемое в программный модуль значение плотностей теплового потока должно было обеспечивать в результате расчёта получение температур разных элементов накладки, соответствующим эксперименту (рисунок 2.22). Боковая поверхность верхней головки при расчёте была разбита на две зоны, как показано на рисунке 2.23, поскольку часть потока воды нижних форсунок покрывала зону выкружки.

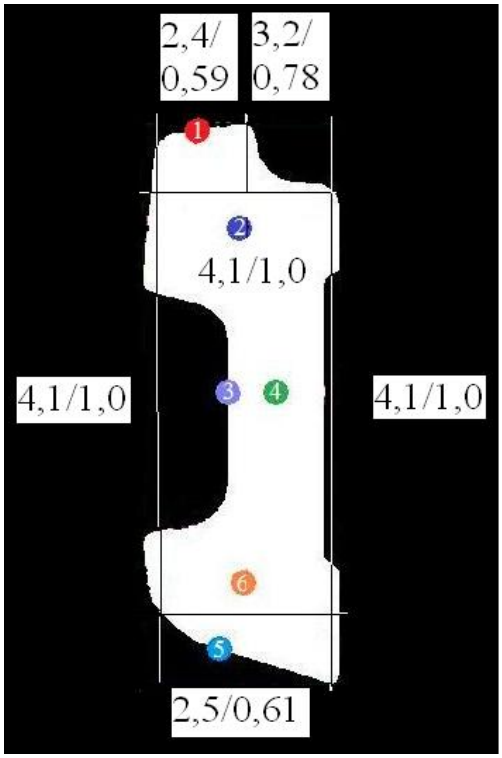


Рисунок 2.23 – Разбиение на зоны накладки при расчёте в программном модуле

Выкружка – это криволинейная вогнутая часть верхней головки накладки размером в 1/4 окружности, показана на рисунке 2.24.

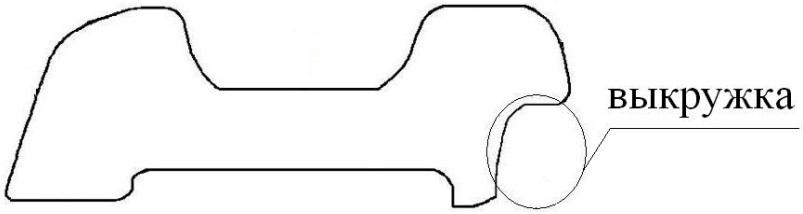


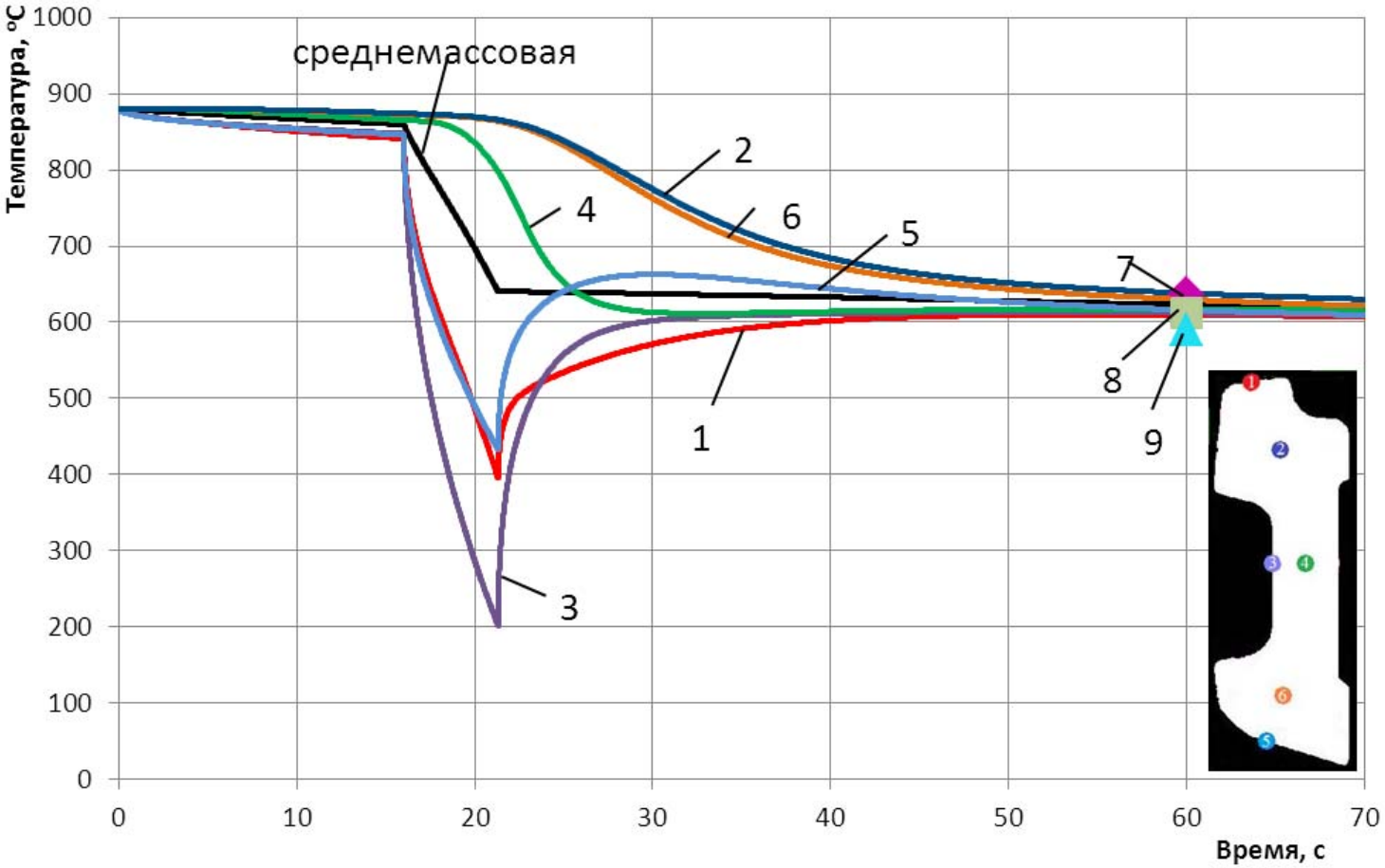
Рисунок 2.24 – Профиль рельсовой накладки с обозначением выкружки

Расчётное изменение температуры разных точек накладки во времени при охлаждении в одной секции с наложением средних значений температуры, полученных в эксперименте (рисунок 2.22), приведено на рисунке 2.25.

На рисунке 2.26 представлено расчётное изменение температуры накладки по сечению, а также представлены средние значения экспериментальных данных по рисунку 2.21. Расчёт проведён для случая охлаждения в двух секциях устройства №2 и №3 с учётом плотностей тепловых потоков, полученных при расчёте охлаждения в одной секции (рисунок 2.25). Плотность теплового потока при данном режиме охлаждения изменялась в пределах 2,5÷4,1 МВт/м^2 во второй секции, 0,59÷1,0 МВт/м^2 – в третьей.

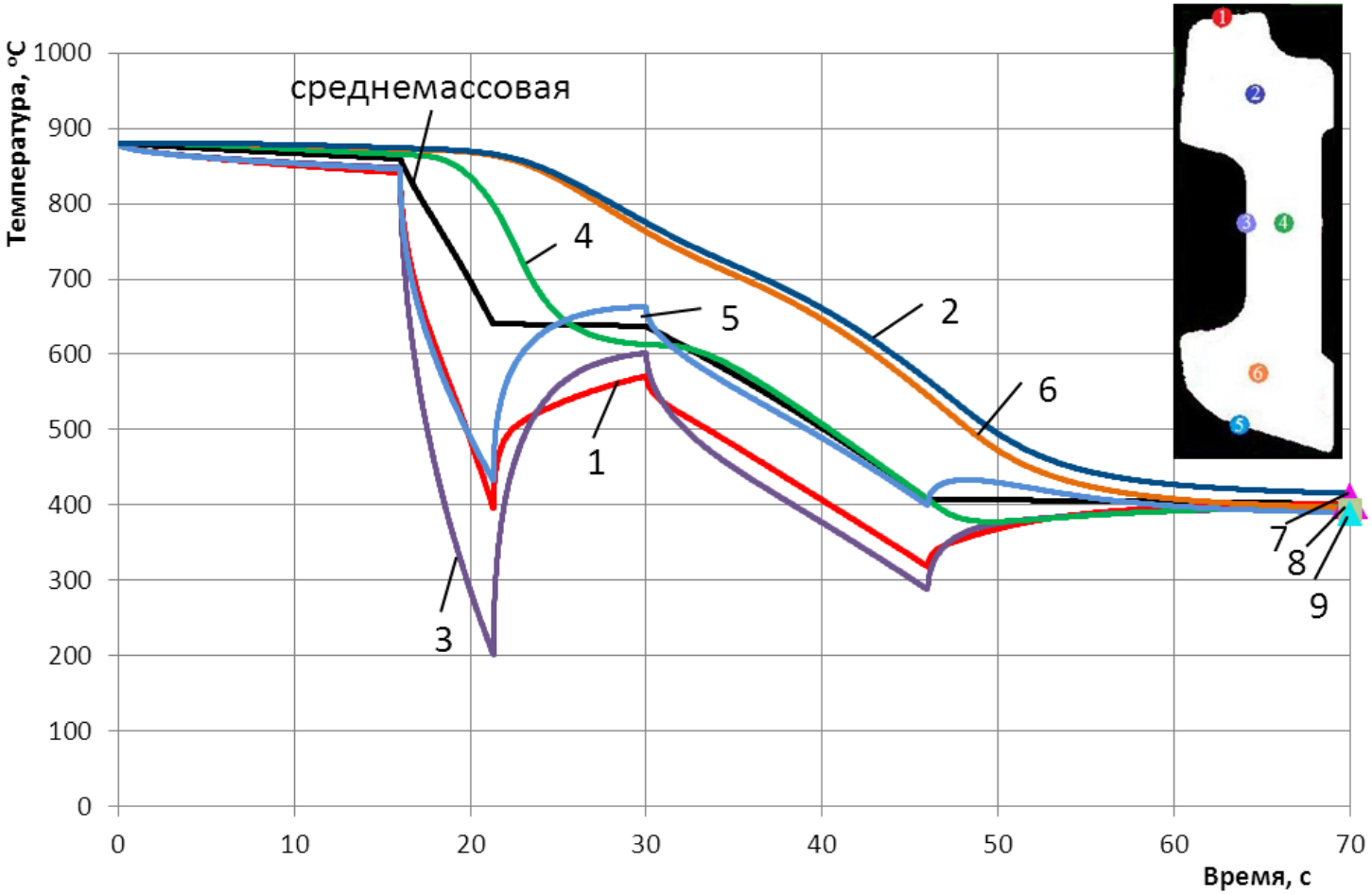
Расчётные плотности теплового потока, задаваемые в программный модуль и плотности орошения, сведены в таблицу 2.10.

По результатам исследований были установлены режимы работы устройства, обеспечивающие одинаковую температуру разномассивных элементов после прерывания охлаждения, а также на основе экспериментального моделирования проведена адаптация математической модели [86, 87].



1-6 - номер кривой, соответствующий номеру расчётной точки; 7-9 – среднее значение температуры по рисунку 2.21 верхней головки, шейки и нижней головки соответственно

Рисунок 2.25 - Расчётное изменение температуры разных точек накладки во времени при охлаждении водой в одной секции устройства с учётом фактического времени охлаждения накладки и плотностей орошения в устройстве



1-6 - номер кривой, соответствующий номеру расчётной точки; 7-9 – среднее значение температуры по рис. 2.20 верхней головки, шейки и нижней головки соответственно

Рисунок 2.26 - Расчётное изменение температуры разных точек накладки во времени при охлаждении водой в двух секциях устройства с учётом фактического времени охлаждения накладки и плотностей орошения в устройстве

Таблица 2.10 – Расчётная плотность теплового потока, время охлаждения и плотность орошения рельсовой накладки Р65 в экспериментальном устройстве охлаждения для разной ориентации поверхности

№ секции	Ориентация поверхности накладки	Время охлаждения, с	Расчётная плотность теплового потока, МВт/м^2	Плотность орошения, м^3/м^2·ч
Охлаждение на воздухе всей поверхности накладки		16	-	-
2	Верх	5,3	4,1	71
	Низ		4,1	145
	Боковая поверхность нижней головки		2,5	128
	Боковая поверхность верхней головки: - вся поверхность, кроме выкружки		2,4	103
	- выкружка		3,2	
Охлаждение на воздухе всей поверхности накладки		8,7	-	-
3	Верх	16	1,0	15
	Низ		1,0	48
	Боковая поверхность нижней головки		0,61	38
	Боковая поверхность верхней головки: - вся поверхность, кроме выкружки		0,59	30
	- выкружка		0,78	

2.5 Технологические эксперименты и полученные результаты механических свойств накладки

Целью проведения технологических экспериментов являлась обработка накладок в устройстве на выбранных тепловых режимах с последующим определением комплекса механических свойств и микроструктуры. Механические свойства, отвечающие требованиям ГОСТ, определяются динамикой процесса охлаждения во времени и температурой конца охлаждения.

При отборе образца на испытания от края накладки отрезалось 70 мм для исключения влияния переохлаждения торца на результат испытаний. Образцы были изготовлены согласно ГОСТ 1497-84 [88]: тип III исполнение 4, весь комплекс механических испытаний выполнялся в соответствии с требованиями нормативной документации [12], т.е. часть верхней головки отбиралась на растяжение, часть нижней – на холодный загиб, твердость определялась на наружной поверхности шейки. Микро- и макроструктура подробно исследовались с применением разного вида оборудования, также определялась твердость (HB, HRC_7) по сечению темплетов, вырезанных из разных частей накладки.

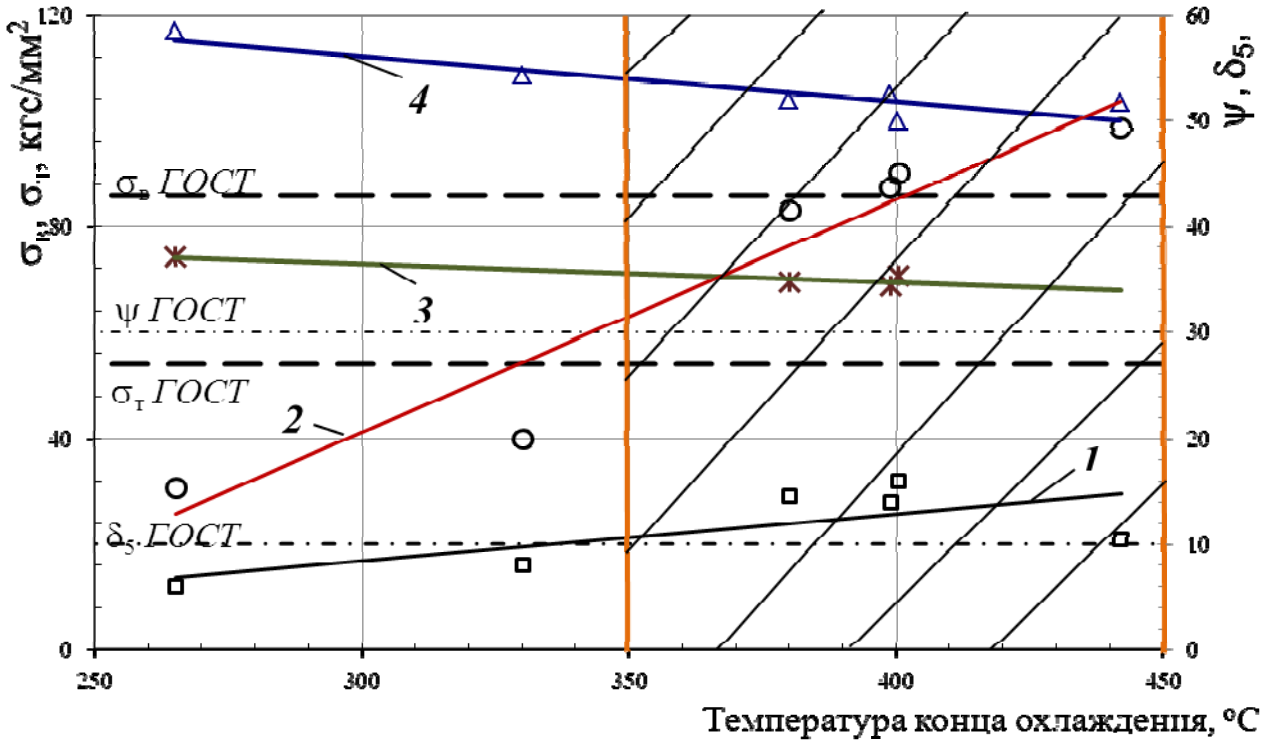
Как видно из представленных в таблице 2.11 данных, механические свойства накладок, термоупрочненных способом водяного струйного охлаждения, имеют разный уровень механических свойств, как соответствующий, так и несоответствующий требованиям ГОСТ [12].

Сведения о механических свойствах были получены для разных температур конца охлаждения накладки, что позволило получить зависимость механических свойств от температуры окончания охлаждения (рисунок 2.27). Полученные зависимости позволяют определить оптимальный диапазон температур конца охлаждения: для металла с указанным в таблице 2.7 химическим составом температура окончания охлаждения должна находиться в пределах 350-450 ^{o}C.

Таблица 2.11 – Механические свойства термоупрочнённых накладок в экспериментальном устройстве ОАО «ВНИИМТ»

№ п/п	Соответствие ГОСТ [1]	Дата опыта (номер опыта)	Температура начала/окончания охлаждения, °С	Механические свойства					Твёрдость, НВ
				Временное сопротивление, кГ/мм^2 / Н/мм^2	Предел текучести, кГ/мм^2 / Н/мм2	Относит удлинение, %	Относит. сужение, %	Угол холодного загиба, град	Эксперим. данные в месте отбора проб на растяжение, локальная / средняя
1		ГОСТ 4133-73		86 / 844	54 / 530	10,0	30,0	20	235-388
2	+	20.10.2011 (№1)	875 / 400	103.9 / 1020	69.4 / 681	14,6	41,6	60 без трещин	321; 321; 285 / 309
3	+	20.10.2011 (№2)	880 / 20	91 / 893	58 / 569	17,4	47,3	65 без трещин	– / 255
4	+	25.01.2012 (№1)	860 / 400	99.8 / 979	70.7 / 694	16	45,1	46	285; 285; 297; / 289
5	+	13.02.2012	860 / 398	105.0 / 1030	68.7 / 674	14	43,8	106	285; 285; 297; / 289
6	+	21.02.2012 (№2)	830 / 442	103,3 / 1012,34	100	10,4	49,3	103	нет данных
7	–	22.11.2011 (№1)	880 / 265	117 / 1148	74.1 / 727	6,0	15,4	46	нет данных
8	–	26.01.2012 (№1)	860 / 330	108.4 / 1063	не определён	8	20	35	363; 363; 302; 331 / 339, 75

[1] + - удовлетворяют требованиям ГОСТ; - - не удовлетворяют требованиям ГОСТ.



1 – относительное удлинение, 2 – относительное сужение, 3 – предел прочности, 4 – предел текучести.

Рисунок 2.27 - Зависимость прочностных и пластических свойств рельсовой накладки Р65 от температуры конца охлаждения

Распределение твёрдости по сечению накладки для одного из экспериментов представлено на рисунке 2.28. Полученные данные твёрдости по сечению профиля позволяли делать прогноз прочностных характеристик накладки без затрат на изготовление образцов и проведение комплекса механических испытаний согласно данным [89].

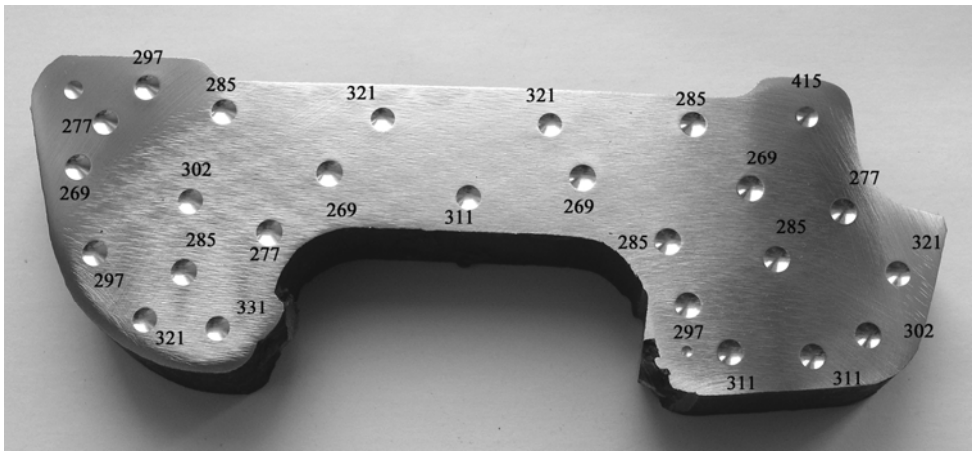


Рисунок 2.28 – Распределение твёрдости по сечению термоупрочнённой накладки струями воды для одного из проведённых экспериментов

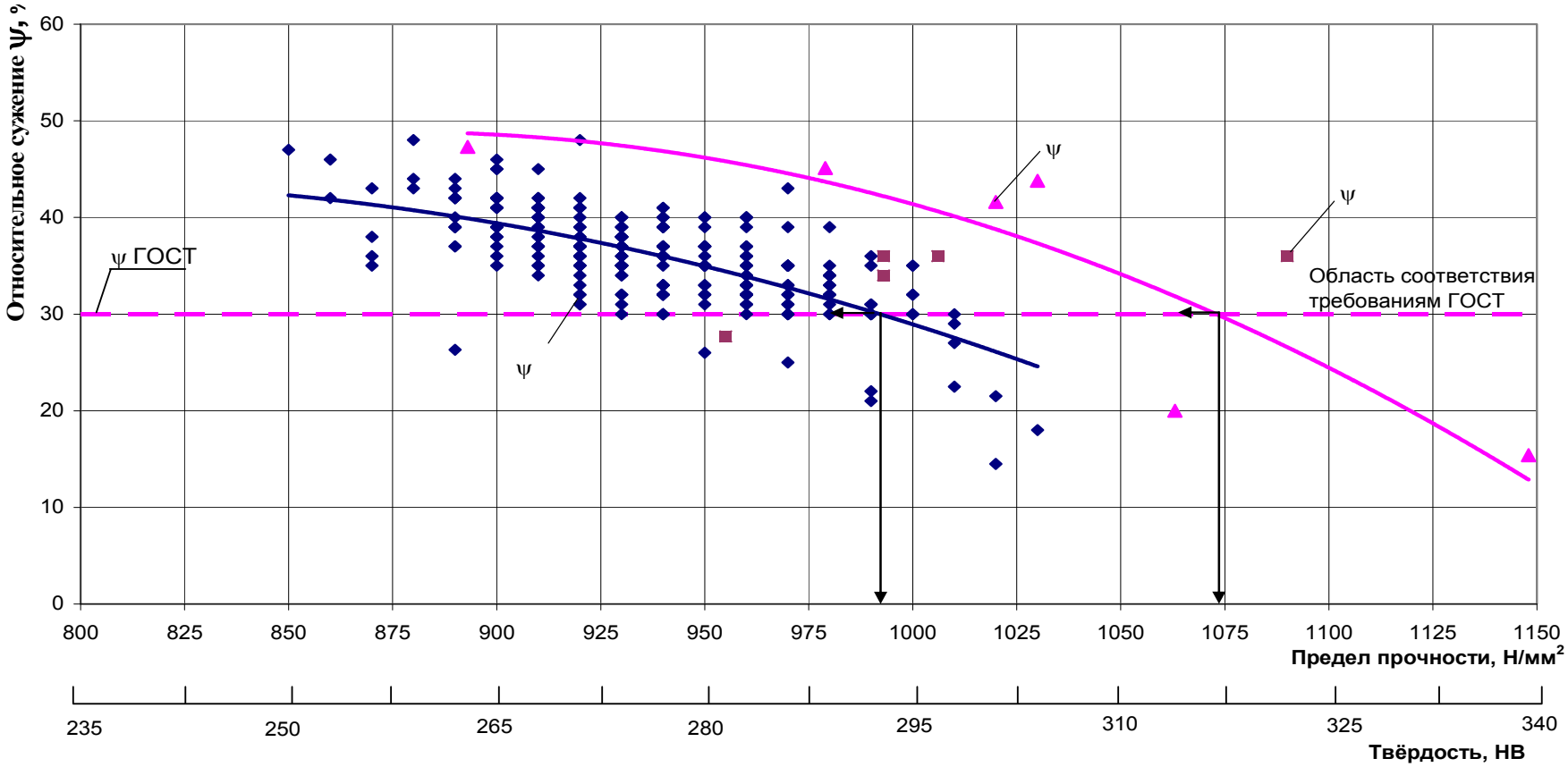
На рисунке 2.29 представлены зависимости относительного сужения и предела прочности и твёрдости накладки при закалке в баке с маслом на предприятии ОАО «ЕВРАЗ ОЗСМК» и после термоупрочнения в опытном устройстве ОАО «ВНИИМТ».

Как видно из рисунка 2.29, за счет дифференцированного регулируемого охлаждения обеспечивается более высокий уровень сочетания прочностных и пластических характеристик, чем при объёмной закалке в масле.

Микроструктура накладок до и после термоупрочнения была исследована с помощью оптического микроскопа (приложение В) и растрового электронного микроскопа JEOL JSM-6490LV (приложение Г).

Структура нетермообработанной накладки (приложение В) состоит из пластинчатого перлита и феррита, ориентированного по границам зерна, балл зерна 4-5 [90]. Микроструктура после термообработки (приложения В и Г) представляет собой плотный сорбитообразный перлит с выраженной ферритной сеткой по границе зерна, балл зерна 7-8 соответствует [90]. В приложении В можно определить размер зерна как 10-15 мкм, в приповерхностном слое структура представляет собой дисперсный сорбит отпуска.

На рисунке 2.30 приведена рентгенограмма, полученная для центральной части шейки. Узкие и высокие дифракционные пики соответствуют ферриту (α-Fe), имеющему соответствующую плоскость (*hkl*) [91,92]. Известно, что отражения с близкими межплоскостными расстояниями d_{hkl} фазовых составляющих могут накладываться друг друга [93] и затруднять определение структурных составляющих по рентгенограмме, но другие фазы имеют существенно отличное расстояние d_{hkl} от пиков, соответствующих ферриту, и в этом случае их было бы видно. Анализ осуществлён для середины и кромки всех частей накладки: верхняя, нижняя головки, шейка, все рентгенограммы имеют идентичное строение.



– термоупрочнение в устройстве ускоренного струйного охлаждения, данные лаборатории ОАО «ВНИИМТ»;

– термоупрочнение в устройстве ускоренного струйного охлаждения, данные лаборатории ОАО «ЕВРАЗ НТМК филиал НСМЗ»;

- закалка в масле ОАО «ЕВРАЗ-ОЗСМК» [30].

Рисунок 2.29 – Зависимость между относительным сужением, и пределом прочности и твёрдостью накладок, охлаждённых струями воды

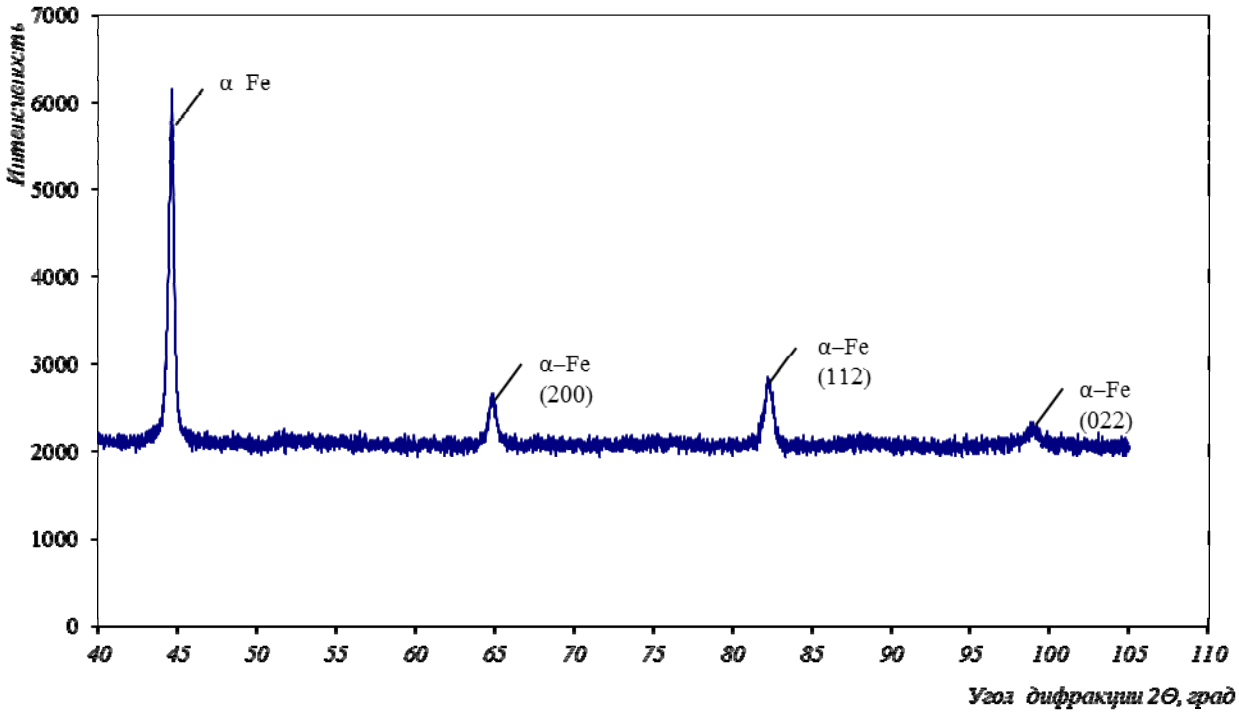


Рисунок 2.30 – Рентгенограмма середины шейки рельсовой накладки

2.6 Выводы по разделу

1. Математическое моделирование процесса охлаждения накладок в масле и струями воды позволило определить требования к конструктивным характеристикам устройства ускоренного струйного охлаждения и провести предварительную оценку основных параметров процесса термоупрочнения.
2. Проведение физического моделирования процесса охлаждения накладки струями воды в процессе тепловых экспериментов в экспериментальных условиях определило как конструктивные параметры устройства, так и технологические режимы охлаждения, в частности, соотношение расходов на различные участки накладки, позволяющие удовлетворить требования к её прямолинейности. Полученные экспериментальные данные по зависимости температуры конца охлаждения от режима охлаждения, от количества работающих секций и расходов воды, а также полученное распределение температуры по длине и периметру накладки после охлаждения позволили рас-

считать снимаемые в зонах устройства плотности теплового потока и адаптировать математическую модель к процессу охлаждения рельсовой накладки струями воды.

3. На основе расчётно-физического моделирования определена область технологических режимов охлаждения, на которых осуществлялась отработка порцесса термоупрочнения.
4. Определённые в ходе математического и физического моделирования основные режимные и конструктивные параметры устройства позволили получить равномерное распределение температуры для разномассивных элементов как по сечению накладки, так и по её длине.
5. Эксперименты показали, что использование струйного водяного охлаждения обеспечивает требования к механическим свойствам накладки и при определённом соотношении расходов – к прямолинейности накладок.

3 ПРОМЫШЛЕННОЕ ВНЕДРЕНИЕ СТРУЙНОГО ВОДЯНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ РЕЛЬСОВОЙ НАКЛАДКИ НА ФИЛИАЛЕ ОАО «ЕВРАЗ НТМК»-НСМЗ

Рельсовая накладка – изделие фасонного профиля, которое должно соответствовать ряду требований [12]:

- иметь установленный химический состав (таблица 3.1);
- обладать механическими свойствами, указанными в таблице 3.1;
- допускается равномерная кривизна по длине накладки, не превышающая указанных в таблице 3.2 значений. Надёжная работа стыкового соединения обеспечивается плотным прилеганием тела накладки к элементам рельса, поэтому, как видно из представленных данных, требования к прямолинейности готовой продукции довольно жёсткие.
- поверхность должна быть ровной без рисок, неровностей, выбоин, на концах отверстий и торцах накладки не должно быть заусенцев и неровностей в виде выпучин.

Таблица 3.1 – Требования к химическому составу и механическим свойствам рельсовых накладок [12]

Содержание элемента, %					
C	Mn	Si	P	S	As
			не более		
0,45-0,62	0,50-0,85	0,15-0,35	0,04	0,05	0,08
Механические свойства					
$\sigma_в$, Н/мм^2	$\sigma_т$, Н/мм^2	δ, %	ψ, %	ζ, град.	HB
не менее					
844	530	10	30	20	235-388

При отклонении каких-либо параметров от регламентированных норм в пределах допустимых нормативным документом [12] значений, накладка может быть отнесена ко второму сорту и в этом случае должна применяться только на путях промышленного назначения.

Таблица 3.2 – Требования к прямолинейности рельсовых накладок [12]

Вид кривизны	Величина кривизна в мм для накладок	
	менее 1 м	1 м и более
Выпуклость в сторону головки рельса в вертикальной плоскости	1,0	1,6
Выпуклость в сторону подошвы рельса в вертикальной плоскости	0,5	0,8
Выпуклость в сторону шейки рельса в горизонтальной плоскости	2,0	3,0
Вогнутость в сторону шейки рельса в горизонтальной плоскости	1,5	2,4

Как было показано ранее, соблюдение требований к прямолинейности накладки возможно при обеспечении одинаковых среднемассовых скоростей охлаждения разномассивных элементов, что осуществляется дифференциацией интенсивности охлаждения головок и шейки накладки. Способ охлаждения водяными струями полностью отвечает этому требованию и делает процесс охлаждения управляемым. Кроме того, применение воды в качестве охлаждающей среды позволяет сделать процесс термоупрочнения экологичным в сравнении с охлаждением в масле [94…96]. Данные экспериментов, приведенных в главе 2, показали, что при струйном водяном охлаждении достигается уровень механических свойств накладок, соответствующий требованиям, представленным в таблице 3.1. При проектировании нового участка по производству рельсовых накладок на филиале ОАО «ЕВРАЗ НТМК»-Нижнесалдинский металлургический завод (г. Нижняя Салда) указанные преимущества позволили сделать выбор в пользу струйного водяного охлаждения [97]. Для апробации данного способа в промышленных условиях испытательным центром ОАО "ГНЦ РФ "Уральский институт металлов «Ставан-Тест» были разработаны, согласованы и утверждены в установленном порядке технические условия ТУ 14-2Р-463-2011 «Производство накладок двухголовых для железнодорожных рельсов типов Р50 и Р65» [98].

Технологическая схема участка закалки рельсовых накладок приведена на рисунке 3.1. На участке установлено следующее технологическое оборудование: два пресса, нагревательная печь, устройство закалки накладок (УЗН), а также транспортное оборудование и автономная система водоснабжения УЗН [99, 100].

Горячекатаная полоса длиной до 11,5 м поступает на приёмный стеллаж 3. При подаче на рольганги осматривается со всех сторон для контроля качества поверхности, коробления и маркировки. При необходимости полоса может быть отправлена на стеллаж зачистки 4 для удаления дефектов. По приёмному рольгангу полоса направляется в пресс холодной рубки 10 задающим устройством 9 для получения нужной длины 0,80-1,00 м. Далее мерная заготовка по рольгангу поступает на загрузочные устройства 12, которые подают накладки в печь 13. Печь проходная толкательная двух ручьевая с верхним и нижним нагревом металла. Нагретая в печи до температуры порядка 850-870 ^{o}C рельсовая накладка поступает в пресс прошивки болтовых отверстий 15 и далее – в устройство закалки накладок (УЗН) 17, где происходит её охлаждение. После выхода из УЗН накладка передаётся на рольганг сталкивателей 21, где производится сбор в контейнеры с возможностью автоматического отбора продукта, изготовленного с нарушениями технологического режима, а затем в зоне складирования – формирование партии. Из сформированной партии отбираются накладки для проверки на соответствие требований [12, 98].

Основные операции на участке производятся в автоматизированном режиме: транспортировка заготовок по участку, нагрев в печи и охлаждение в УЗН. Водоснабжение устройства организовано по замкнутой схеме, включающей насосы, двухкамерный бак-резервуар, фильтр и градирню. Схема системы водоснабжения представлена на рисунке 3.2.

В средней части днища УЗН расположен патрубок-слив (рисунок 3.2), через который отработанная вода самотёком возвращается в буферную ёмкость (бак) автономной системы водоснабжения.

1 – градирня; 2 – вентилятор печи; 3 – стеллаж приемный; 4 – стеллаж зачистки; 5 – рольганг приемный; 6 – кантователь-перекладчик; 7 – рольганг осмотра заготовок; 8 – рольганг подающий; 9 – устройство задающее; 10 – пресс для порезки заготовок; 11 – шлеппер возврата; 12 –рольганг загрузки печи; 13 – печь; 14 – рольганг разгрузки печи; 15 – пресс для прошивки отверстий; 16 – водяной бак; 17 – устройство закалки накладок; 18 – насосы; 19 – кантователь; 20 – рольганг; 21 – рольганг сортировки; 22 – фильтр очистки воды. РМ1-РМ5 – рабочие места операторов.

Рисунок 3.1 – Технологическая схема участка закалки рельсовых накладок

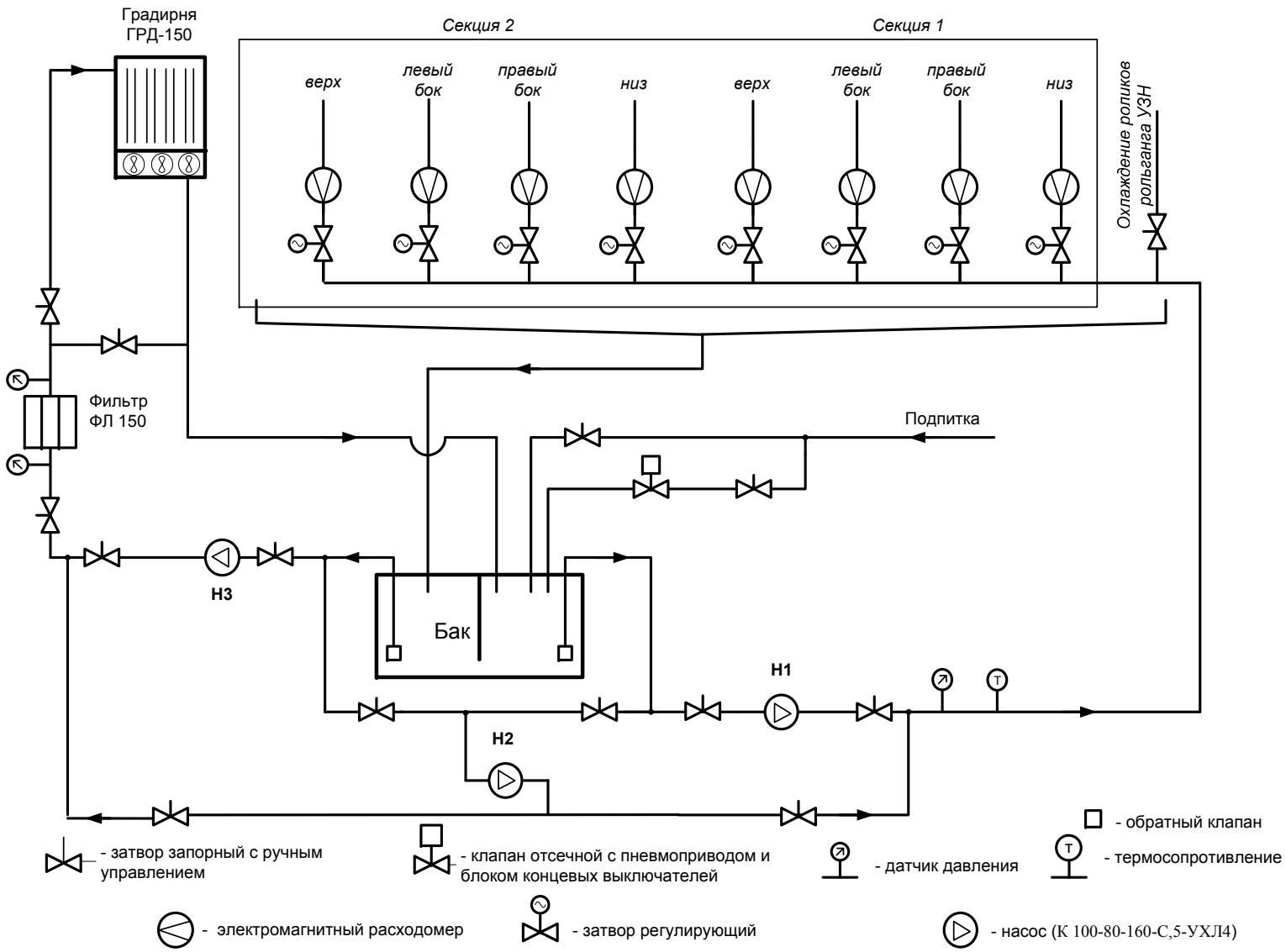


Рисунок 3.2– Схема системы водоснабжения устройства закалки накладок (УЗН)

Внутреннее пространство бака оснащено стационарной перегородкой, которая разделяет его на «тёплый» и «холодный» отсеки. Отработанная нагретая вода поступает в «тёплый» отсек, откуда насосами забирается на очистку и охлаждение. Очищенная и охлажденная вода поступает в «холодный» отсек, откуда насосом забирается для подачи на закалочное устройство. Контроль степени загрязнения фильтра ФЛ-150 осуществляется по перепаду давлений между датчиками давления, установленными на трубопроводе. Контроль температуры воды, подаваемой на устройство закалки, осуществляется термопреобразователем сопротивления. Подача воды на верхние, нижние и боковые коллекторы устройства осуществляется раздельно.

3.1 Устройство закалки накладок и тепловые режимы его работы

Опробованная в экспериментальных условиях конструкция системы охлаждения, приведенная на рисунке 2.11, послужила аналогом промышленного устройства закалки накладок (УЗН). Промышленное устройство состоит из трёх секций, единственным отличием стала бóльшая длина секции №3 (рисунок 3.3).

Как видно из рисунка 3.3, УЗН по длине разделено на зону интенсивного охлаждения – секции № 1 и №2, и зону пониженной интенсивности охлаждения – секция № 3. Секции интенсивного охлаждения обеспечивают высокие скорости охлаждения в высокотемпературной области (в интервале структурных превращений). Секции пониженной интенсивности охлаждения обеспечивают охлаждение до требуемой конечной температуры при устранении опасности сильного переохлаждения поверхностного слоя и при обеспечении достаточно высоких скоростей охлаждения внутренних слоёв.

Для равномерного охлаждения по ширине накладки вода подается на её поверхность сверху и снизу в виде плоских веерообразных потоков, образующихся при истечении воды из плоскоструйных форсунок конструкции ВНИИМТ, смыкающихся при натекании на поверхность накладки.

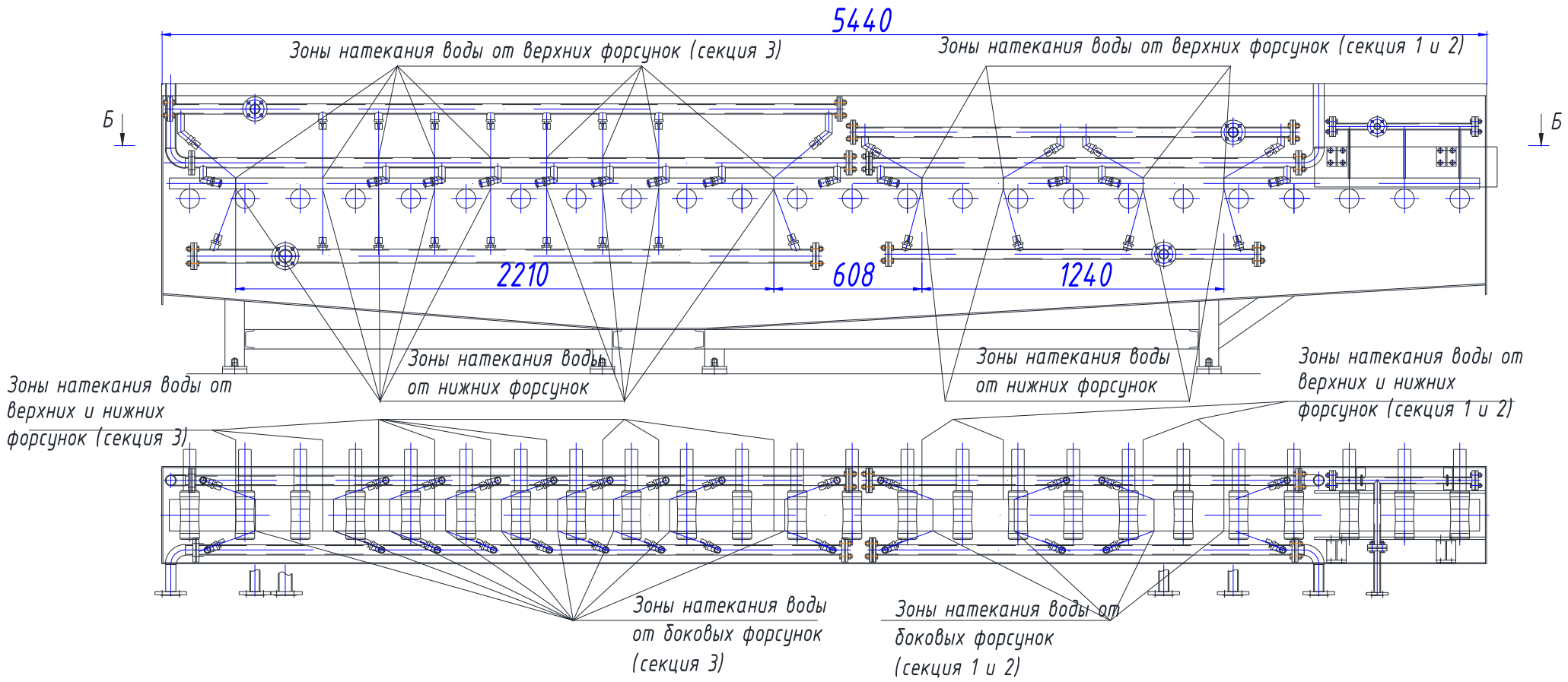


Рисунок 3.3 – Схема расположения коллекторов закалочного устройства и линий натекания от форсунок

Секции охлаждения УЗН выполнены в индивидуальном исполнении раздающих коллекторов, и имеют разное количество плоскофакельных форсунок:

– по 2 форсунки на каждом коллекторе секции № 1 и №2;
– по 9 форсунок на каждом коллекторе секции № 3.

Конструкция форсунок обеспечивает необходимую для данной зоны охлаждения ширину раскрытия факела воды. Факел воды от форсунок верхней и нижней зоны охлаждения секции раскрывается перпендикулярно оси рольганга, при этом натекание воды на нижнюю и верхнюю поверхность охлаждаемой накладки происходит в одной вертикальной плоскости. Факел воды от форсунок боковых коллекторов каждой секции раскрывается вертикально, а натекание воды на боковые поверхности охлаждаемой накладки происходит в одной плоскости, перпендикулярной оси рольганга. Для обеспечения оптимальных условий взаимодействия потоков воды с охлаждаемой поверхностью плоскости линии натекания верхних/нижних и боковых форсунок сдвинуты относительно друг друга.

Направление линий натекания нечётных форсунок верхней и боковой зон охлаждения первой и второй секции под острым углом по ходу движения накладки и чётных форсунок данных коллекторов под острым углом против хода движения обеспечивает чередование участков интенсивного водяного охлаждения с участками воздушного охлаждения.

Расход воды на форсунки каждой зоны охлаждения можно регулировать в широких пределах, что позволяет получить разные соотношения расходов на верх/низ и правую/левую стороны накладки (по ходу движения и ориентации на рольганге), следовательно, сделать процесс управляемым.

Устройство позволяет обрабатывать накладки всех типов без замены или перемещения элементов системы охлаждения. Регулирование процессом охлаждения накладки производится по температуре конца охлаждения её в устройстве. Визирование всех трёх пирометров (после печи, до и после УЗН) выполнено на боковую поверхность верхней головки накладки, т.к. именно отсюда происходит

отбор образца для определения пластических и прочностных свойств. Технические характеристики устройства закалки накладок представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Технические характеристики УЗН на филиале ОАО «ЕВРАЗ НТМК» - НСМЗ

Количество секций, шт	3
Габаритные размеры устройства, м длина ширина высота	 5,44 0,5 1,0
Расход воды на устройство, $м^3$/ч	до 80
Давление воды, МПа Номинальное Максимальное	 0,15 0,30
Температура воды в УЗН, ^oC	5-35
Скорость транспортировки при охлаждении в УЗН, м/с	0,05-0,26

Известно, что перегрев металла в печи приводит к снижению предела упругости и пластических свойств, поэтому температура металла после печи должна находиться в пределах 830-840^{0}С. Кроме того, подстуживание накладки на воздухе до входа в УЗН сверх установленных значений ухудшает значения механических свойств, поэтому за температурой накладок после печи, до и после устройства осуществляется постоянный контроль с помощью пирометров, характеристики которых приведены в приложении Д.

При нормальном прогреве металла и ритмичной работе линии падение температуры поверхности металла на участке рольганг разгрузки печи – пресс прошивки составляет около 30°С. Значение минимальной температуры, которую должна иметь накладка при входе в УЗН, было определена по следующей зависимости для низколегированной стали [101]:

$$Ar_3 = 879{,}2 - 94{,}24 \cdot C - 21{,}13 \cdot Si - 25{,}56 \cdot Mn + 47{,}71 \cdot Cr + 16{,}44 \cdot Ni \qquad (3.1)$$

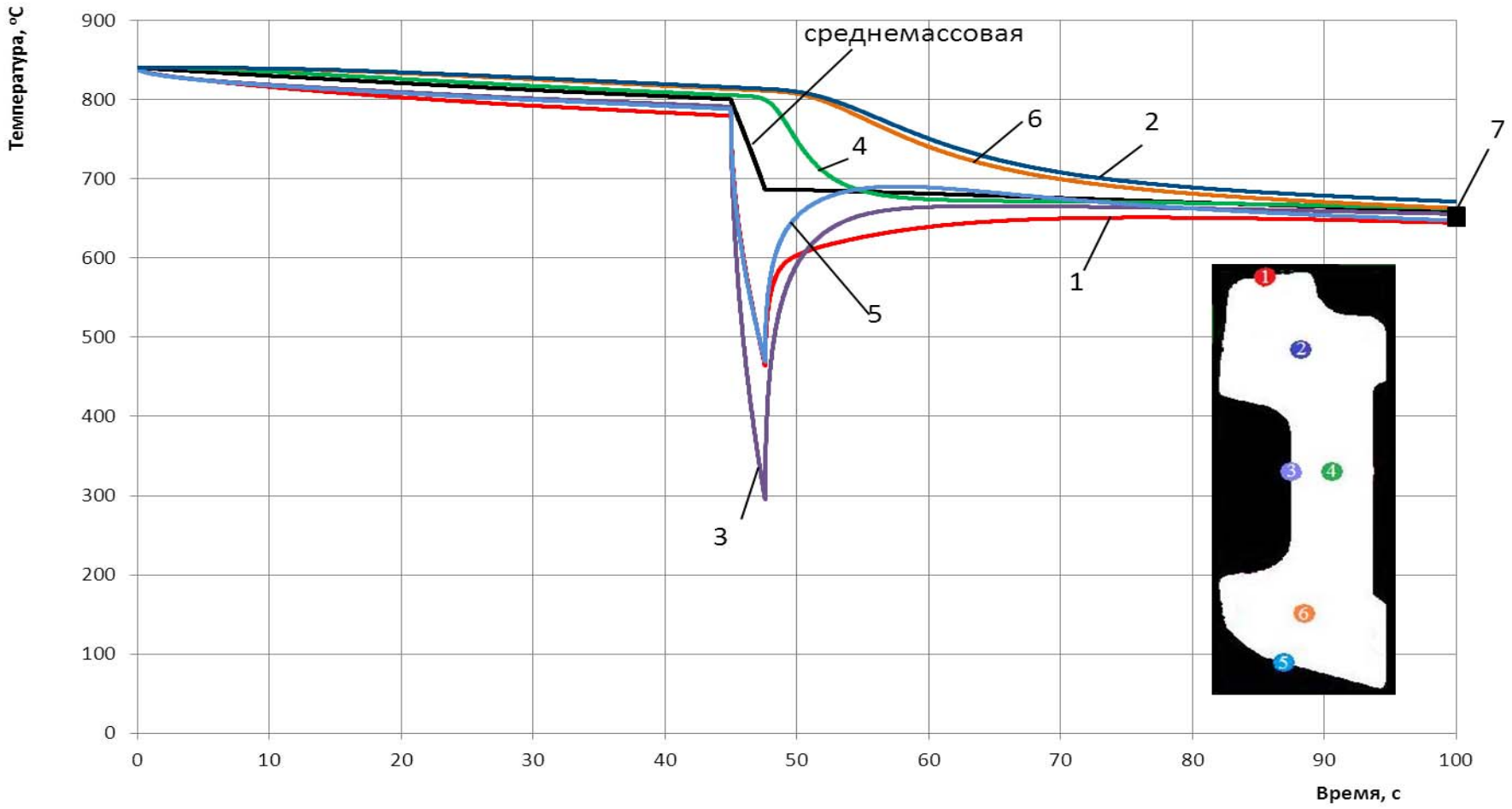
где Ar_3 – температура начала превращения γ-Fe в α-Fe;

C, Si, Mn, Cr, Ni – процентное содержание углерода, кремния, марганца, хрома и никеля соответственно в металле.

Для марок стали, которые поставляются на предприятие, температура Ar_3 составила 790-810°С.

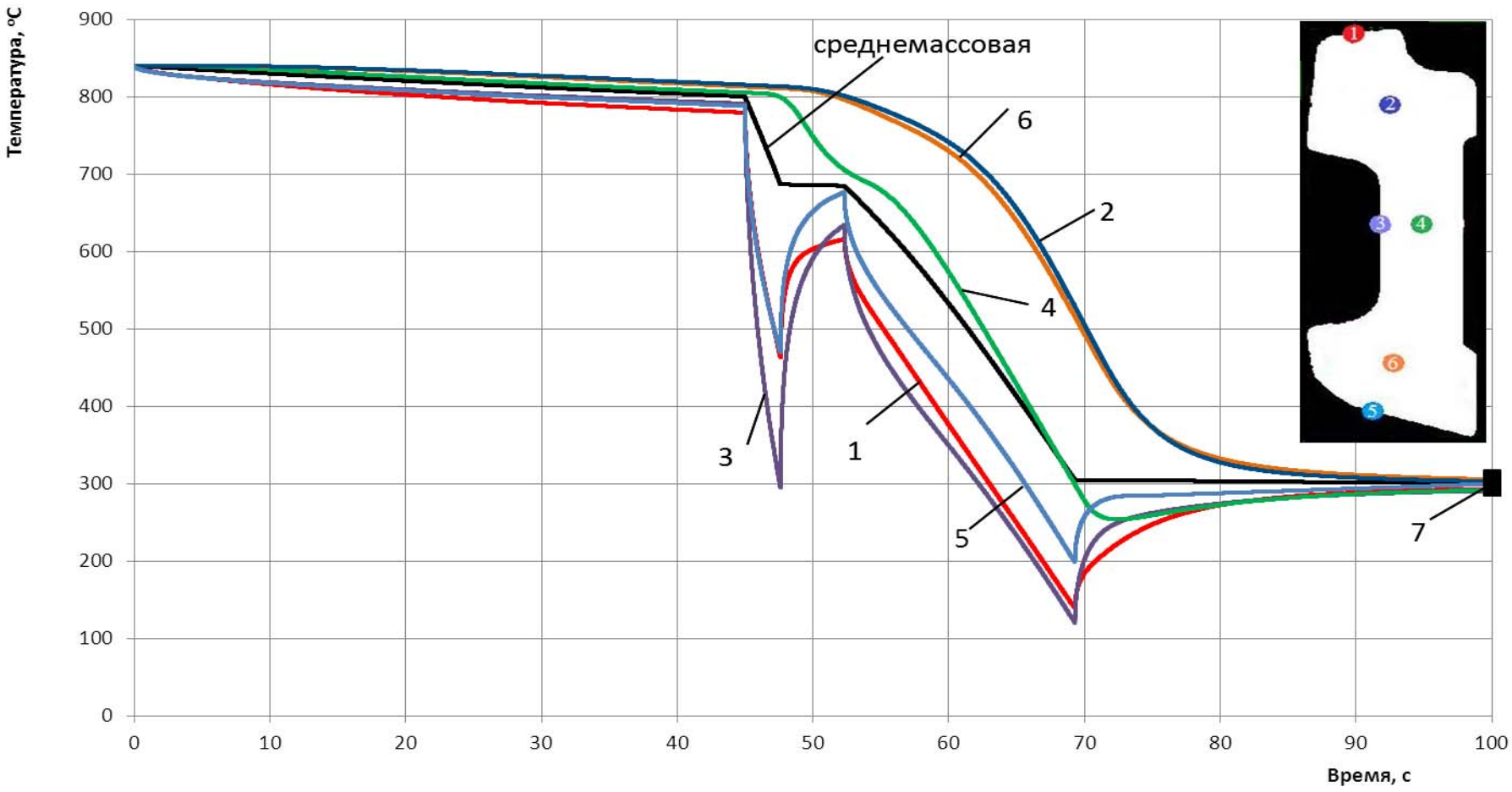
Критерием выбора тепловых режимов работы промышленного устройства является соответствие значений механических свойств термообработанных накладок из разных марок сталей, поставляемых предприятию, требованиям нормативных документов. Первые опробованные режимы, т.е. расходы воды по секциям, их соотношения и скорость транспортировки накладки, выбирались с учётом данных, полученных при экспериментальных исследованиях.

На первом этапе пуско-наладочных работ проведена обработка накладок в одной, двух и трёх секциях УЗН, что позволило с применением математической модели определить значения плотностей тепловых потоков. Для определения значений плотностей тепловых потоков накладка на одной скорости проходила сначала одну секцию устройства, затем на этой же скорости две секции и т.д., т.е., для одного значения скорости имелись данные по температуре конца охлаждения после охлаждения в одной, двух и трёх секций. То же было сделано и для других скоростей, а также для разного марочного сортамента, поставляемого на предприятие. Интерфейс программного модуля позволяет задавать различные исходные данные для различных элементов накладки, что позволяет рассчитать значения плотностей тепловых потоков для соответствующих поверхностей накладки – верхней, нижней, боковых. Критерием достоверного задания значений плотности тепловых потоков является совпадение расчётных и экспериментальных данных температуры накладки с точностью до 5 ^{o}C. На рисунках 3.4 и 3.5 приведены расчётные значения температуры и показания пирометра за УЗН при охлаждении в одной (№2) и двух секциях (№2 и №3) устройства соответственно. Пирометром за УЗН замерялась температура поверхности верхней головки накладки (точка 1, рисунки 3.4 и 3.5), полученная после выравнивания температурного поля по профилю накладки при охлаждении на воздухе после УЗН. За счет дифференцированного охлаждения разномассивных элементов накладки в устройстве температура поверхности накладки по ее периметру после выравнивания становится одинаковой, рассчитанные для разных точек поверхности (точки 1,3,5) температуры, привязанные по времени к месту установки пирометра за УЗН, отличаются не более



1-6 - номера кривых, соответствующих номеру расчётной точки; 7 – среднее значение температуры в промышленном эксперименте.

Рисунок 3.4 – Расчётное изменение температуры разных точек накладки во времени при охлаждении водой в одной секции устройства (№2) с учётом фактического времени охлаждения накладки



1-6 - номера кривых, соответствующих номеру расчётной точки; 7 – среднее значение температуры в промышленном эксперименте.

Рисунок 3.5 – Расчётное изменение температуры разных точек накладки во времени при охлаждении водой в двух секциях устройства (№2 и №3) с учётом фактического времени охлаждения накладки

чем на 10 ^{o}С. Как и в экспериментальных исследованиях, по скорости транспортировки накладок определялось время охлаждения в УЗН, по показаниям пирометров – температуры до и после устройства. При расчёте учитывалось охлаждение накладки на воздухе при её движении от пирометра после печи до УЗН, после выхода из УЗН до пирометра за устройством.

Известные расходы воды на каждую секцию позволили найти плотность орошения разных поверхностей накладки в устройстве по выражению:

$$\omega = \frac{G_{в.п.}}{b_{в.п.} \cdot l_{з.охл}} \tag{3.2}$$

Таким же способом была рассчитана плотность орошения и для боковых и нижней поверхностей.

По полученным расчётным значениям плотностей тепловых потоков и плотностей орошения для каждой поверхности накладки: верхней, нижней и боковых определена аналитическая зависимость плотности тепловых потоков от плотности орошения для соответствующей поверхности. На рисунках 3.6 и 3.7 представлены полученные данные и линия линейного тренда. Коэффициенты аналитической зависимости представлены в таблице 3.4, отклонение линии тренда от экспериментальных данных составило не более 5-7%.

Линейная зависимость выбрана по результатам анализа литературных источников, аппроксимация для нее достигается с достаточно высокой степенью корреляции.

Таблица 3.4 – Зависимость плотности тепловых потоков от плотности орошения рельсовой накладки

Ориентация поверхности	Аналитическая зависимость	Коэффициент достоверности аппроксимации, R^2
верхняя	$q = 0{,}0618\omega - 0{,}4567$	0,95
нижняя	$q = 0{,}0356\omega - 0{,}3561$	0,94
бок верхней головки	$q = 0{,}0524\omega - 2{,}0999$	0,95
бок нижней головки	$q = 0{,}0203\omega - 1{,}9801$	0,93

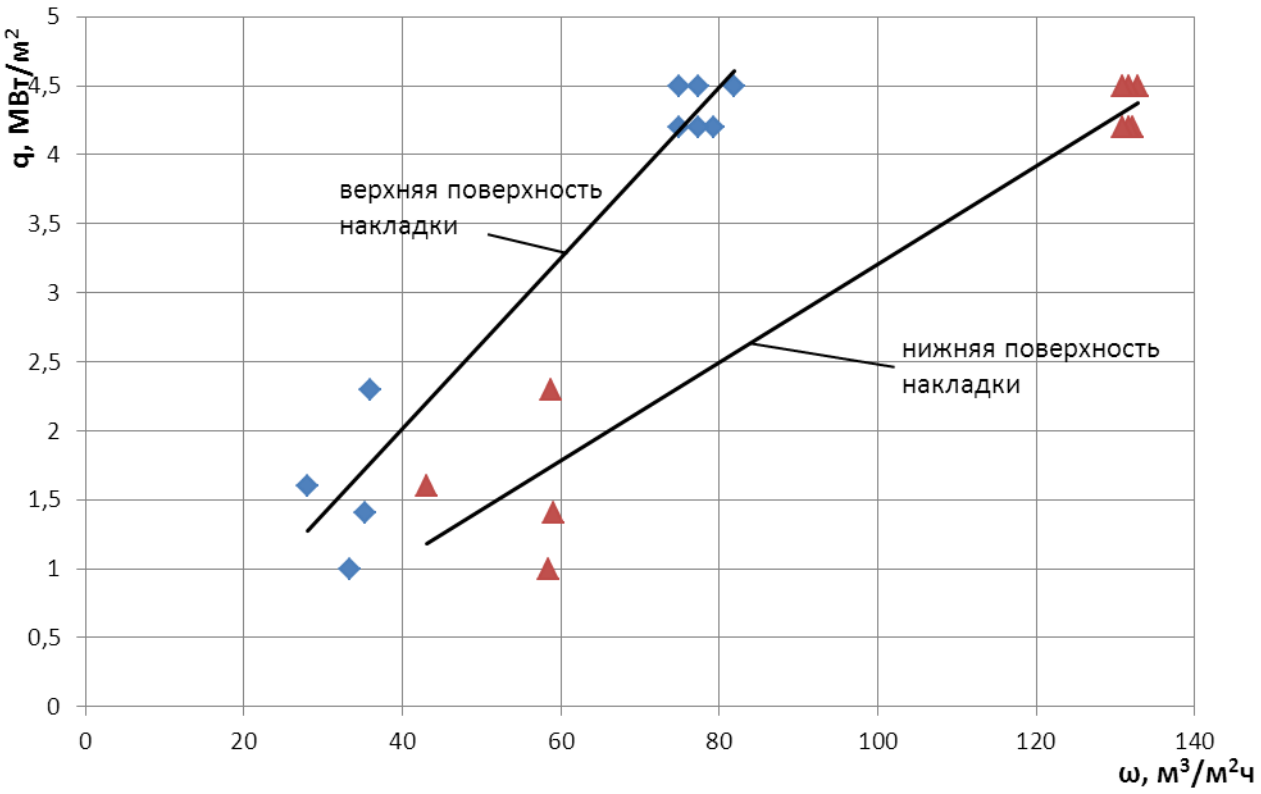


Рисунок 3.6 – Аналитическая зависимость плотностей тепловых потоков от плотностей орошения, полученная по экспериментальным данным для верхней и нижней поверхностей накладки

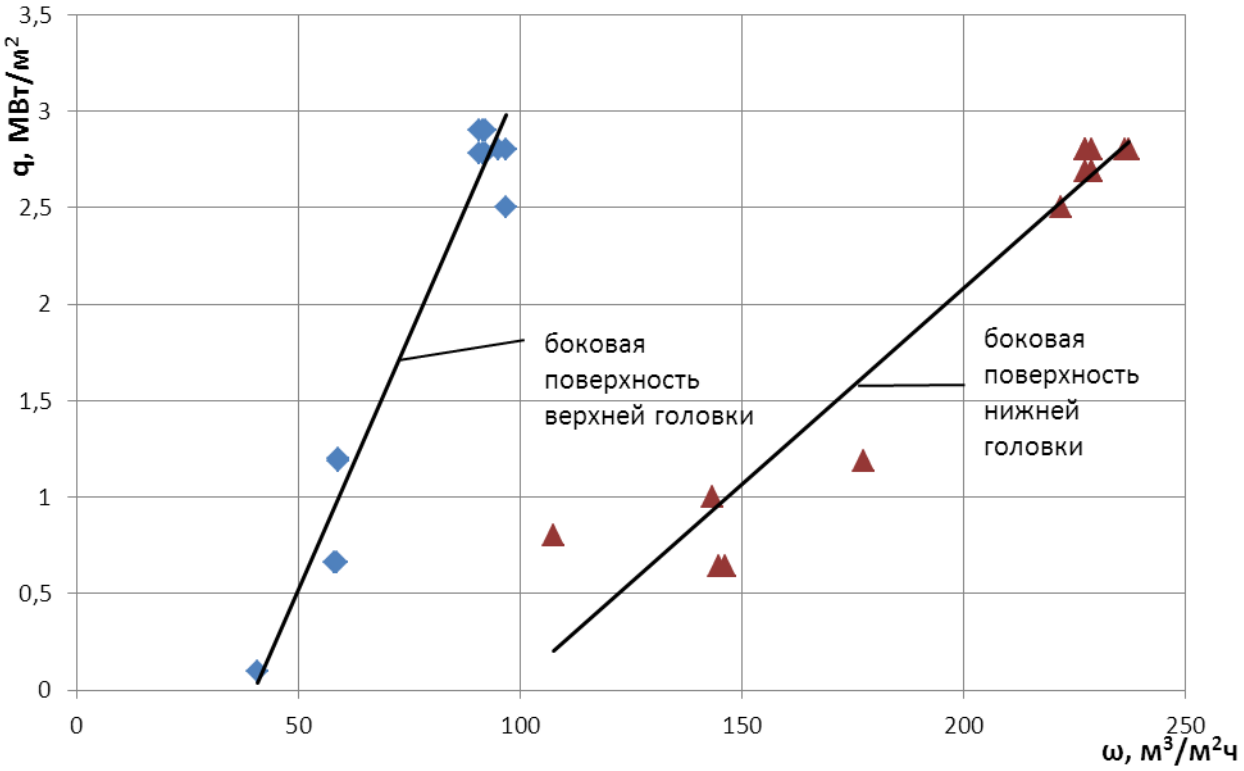


Рисунок 3.7 – Аналитическая зависимость плотностей тепловых потоков от плотностей орошения, полученная по экспериментальным данным для боковых поверхностей накладки

Полученные зависимости удельного теплового потока от плотности орошения для разноориентированных поверхностей накладки позволяют без проведения экспериментов рассчитать режим охлаждения, при котором достигается заданная температура конца охлаждения. Математическая модель адаптирована к конкретному охлаждающему устройству (УЗН), однако впервые полученные для накладки зависимости удельного теплового потока от плотности орошения могут применяться для предварительного расчета и другого фасонного профиля с целью определения основных конструктивных параметров устройства для его охлаждения.

3.2 Результаты исследования механических свойств, прямолинейности и микроструктуры рельсовой накладки

В ходе проведения пуско-наладочных работ исследованы режимы работы устройства при термообработке накладок из металла с разным содержанием углерода. На НСМЗ накладочная полоса поставляется с двух предприятий: с «Объединенного Западно-Сибирского металлургического комбината» (ранее «НКМК», г. Новокузнецк) и «Нижне-Тагильского металлургического комбината» (г. Нижний Тагил). Содержание углерода в металле накладочной полосы этих предприятий значительно отличается – в металле «НКМК» углерода 0,56-0,58%, «НТМК» - 0,46-0,51%. Для накладок с различным содержанием углерода проведён целый ряд исследований механических свойств на разных режимах работы устройства с учётом результатов, полученных в экспериментальных условиях.

На рисунках 3.8-3.10 представлены зависимости механических свойств от температуры конца охлаждения накладки с содержанием углерода 0,56-0,57% (плавки НКМК) и 0,485% (плавки НТМК).

Зависимости, приведенные на рисунках 3.8 – 3.10 показывают, что независимо от содержания углерода в металле, с увеличением температуры конца охлаждения прочностные свойства накладки снижаются, а пластические, напротив, воз-

растают. Оптимальное сочетание пластических и прочностных свойств наблюдается при пересечении линий тренда этих двух характеристик. Для металла с содержанием углерода 0,560-0,570%, как следует из данных рисунков 3.8 и 3.10, диапазон температур конца охлаждения, при которых механические свойства удовлетворяют требованиям ТУ, находится в пределах 480-600°С, для металла с содержанием углерода 0,485% эти пределы составляют 300-500°С, причём верхнее значение ограничивается требованиями твёрдости по Бринеллю (рисунок 3.10).

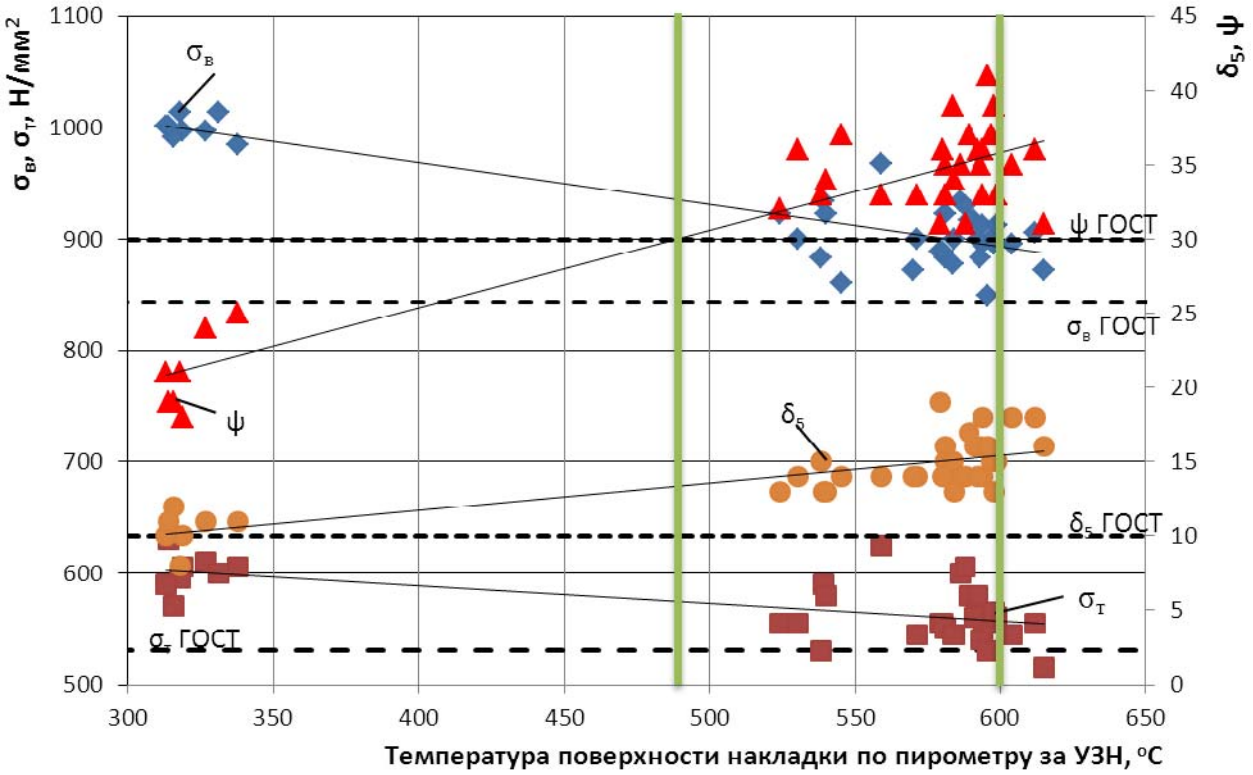


Рисунок 3.8 – Зависимость прочностных и пластических свойств рельсовой накладки от температуры конца охлаждения поверхности накладки с содержанием углерода 0,560-0,570%

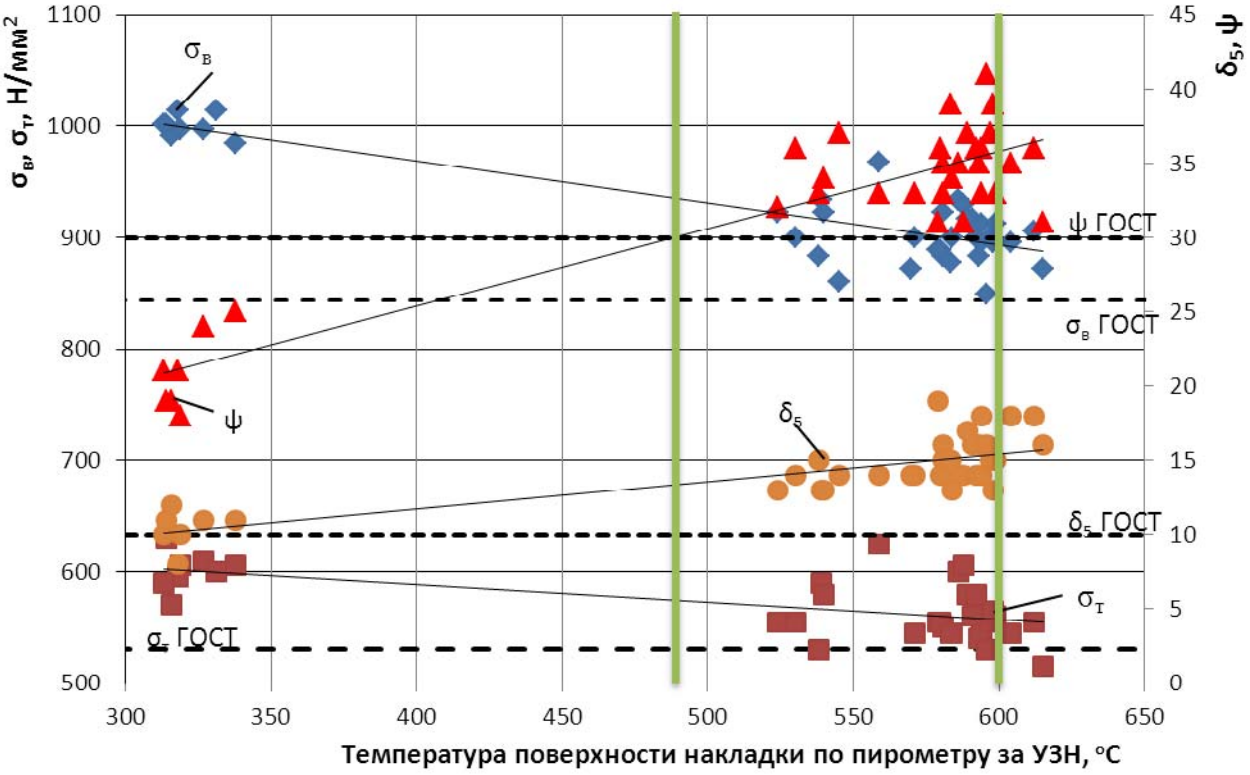


Рисунок 3.9 – Зависимость прочностных и пластических свойств рельсовой накладки от температуры конца охлаждения поверхности накладки с содержанием углерода 0,485%

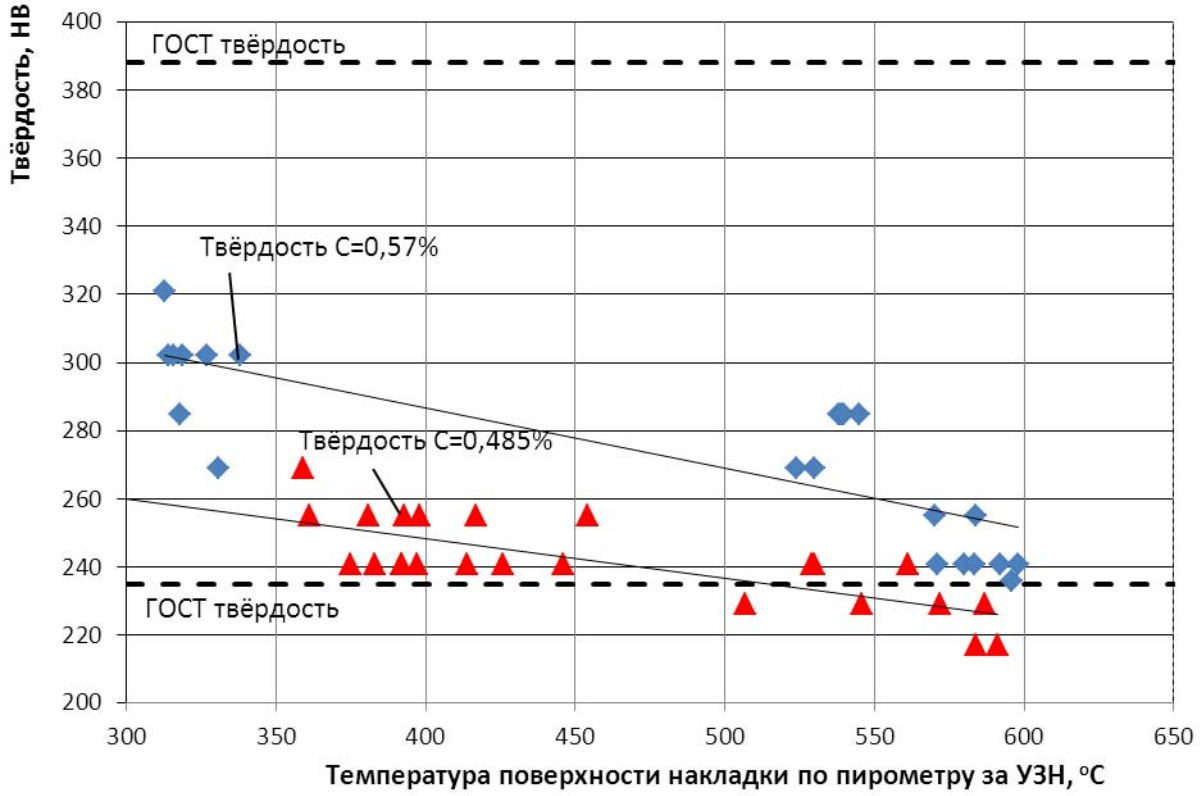


Рисунок 3.10 – Зависимость твёрдости рельсовой накладки от температуры конца охлаждения поверхности для накладок с содержанием углерода 0,560-0,570% и 0,485%

Таким образом, чтобы достичь требуемых значений механических свойств с увеличением содержания углерода, необходимо увеличивать температура конца охлаждения накладки в устройстве. На сегодняшний день определены режимы работы устройства для металла различных плавок, на которых подтверждена повторяемость результатов по механическим характеристикам, соответствующим требованиям нормативной документации.

Механические свойства для рельсовых накладок, термоупрочнённых в УЗН, а также требования специально разработанных на основе ГОСТ 4133-73 [12] технических условий ТУ 14-2Р-463-2011 приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Механические свойства термоупрочнённых накладок в УЗН на филиале ОАО «ЕВРАЗ НТМК» НСМЗ

Металл производства	$\sigma_в$, Н/мм^2	$\sigma_т$, Н/мм^2	δ_5, %	ψ, %	НВ
«НТМК» С=0,485%	855-923	570-620	12-16	31-44	241-269
«КМК» С=0,560-0,570%	850-912	530-555	13-19	31-41	241-321
Требования ТУ 14-2Р-463-2011, не менее	844	530	10	30	235-388

Следует отметить, что полученные результаты промышленных экспериментов на металле НТМК совпадают с результатами экспериментальных исследований по отработке технологии термоупрочнения, в которых использовалась полоса производства НКМК, имеющая содержание углерода 0,53%.

Результаты проведенного исследования свидетельствуют, что при струйном водяном охлаждении в достаточно широком диапазоне температур конца охлаждения после термоупрочнения (360÷550°С) обеспечиваются механические свойства в соответствии с требованиями [12]. Содержание углерода в металле может изменяться от плавки к плавке в более широких пределах (таблица 3.1). Применение данного способа охлаждения позволяет охлаждать накладки из металла с разным содержанием углерода, достигая для каждого сортамента необходимой температуры конца охлаждения путем изменения скорости транспортировки накладки через УЗН.

Исследовано влияние различных соотношений расходов воды на прямолинейность накладки. При этом измерялась исходная величина отклонения от прямолинейности до термообработки и величина кривизны готового продукта. Наилучшие результаты по прямолинейности получены при соотношении расходов $\frac{G_н}{G_в} = 1{,}41$ и $\frac{G_{н.г.}}{G_{в.г}} = 2{,}0$. Для боковой поверхности нижней головки требуется в 2 раза больший расход воды, чем для верхней. Это объясняется сложной геометрией изделия, при этом плотности тепловых потоков на поверхностях обеих головок практически одинаковыми. Данный вывод был сделан ещё в процессе экспериментов и нашёл своё подтверждение в промышленных условиях. Данные по прямолинейности, полученные при данном соотношении расходов, приведены в таблице 3.6. В результаты проведённых промышленных экспериментов был сделан вывод, что механические свойства и прямолинейность без потери производительности хорошо обеспечиваются при работающих двух секциях устройства №2 и №3, поэтому было принято решение работать на этих двух секциях, исключив первую.

При исследовании зависимости механических свойств от температуры конца охлаждения на нескольких образцах были получены данные по микроструктуре. Действующая нормативная документация [12, 98] не устанавливает требования к ней, тем не менее, для получения полных сведений были выполнены и эти исследования на растровом электронном микроскопе. Фотографии микроструктур для нетермоупрочнённых накладок, закалённых в баке с маслом и термообработанных в УЗН, приведены в приложениях Е-М. Во всех случаях структура представляет собой перлит с ферритом по границе зерна, разница лишь состоит в степени дисперсности фаз. При ускоренном водяном охлаждении степень дисперсности выше, чем в исходном состоянии (без термообработки) и при охлаждении в объёме масла.

Таблица 3.6 - Значение прямолинейности рельсовых накладок до охлаждения в УЗН и после

№ образца	вогнутость опорной поверхности в сторону шейки рельса в горизонтальной плоскости (не более 2.4 мм)				выпуклость опорной поверхности в сторону головки рельса в вертикальной плоскости (не более 1.6 мм)		выпуклость опорной поверхности в сторону подошвы рельса в вертикальной плоскости (не более 0.8 мм)	
	к головке рельса		к подошве рельса					
	до	после	до	после	до	после	до	после
1	2,4	вып. 0.1	2,4	вып.0.1	1,2	1,2	0	вогн. 1.6
2	1,6	вып.0.8	1,6	вып.0.6	1	1	0	вогн. 1.2
3	2,4	вып.0.5	2,4	вып.0.5	0,9	1	0,1	вогн. 1.2
4	0,8	вып.0.4	0,8	вып.0.4	1,3	0,8	0,2	вогн. 1.2
5	1,9	0,8	1,9	0,8	1,1	0,8	0,2	вогн. 1.0
6	2,4	вып.0.9	2,4	вып.0.8	0,8	0,4	0	вогн.0.4
7	2,4	вып.0.3	2,4	вып.0.4	0,8	0,5	0	вогн.0.8
8	2,4	вып.1.5	2,4	вып. 1.4	1,1	1,3	0,2	вогн. 1.6
9	1,9	вып.0.6	1,9	вып.0.6	1,2	1,3	0,3	вогн. 1.0
10	0,8	вып.0.9	0,8	вып.0.3	0,9	0,9	0	вогн. 1.0
11	2,4	0,4	2,4	0,4	1,5	0,5	0,4	вогн.0.6
12	0,8	0,8	0,8	0,8	1,1	вогн.0.1	0,2	вогн.0.2
13	2,4	вып.0.8	2,4	вып.0.8	1,1	0,5	0,6	вогн. 1.0
14	2,4	вып.0.2	2,4	выл.0.4	1	0,6	0,1	вогн.0.6
15	2,4	вып.1.8	2,4	вып. 1.7	1,5	вогн.0.2	0,2	вогн.0.4
16	1,9	вып.0.4	1,9	вып.0.4	0,9	0,9	0	вогн. 1.6
17	0,8	вып.0.9	0,8	вып.0.8	1,6	0,4	0,2	вогн.0.2

3.3 Выводы по главе

1. На филиале ОАО «ЕВРАЗ НТМК» - НСМЗ внедрена технология струйного водяного охлаждения, имеющая целый ряд преимуществ: экологичность, управляемость процессом, компактность установки. На участке производства рельсовых накладок установлены два пресса, нагревательная печь, устройство закалки накладок (УЗН), а также транспортное оборудование и автономная система водоснабжения УЗН. Водоснабжение устройства организовано по замкнутой схеме, включающей насосы, двухкамерный бак-резервуар, фильтр и градирню. Основные операции на участке производятся в автоматизированном режиме: транспортировка заготовок по участку, нагрев в печи и охлаждение в УЗН.

2. Конструкция УЗН аналогична конструкции устройства охлаждения на экспериментальной установке ОАО «ВНИИМТ», состоит двух секций охлаждения разной интенсивности, что позволяет обрабатывать накладки в широком диапазоне режимов охлаждения. Линия оснащено пирометрами для контроля температуры накладки на выходе из печи, до и после УЗН. Общий расход воды на устройство достигает 80 $м^3$/ч, скорость транспортировки находится в пределах 0,05-0,26 м/с.

3. На основе проведенных исследований получены линейные аналитические зависимости плотности теплового потока от плотности орошения водой для различно ориентированных поверхностей разномассивных элементов накладки. Расчётные значения плотности теплового потока отличаются от экспериментальных значений на 5-7%, что позволяет применять их в инженерных расчётах.

4. Проведена адаптация математической модели к конкретному охлаждающему устройству. По результатам адаптации математической модели, в основе которой двумерное уравнение нестационарной теплопроводности, можно производить расчёт охлаждения рельсовой накладки струями воды данном устройстве без проведения экспериментальных исследований.

5. Установлены соотношения расходов воды, при которых достигаются требования к прямолинейности накладки. Для нижней и верхней поверхностей отношение расходов воды составляет 1,41, для поверхности нижней и верхней головок – 2.

6. Получены зависимости механических свойств накладки от температуры конца охлаждения для различного по содержанию углерода химического состава накладочной полосы. Показано, что с увеличением температуры конца охлаждения для марок стали конкретных производителей временное сопротивление, предел текучести и твердость (характеристики прочности) уменьшаются, а относительное удлинение и относительное сужение (характеристики пластичности) увеличиваются. Получены пределы изменения температуры конца охлаждения для плавок различного химического состава, при которых достигается требуемая по ТУ совокупность механических свойств накладки. Рекомендуемый диапазон температур конца охлаждения для металла с содержанием углерода 0,560-0,570%, находится в пределах 480-600°С, для металла с содержанием углерода 0,485% - 300-500°С, причём верхнее значение температуры ограничивается требованиями твёрдости по Бринеллю.

7. С использованием растрового электронного микроскопа исследованы микроструктуры накладки в исходном состоянии (без термообработки), после закалки в баке с маслом и термоупрочнения в УЗН. Вид структуры после закалки в масле принципиально не отличается от структуры, полученной при струйном водяном охлаждении, и представляет собой перлит с ферритной сеткой по границе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование процесса ускоренного струйного водяного охлаждения рельсовой накладки определило перспективность данной технологии для проката, элементы которого обладают различной массивностью. Основными доводами для такого заключения являются результаты выполненной работы.

На основе анализа данных научно-технической литературы показано, что возможно обеспечить управляемость процессом охлаждения проката несимметричного профиля применением дифференцированного струйного охлаждения. Существующий традиционный способ закалки рельсовой накладки в объёме масла не способен обеспечить одинаковые условия охлаждения разномассивных элементов накладки, поэтому разработка конструкции устройства ускоренного струйного водяного охлаждения и определение тепловых режимов его работы представляло актуальную инженерную задачу.

Проведено математическое моделирование процесса охлаждения накладки в объёме масла на основе анализа результатов экспериментальных данных по охлаждению изделий в масляном баке ряда авторов. Определено, что по причине разномассивности профиля изделия охлаждение головок и шейки происходит с разной интенсивностью. Полученные результаты среднемассовых скоростей охлаждения послужили основой предварительного математического моделирования процесса ускоренного струйного охлаждения рельсовой накладки и разработки конструкции устройства и основных тепловых режимов его работы.

Проведено математическое моделирование процесса охлаждения накладки при струйном водяном охлаждении, для задания граничных условий использованы зависимости плотности теплового потока от плотности орошения, полученные при ускоренном охлаждении плоского раската. Определены плотности тепловых потоков для разномассивных элементов накладки, уточнены конструктивные параметры экспериментального устройства ускоренного охлаждения.

Проведённые экспериментальные исследования процесса охлаждения накладки в опытном устройстве позволили адаптировать математическую модель, т.е. уточнить граничные условия процесса. В дальнейшем это позволяет использовать модель при охлаждении накладки в устройствах подобного вида без проведения экспериментов.

Экспериментальное устройство явилось прототипом промышленного, установленного на участке производства рельсовых накладок Цеха рельсовых скреплений филиала ОАО «ЕВРАЗ НТМК»-НСМЗ в рамках договора ДГНТ 3.00.3063/661 от 15.01.2011 г на проведение промышленных и экспериментальных исследований, разработку технических заданий и проектно-конструкторской документации, изготовления и поставки оборудования, выполнения пуско-наладочных работ на линии производства рельсовых накладок. Таким образом, при строительстве нового участка был внедрён новый способ – струйное водяное охлаждение взамен традиционного – охлаждение в объёме масла.

Также были уточнены конструктивные параметры и определены тепловые режимы работы промышленного устройства, на которых обеспечиваются требования к механическим свойствам накладки и её прямолинейности. В процессе проведения пуско-наладочных работ на промышленном устройстве были экспериментально определены аналитические зависимости плотности тепловых потоков от плотности орошения для каждой поверхности элемента накладки с различным марочным составом металла. Эти зависимости использованы при установлении тепловых режимов охлаждения рельсовых накладок в устройстве закалки накладок. В результате промышленного освоения системы ускоренного охлаждения, выпускаемые предприятием рельсовые накладки удовлетворяют требованиям нормативной документации к механическим свойствам и прямолинейности.

Опыт эксплуатации устройства закалки накладок с использованием струйного водяного охлаждения подтвердил достоинства этого способа по энергоэффективности, ресурсосбережению и экологичности.

Полученные аналитические зависимости плотности теплового потока от плотности орошения водой, методика подхода к выбору параметров тепловых режимов охлаждения на завершающих стадиях выпуска проката, подтвержденные промышленным опытом освоения технологии струйного водяного охлаждения рельсовых накладок, могут успешно применяться при проектировании устройств ускоренного охлаждения проката несимметричного профиля, имеющего разномассивные элементы.

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

Обозначения:

$\sigma_в$ – временное сопротивление разрыву, *МПа*;

$\sigma_т$ – предел текучести, *МПа*;

σ_0 – напряжение сдвига до деформации, *МПа*;

δ, δ_5 – относительное удлинение, *%*;

ψ – относительно сужение, *%*.

$K_у$, $K_в$ – коэффициенты упрочнения;

$d_з$ – диаметр зерна;

$T_п$, $T_{пов}$ – температура поверхности, *К*;

$T_к$ – температура закалочной среды, *К*;

ΔT – величина перегрева, *К*;

$\upsilon_и$ – скорость истечения струи, *м/с*;

P, p - давление, *МПа*;

Bi – критерий Био (термической массивности);

$t_{см\,к}$, $t_{см\,н}$ - среднемассовая температура начала и конца охлаждения, ^oC;

τ - время охлаждения, *с, ч*;

$\upsilon_{см}$ – среднемассовая скорость охлаждения, *м/с*;

q - плотность теплового потока, $Вт/м^2$;

ω – плотность орошения, $м^3/(м^2 \cdot ч)$.

$\lambda(t)$ - теплопроводность при температуре *t*, *Вт/ (м·град))*;

c(t) - теплоёмкость при температуре *t*, *Дж/(кг·град)*;

c_1, c_2 - теплоёмкость в начальный и конечный момент расчёта, *Дж/(кг·град)*;

$\rho(t)$ - плотность металла при температуре *t*, кг/м^3;

T - температура по абсолютной шкале, *К*;

t - температура по стоградусной шкале (Цельсия), ^0C;

x, y – координаты точки тела;

ε - степень черноты поверхности металла;

$C_O = 5{,}67$ *Вт /(м^2·град^4)* - константа излучения абсолютно черного тела;

α - коэффициент теплоотдачи, *Вт/ (м^2·град)*;

V - объем, *м^3*;

S – площадь поверхности накладки, м^2;

d - диаметр, *м*;

G – расход воды, м^3/ч;

μ – расходный коэффициент для данного вида форсунок, μ=0,8;

h – напор воды в м.вод.ст.;

l – длина, м;

b – длина образующей поверхности, м.

$g = 9{,}81$ *м/с^2* - ускорение силы тяжести;

$\pi = 3{,}14$;

Δ - разность, напор;

Ar_3 – температура начала распада аустенита при охлаждении металла (выделение структурно свободного феррита);

Ar_1 – температура начала распада аустенита с образованием ферритокарбидной смеси (ФКС) различной степени дисперсности – перлита, сорбита или бейнита;

Индексы:

пов – поверхность;

окр.ср. – окружающая среда;

нач – начальный момент охлаждения;

см – среднемассовое значение;

см1, см2 – среднемассовое значение в начальный и конечный момент расчёта

н.п. (ниж.пов.), в.п. – нижняя и верхняя поверхность накладки соответственно;

з.охл. – зона охлаждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Транспорт России. Информационно-статистический бюллетень [Электронный ресурс]. – 2013. – Январь-сентябрь. – С14. – Режим доступа: http://www.pac.mintrans.ru/documents/detail.php?ELEMENT_ID=21090

2. Транспорт России. Информационно-статистический бюллетень [Электронный ресурс]. – 2012. – Январь-декабрь. – С63. – Режим доступа: http://www.pac.mintrans.ru/documents/detail.php?ELEMENT_ID=20033

3. Стратегия развития железнодорожного транспорта в РФ до 2030 года [Электронный ресурс]. – http://www.protown.ru/information/doc/4308.html

4. Бородин, А.В., Ковалёва, Н.В. «Стыковое соединение рельсов»/ А.В. Бородин, Н.В. Ковалёва // Железнодорожный транспорт. – 2000. – №6. – С.69.

5. Бакулин, А.С. «Сооружения, устройства, подвижной состав метрополитена»/ А.С.Бакулин. – М.: Транспорт. 1979. – С.238.

6. Рейхарт, В.А., Добужская, А.Б., Галицын, Г.А. Рельсы Нижнего Тагила / В.А.Рейхарт, А.Б.Добужская, Г.А.Галицын// Путь и путевое хозяйство. – 2008. – № 5. – С.6-8.

7. Гайдамака, П.С., Мурсалимов, Т.Н., В.П. Рогов, В.П. и др. Экономичное скрепление / П.С. Гайдамака, Т.Н. Мурсалимов, В.П. Рогов и др. // Путь и путевое хозяйство. – 1986. – №8. – С.21-23.

8. Тарабрин, В.Ф., Одынец, С.А., Главатский, Д.А., Читякова, О.Е., Кононов, Д.А. Контроль стыковых накладок / В.Ф. Тарабрин, С.А.Одынец, Д.А.Главатский, О.Е.Читякова, Д.А.Кононов // Путь и путевое хозяйство. – 2011. – №7. – С.9.

9. Muhammad Akhtar, David Davis, Luis Maal, Jeff Gordon, David Jeong. Effects of track parameters on rail joint bar stressed and crack growth. / Muhammad Akhtar, David Davis, Luis Maal, Jeff Gordon, David Jeong // Proceedings of AREMA 2010 Annual Conference and exposition. Orlando, Florida. – 2010. – 29 August-1 Sept. – pp.

10. Жулев, Г.Г., Карпачевский, Г.В., Новакович, М.В., Игнатьев, А.Н., Х.Х.Дутаев, Х.Х. Проблемы и перспективы совершенствования системы управле-

ния температурным режимом бесстыкового пути / Г.Г.Жулев, Г.В.Карпачевский, М.В.Новакович, А.Н.Игнатьев, Х.Х.Дутаев // Вестник РГУПС. – 2005. - №4. – С.110-116.

11. Иванов, П.С., Даньков, С.Ф., Юзык, О.В., Шишмаев, А.А. Новые ресурсосберегающие технологии в рельсовом хозяйстве / П.С.Иванов, С.Ф.Даньков, О.В.Юзык, А.А.Шишмаев // Путь и путевое хозяйство. – 2011. – №7. – С.23-25.

12. ГОСТ 4133-73 Накладки рельсовые двухголовые для железных дорог широкой колеи. Технические требования. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1998. – 7 с.

13. TB/T 2345-2008 Technical specifications for the procurement of 43 kg/m ~ 75 kg/m as joint bar. [Электронный ресурс]. – 2008. – С13. – Режим доступа: http://www.chinesestandard.net/default.aspx?PDF-English-ID=TB/T%2B2345-2008

14. T-1-2012 Indian railways standard specification for fish plates and fishplate bars. [Электронный ресурс]. – 2012. – С17. – Режим доступа: http://www.rdso.indianrailways.gov.in/works/uploads/File/T-1-2012%20Draft.pdf

15. JIS E 1102:2001 Fish plates for rails. [Электронный ресурс]. – 2001. – С40. – Режим доступа: http://www.webstore.jsa.or.jp/webstore/Com/FlowControl.jsp?lang=en&bunsyoId=JIS+E+1102%3A2001&dantaiCd=JIS&status=1&pageNo=0

16. ASTM A49-12 Standard specification for heat-treated carbon steel joint bars, microalloyed joint bars, and forged carbon steel compromise joint bars. [Электронный ресурс]. – 2012. – С4. – Режим доступа: http://www.astm.org/Standards/A49.htm

17. ASTM A3-01 Standard specification for steel joint bars, low, medium and high-carbon (non-heat-treated). [Электронный ресурс]. – 2012. – С3. – Режим доступа: http://www.astm.org/Standards/A3.htm

18. ГОСТ Р 51685-2000*. Рельсы железнодорожные. Общие технические условия. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. – 27 с.

19. Fumin XU, Kai WEN, Yi TAN Microstructures and mechanical properties of low carbon fishplate materials / Fumin XU, Kai WEN, Yi TAN // Acta Metallurgica Sinica (Engl. Lett.). – 2010. – Vol.23. – №3. – June 2010. – pp.176-184.

20. Bramfitt, B.L., Hansen, S.S., Wirick, D.P., Collins, W.B. Development of a microalloyed joint bar. / B.L.Bramfitt, S.S.Hansen, D.P.Wirick, W.B.Collins // Microalloyed HSLA Steels. World Materials Congress: Conference Proceedings. – 1988. – pp. 451-457.

21. Гахеладзе, Г.С., Азаркевич, А.А., Танцюра, С.Н., Журба, В.А., Пыхтин Я.М. Опробование низколегированной стали для высокопрочных незакалённых накладок изолирующих стыков/ Г.С.Гахеладзе, А.А.Азаркевич, С.Н.Танцюра, В.А.Журба, Я.М.Пыхтин // Сталь. – 2007. – №4. –С.75-76.

22. Цены на сырьё и металлопродукцию на мировом рынке. Бюллетень «Чёрная металлургия». – 2009. – №12. – С.77.

23. Цены на сырьё и металлопродукцию на мировом рынке. Бюллетень «Чёрная металлургия». – 2013. – №12. – С.92.

24. Цены на сырьё и металлопродукцию на мировом рынке. Бюллетень «Чёрная металлургия». – 2011. – №12. – С.103.

25. Цены на сырьё и металлопродукцию на мировом рынке. Бюллетень «Чёрная металлургия». – 2013. – №12. – С.95.

26. Померанцев, А.А. Изгиб рельса при остывании с высоких температур / А.А.Померанцев // «Известия Академии наук». – 1941. – №2. – С.89-115.

27. ГОСТ 18267-82 Рельсы железнодорожные типов Р50, Р65 и Р75 широкой колеи, термообработанные путем объемной закалки в масле. Технические условия. – М. : ИПК Издательство стандартов, 1988. – 16 с.

28. Солдатенко, Н.А., Карманов, В.В., Ходяшев, М.Б. Экологические аспекты утилизации моторных масел в качестве закалочных жидкостей / Н.А. Солдатенко, В.В. Карманов, М.Б. Ходяшев // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2011. – №7. – с.60-63.

29. Закалочная среда «ПК-М». Общая информация [Электронный ресурс]. – Режим доступа:
http://www.polyterm.ru/zakalochnaya-sreda-pk-m/general-information/

30. Отработка технологии термоупрочнения рельсовых накладок на опытном стенде ОАО «ВНИИМТ»: отчёт о НИР/Липунов Ю.И. – Екатеринбург : ОАО «Научно-исследовательский институт металлургической теплотехники» - ОАО «ВНИИМТ», 2012. – С.45-47.

31. Цзи-Хун, Яо «Охлаждение и выбор сред при закалке стали» / Яо Цзи-Хун // «Индукционный нагрев». – 2011. – №18. – С. 9-16.

32. Ежов, В.М. Выбор экологически чистых полимерных водорастворимых закалочных сред взамен минеральных масел / В.М.Ежов // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1991. – №4. – С. 8-10.

33. Захаров, А.В., Эйсмондт, Ю.Г. и др. Исследование возможности использования полимерной среды Na-КМЦ для закалки рельсов и деталей рельсовых скреплений / А.В.Захаров, Ю.Г.Эйсмондт и др. // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1991. – №4. – С. 24-27.

34. Эйсмондт, Ю.Г., Гервасьев, М.А., Трунина, Т.А. Исследование возможности закалки рельсовых накладок в полимерной среде / Ю.Г.Эйсмондт, М.А.Гервасьев, Т.А.Трунина // Сталь. – 2000. – №9. – С. 71-73.

35. Пат. 2291206 Российская Федерация, МПК C21D9/04 C21D1/60 Способ термической обработки рельсовых накладок / Павлов В.В., Корнева Л.В., Пятайкин Е.М, Козырев Н.А., Моренко А.В., Щеглова А.Б., Ворожищев В.И., Тараборин А.Н., Шур Е.А., Ткачев А.И.; патентообладатель ОАО «Новокузнецкий металлургический комбинат». – № 2005117862/02; заявл. 09.06.2005; опубл. 10.01.2007, Бюл. № 1. – 5 с.

36. Звигинцева, Г.Е., Зброжек, Р.М., Николаева, Н.Л., Эйсмондт, Ю.Г. Остаточные напряжения в деталях, закалённых в полимерных растворах ПК-2 / Г.Е.Звигинцева, Р.М.Зброжек, Н.Л.Николаева, Ю.Г.Эйсмондт // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1991. –№4. – С. 27-29.

37. Галицын, Г.А., Добужская, А.Б., Муравьёв, Е.А. Технология термообработки железнодорожных рельсов и накладок при охлаждении в воде / Г.А.Галицын, А.Б.Добужская, Е.А. Муравьёв // Материалы юбилейной рельсовой комиссии, посв. 70-летию Кузнецкого металлургического комбината и 100-летию со дня рождения Ю.В.Грдины. – 2002. – С. 156-167.

38. Рассизадегани, Й., Рейган, Ш., Аскари, М. Сравнение закаливающих способностей горячей соляной и масляной ванн / Й.Рассизадегани, Ш.Рейган, М.Аскари // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2006. – №5(611). – С. 8-11.

39. Попов, А.А., Попова, Л.Е. Справочник термиста. Изотермические и термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита / А.А. Попов, Л.Е. Попова. – М.: МАШГИЗ, 1961. – 430 с.

40. Trayanov, G.G. Lipunov, Yu.I. Use of thermokinetic diagrams of decomposition of supercooled austenite for designing the process of hardening of steel parts at a variable cooling rate / G.G.Trayanov, Yu.I. Lipunov // Metal Science and Heat Treatment. – 2011. – Vol.52. – 11-12, March. – pp. 608-611.

41. Ануфриев, Н.П. Расчетно-экспериментальное моделирование диффузионного распада переохлажденного аустенита доэвтектоидных конструкционных сталей: дис. …канд. техн. наук: 05.16.01 / Ануфриев Николай Петрович. – Екатеринбург, 2011. – 149 с.

42. Ампилогов, А.Ю. Прогнозирование структуры и свойств сталей в объеме изделия при закалке и отпуске: дис. …канд. тех. Наук: 05,02,01 / Ампилогов Алексей Юрьевич. – М., 2008. – 145 с.

43. Luty Wackaw Cooling media and their properties. Chapter 12. Quenching theory and technology / Wackaw Luty ed. Bozidar Liscic, Hans M. Tensi, Lauralice C.F. Canale, George E. Totten. – Taylor and Francis Group, 2010. – pp.715.

44. Темлянцев, М.В., Стариков, В.С., Темлянцев, Н.В., Сюсюкин, А.Ю. Исследование окисления и обезуглероживания сталей для рельсов и рельсовых накладок

при нагреве под прокатку / М.В. Темлянцев, В.С. Стариков, Н.В. Темлянцев, А.Ю. Сюсюкин // Известия ВУЗов. Чёрная металлургия. – 2004. – №8. – С. 36-38.

45. Петраш, Л.В. Закалочные среды / Л.В. Петраш. – М.: МАШНИЗ. – 1959.–112 с.

46. Шорохова, О.В., Осколкова, Т.Н. Особенности охлаждающей способности водного раствора полимера «Термовит-М» / О.В. Шорохова, Т.Н. Осколкова // Известия ВУЗов. Чёрная металлургия. – 2011. – №8. – С. 56-58.

47. Святкин, А.В., Азизбекян, В.Г., Сардаев, Н.И., Герасин, А.П., Абрамова, А.Н., Викарчук, А.А. Изменение свойств закалочных сред в зависимости от температуры нагрева / А.В. Святкин, В.Г. Азизбекян, Н.И. Сардаев, А.П. Герасин, А.Н. Абрамова, А.А. Викарчук // Вестник науки ТГУ. – 2011. – №2 (16). – С. 74-76.

48. Эйсмондт, Ю.Г. Исследование закалочных сред, альтернативных закалочным маслам / Ю.Г. Эйсмондт // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2000. – №11. – С. 32-36.

49. Шорохова, О.В., Осколкова, Т.Н. Новая водополимерная закалочная среда «Термовит-М» / О.В. Шорохова, Т.Н. Осколкова // Известия ВУЗов. Чёрная металлургия. – 2011. – №4. – С. 28-30.

50. Горюшин, В.В. О применении синтетических закалочных сред в промышленности / В.В.Горюшин // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1991. – №4. – С. 10-14.

51. Жукова, Т.Д., Беляшина, Н.И., Сосновский, П.В. Изменение свойств закалочной среды УЗСП-1 в процессе эксплуатации / Т.Д. Жукова, Н.И. Беляшина, П.В. Сосновский // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1991. – №4. – С. 14-15.

52. Федин, В.М., Борц, А.И. Лабораторная оценка потребительских свойств деталей верхнего строения пути и способы повышения их службы / В.М. Федин, А.И. Борц // Материалы рельсовой комиссии сб.докл. 1-3 декабря. – 1999. – С. 79-99.

53. Федин, В.М. Способы повышения эксплуатационных свойств элементов рельсовых скреплений на заводах-изготовителях и технические решения по улучшению эксплуатационных свойств деталей верхнего строения пути за счёт новых

решений по термической обработке и применению новых материалов / В.М. Федин // Материалы рельсовой комиссии сб.докл. октябрь. – 2000. – С. 153-164.

54. Кобаско, Н.И. Закалка стали в жидких средах под давлением / Н.И.Кобаско. – К. : Наукова Думка, 1980.–208 с.

55. Справочник металлиста т.2 / под ред. А.Г. Рахштадта, В.А. Брострема. – М. : Машиностроение, 1976.–289-306 с.

56. Михеев, М.А., Михеева, И.М. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.

57. Кобаско, Н.И. Технологические аспекты охлаждения при закалке (обзор) / Н.И. Кобаско // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1991. – С. 2-8.

58. Гогонин, И.И. Зависимость критического теплового потока при кипении от физических свойств теплоносителя / И.И. Гогонин // Теплофизика и аэромеханика. – 2009. – Т.16. – №1. – С. 115-122.

59. Юдаев, Б.Н. Техническая термодинамика. Теплопередача / Б.Н. Юдаев. – М. : Высшая школа, 1988.–479 с.

60. Исаченко, В.П., Осипова, В.А., Сукомел, А.С. Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М. : Энергоиздат, 1981.–416 с.

61. Эйсмондт, Ю.Г. Разработка технологических режимов и установок охлаждения термически упрочняемого проката / Ю.Г.Эйсмондт // Сталь. – 1996. – №6. – С. 69-71.

62. Эйсмондт, К.Ю., Липунов, Ю.И., Завгороднев, Д.В., Некрасова, Е.В., Варламов, С.О., Казабеков, Н.М. Автоматизированная система управления устройством контролируемого охлаждения стана 5000 / К.Ю. Эйсмондт, Ю.И. Липунов, Д.В. Завгороднев, Е.В. Некрасова, С.О. Варламов, Н.М. Казабеков // Сталь. – 2005. – №3. – С. 61-65.

63. Кольман, Р., Кремер, К.И., Раковски, Ф., Розенхайнрих, М. Термомеханическая обработка высококачественной сортовой стали / Р. Кольман, К.И. Кремер, Ф. Раковски, М. Розенхайнрих // Чёрные металлы. – 1991. – №4. – С. 48-55.

64. Беккер, Ф., Денглер, Ж.М., Шмеддес, Х., Вик, К. Термомеханическая обработка катаных профилей / Ф. Беккер, Ж.М. Денглер, Х. Шмеддес, К. Вик // Чёрные металлы. – 1991. – №4. – С. 55-60.

65. Долженков, И.Е., Гуль, Ю.П. Интенсивные технологии упрочнения металлопроката, труб и металлоизделий / И.Е. Долженков, Ю.П. Гуль // Сталь. – 1986. – №10. – С. 69-73.

66. Генкин, И.З. Термическая обработка стыков рельсов на индукционных установках / И.З. Генкин // Автоматическая сварка. – 2003. – №9. – С. 41-44.

67. Бровкин, В.Л., Анурова, Т.В., Радченко, Ю.Н., Коваленко, В.В., Лазич, Л. Анализ существующих технологий ускоренного охлаждения сортового проката и его влияние на структуру и механические свойства металла / В.Л. Бровкин, Т.В. Анурова, Ю.Н. Радченко, В.В. Коваленко, Л.Лазич // Металлургическая теплотехника. – 2010. – №2(17). – С. 14-22.

68. Будрин, Д.В., Кондратов, В.М. Особенности спрейерного метода охлаждения при термообработке / Д.В. Будрин, В.М. Кондратов // Известия ВУЗов. –1964. – №11. – С. 168-173.

69. Насер, И.Б., Кшау, М., Ксиби, Х. Оптимизация локального охлаждения горячих деталей струёй воды / И.Б. Насер, М. Кшау, Х. Ксиби // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2011. – №5(671). – С.32-37.

70. Ефимов, О.Ю., Чинокалов, В.Я., Юрьев, А.Б., Белов, Е.Г., Громов, В.Е. Закономерности формирования структурно-фазовых состояний и механических свойств при ускоренном охлаждении двутавра / О.Ю. Ефимов, В.Я. Чинокалов, А.Б. Юрьев, Е.Г. Белов, В.Е. Громов // Известия ВУЗов. Чёрная металлургия. – 2011. – №4. – С. 16-19.

71. Лыков, А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. – М. : Высшая школа. 1967.–598 с.

72. Иванцов, Г.П. Нагрев металла (теория и методы расчёта) / Г.П. Иванцов. – Свердловск: 1948.– 90 с.

73. Горбунов, А.Д. Коэффициент термической массивности тел в задачах нестационарной теплопроводности / А.Д. Горбунов // Известия ВУЗов. – 2009. – №10. – С. 37-41.

74. Абдурашитов, А.Ю. Рельс с улучшенным профилем / А.Ю. Абдурашитов // Путь и путевое хозяйство. – 2011. – №2. – С. 5-10.

75. Маковский, В.А. Эмпирические формулы для выражения температурной зависимости теплофизических свойств сталей / В.А. Маковский // Сталь. – 1972. – № 1. – С. 87-91.

76. Эйсмондт, К.Ю. Разработка и внедрение в производство устройств термоупрочнения проката регулируемым охлаждением на основе анализа процессов теплообмена : автореф. дис. …канд. тех. Наук : 05.16.01; 05.16.02 / Эйсмондт Константин Юрьевич. – Екатеринбург. – 2011. – 23 с.

77. Головин, Г.Ф., Зимин, Н.В. Технология термической обработки металлов с применением индукционного нагрева / Г.Ф. Головин, Н.В. Зимин. – Л. : Машиностроение, 1990. – 87 с.

78. Люты, В. Закалочные среды: справочник / В. Люты; под ред. С.Б. Масленкова. – Челябинск : Металлургия, 1990.–192 с.

79. Приходько, В.С. Охлаждающие среды для закалки / В.С. Приходько. – М.: Машиностроение, 1977.–32 с.

80. Производство накладок двухголовых для железнодорожных рельсов типов Р50 и Р65. Технологическая инструкция ТИ 162-СП-036-2010 г.Новокузнецк с.80 2010г.

81. ГОСТ 8193-73 «Накладки двухголовые к рельсам типов Р65 и Р50. Конструкция и размеры». – М. : ИПК Издательство стандартов, 1998. – 6 с.

82. Траянов, Г.Г., Липунов, Ю.И., Петрова, Л.Б., Замараев, Л.М. Разработка систем и режимов струйного охлаждения стали при термообработке / Г.Г.Траянов, Ю.И.Липунов, Л.Б.Петрова, Л.М.Замараев // Тематический отраслевой сборник Металлургическая теплотехника. –1979. – №8. – С. 130-134.

83. Петрова, Л.Б., Траянов, Г.Г. Водяное и водо-воздушное охлаждение движущейся тонкой стальной полосы при закалке / Л.Б.Петрова, Г.Г.Траянов // Тематический отраслевой сборник Металлургическая теплотехника. – 1981. – №9. – С. 64-67.

84. Промежуточный отчёт о научно-исследовательской работе «Исследование и освоение работы закалочных устройств роликового типа, в том числе с форсуночным охлаждением и при закалке с самоотпуском». Часть 1 «Тепловой расчёт устройств для закалки толстых стальных листов и плит (инженерный метод)». Свердловск. 1976 г. С. 63.

85. Липунов Ю.И. Исследование и разработка устройств для струйного, охлаждения листового проката при термической обработке в потоке : дис. …канд. техн. наук : 05.16.02 / Липунов Юрий Иванович. – Свердловск, 1977. – 213 с.

86. Захарченко, М.В. (Старцева, М.В.), Липунов, Ю.И., Ярошенко, Ю.Г. Создание высокоэффективного процесса контролируемого охлаждения рельсовых накладок / М.В. Захарченко (М.В. Старцева), Ю.И. Липунов, Ю.Г. Ярошенко // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2013. – Т.2. – №4 (52). – С. 29-34.

87. Yaroshenko, Y.G., Lipunov, Y.I. , Zakharchenko, M.V. (Startseva, M.V.), Eysmondt, K.Y. , Nekrasova, E.V., Trayanov, G.G. Developing a modern thermal strengthening technique for regulated fishplate cooling / Y.G. Yaroshenko, Y.I. Lipunov, M.V. Zakharchenko (M.V. Startseva), K.Y. Eysmondt, E.V. Nekrasova, G.G. Trayanov // Energy Production and Management in the 21st Century. The Quest for Sustainable Energy. – 2014. – Volume 1. – pp .491-501

88. ГОСТ 1497-84 Металлы. Методы испытаний на растяжение. – М. : Стандартинформ, 2005. – 24 с.

89. Таблица соответствия твёрдости и предела прочности стали // «Балтийские металлы» №5(16). – 2000. – С 10-11.

90. ГОСТ 5639-82 Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна. – М: ИПК Изд-во стандартов, 2003. – 38 с.

91. Недома, И. Расшифровка рентгенограмм порошков / И. Недома, – М. : Металлургия. 1975.– 424 с.

92.Alphabetical Indexes (Inorganic Phases) sets-44. The International Centre for Diffraction Data, USA : 2011.

93.Кузнецова, Г.А. Качественный рентгенофазовый анализ (методические указания) / Г.А. Кузнецова. – Иркутск: Ир. Гос. Ун-т, 2005.–28 с.

94. Липунов, Ю.И., Эйсмондт, К.Ю., Ярошенко, Ю.Г.,Захарченко, М.В. (Старцева, М.В.), Некрасова, Е.В. Разработка новой технологии и устройства для термоупрочнения рельсовых накладок / Ю.И. Липунов, К.Ю. Эйсмондт, Ю.Г. Ярошенко, М.В. Захарченко (М.В. Старцева), Е.В. Некрасова // Теория и практика тепловых процессов в металлургии: сборник докладов международной научно-практической конференции, 18-21 сентября 2012 г. Екатеринбург, 2012. – С. 290-295.

96. Липунов, Ю.И., Эйсмондт, К.Ю., Захарченко, М.В. (Старцева, М.В.), Ярошенко, Ю.Г, Некрасова, Е.В. Внедрение современного энерго- и ресурсосберегающего оборудования и экологически чистой технологии термоупрочнения в производстве рельсовых накладок / Ю.И. Липунов, К.Ю. Эйсмондт, М.В. Захарченко (М.В. Старцева), Ю.Г. Ярошенко, Е.В. Некрасова // Бюллетень «Чёрная металлургия». – 2013. – №12. – С. 61-64.

97. Липунов, Ю.И., Эйсмондт, К.Ю., Ярошенко, Ю.Г., Захарченко, М.В. (Старцева, М.В.), Некрасова, Е.В. Термоупрочнение рельсовой накладки струйным водяным охлаждением / Ю.И. Липунов, К.Ю. Эйсмондт, Ю.Г. Ярошенко, М.В. Захарченко (М.В. Старцева), Е.В. Некрасова // Сталь. – 2014. – №8. – С. 88-91.

98. ТУ 14-2Р-463-2011 «Производство накладок двухголовых для железнодорожных рельсов типов Р50 и Р65», 2011.- 10 с.

99. Калягин, В.Н., Темпалов, В.А., Абрамов, Э.В., Липунов, Ю.И.,. Эйсмондт, К.Ю, Захарченко, М.В. (Старцева, М.В.) Реализация проекта строительства линии по производству рельсовых накладок с применением для термообработки экологически чистых сред на Нижнесалдинском металлургическом заводе / В.Н. Каля-

гин, В.А. Темпалов, Э.В. Абрамов, Ю.И. Липунов, К.Ю. Эйсмондт, М.В. Захарченко (М.В. Старцева) // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений (по материалам заседания некоммерческого партнёрства «Рельсовая комиссия» 28-29.09.2011г.): сборник научных докладов. – Екатеринбург: ОАО «УИМ», 2012. – С. 218-224.

100. Эйсмондт, К.Ю., Липунов, Ю.И., Абрамов, Э.В., Захарченко, М.В. (Старцева, М.В.), Ярошенко, Ю.Г., Попов, Е.В., Дружинин, Г.М., Зобнин, В.А., Калягин, В.Н. Ввод в эксплуатацию линии по производству рельсовых накладок на Нижнесалдинском металлургическом заводе / К.Ю. Эйсмондт, Ю.И. Липунов, Э.В. Абрамов, М.В. Захарченко (М.В. Старцева), Ю.Г. Ярошенко, Е.В. Попов, Г.М. Дружинин, В.А. Зобнин, В.Н. Калягин // IX Конгресса прокатчиков: труды конференции (том I), 16-18 апреля 2013г. Череповец, 2013. – С. 112-115.

101.Коцарь, С.Л., Белянский, А.Д., Мухин, Ю.А. Технология листопрокатного производства / С.Л. Коцарь, А.Д. Белянский, Ю.А. Мухин, – М. : Металлургия. 1997. – 272 с.

Приложение А

К расчёту параметров конструкции устройства

Длина образующей поверхностей накладки для нижней поверхности составила 120 мм = 0,12 м, для верхней – 144 мм = 0,144 м. Выбираем минимальную и максимальную плотности орошения согласно данным таблицы 2.2 и рисунка 2.6.

Таким образом, если зона охлаждения покрывает всю длину накладки, равную 1 м, то для нижней поверхности получаем:

$$S_{ниж.пов} = 0{,}12 \cdot 1 = 0{,}12 м^2.$$

Минимальное значение расхода воды при этом:

$$\min G_{1н.п.} = 30 \cdot 0{,}12 = 3{,}6 м^3 / ч.$$

Максимальное значение расхода воды:

$$\max G_{1н.п.} = 130 \cdot 0{,}12 = 15{,}6 м^3 / ч.$$

Если зона охлаждения покрывает лишь ½ длины накладки, т.е 0,5 м, то имеем:

$$S_{ниж.пов} = 0{,}12 \cdot 0{,}5 = 0{,}06 м^2;$$

$$\min G_{1/2н.п.} = 30 \cdot 0{,}06 = 1{,}8 м^3 / ч.$$

$$\max G_{1/2н.п.} = 130 \cdot 0{,}06 = 7{,}8 м^3 / ч.$$

Проделав те же операции для верхней поверхности накладки, получаем следующие значения расходов воды:

$$\min G_{1в.п.} = 15 \cdot 0{,}144 = 2{,}16 м^3 / ч;$$

$$\max G_{1в.п.} = 60 \cdot 0{,}144 = 8{,}64 м^3 / ч;$$

$$\min G_{1/2н.п.} = 15 \cdot 0{,}072 = 1{,}1 м^3 / ч;$$

$$\max G_{1/2н.п.} = 60 \cdot 0{,}072 = 4{,}32 м^3 / ч.$$

Определим соотношение расходов верх/низ по выражению:

$$\frac{G_{н.п.}}{G_{в.п.}} = \frac{3{,}6}{2{,}16} = 1{,}67$$

Необходимо отметить, что окончательно соотношение расходов будет определено в ходе экспериментальных исследований с учётом соблюдения требований к прямолинейности накладок.

При минимальном расходе воды на половину нижней поверхности накладки $\min G_{1,2н.п.} = 1,8м^3/ч$ получим диаметр форсунок, рассчитанный по выражению (2.12):

$$d_{\min} = 0,8 \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot 1,8}{3,14 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 20}}} = 0,0063м = 6,3мм;$$

При максимальном расходе воды на половину нижней поверхности накладки $\max G_{1/2н.п.} = 7,8м^3/ч$ и распределении этого расхода на две форсунки имеем:

$$d_{\max} = \frac{0,8}{2} \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot 7,8}{3,14 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 20}}} = 0,0092м = 9,2мм.$$

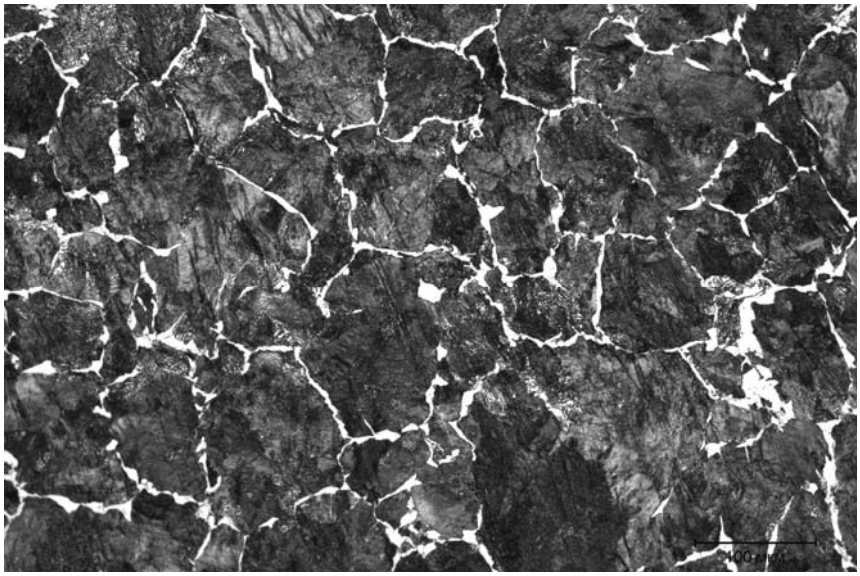
Приложение Б

Характеристики приборов измерительного комплекса

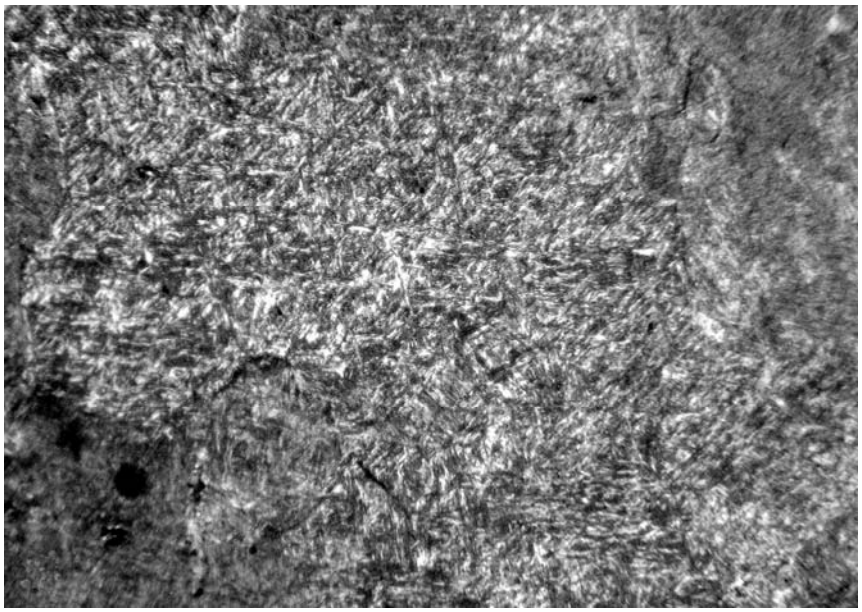
Параметр	Характеристики прибора			
	Тип	Пределы измерения	Класс точности	Инерционность, не более, с
Температура поверхности накладки	Термоскоп-100-СТ	300…1200 °С	1%	0,25
	Термоскоп-800-2С-ВТ0	700…1500 °С	0,75%	0,02
	Термокабель хромель-алюмель (ТХА)	0…1100 °С	1	-
Температура воды, воздуха	Термометр ртутный ТТ ТУ25-2021.010-89	-35…50 °С	2	-
Расход воды	Расходомер-счётчик электромагнитный «ВЗЛЁТ ЭР»	до 100 $м^3$	±0,5%	5
Давление воды	Манометр МП2-У	0...6 $кгс/см^2$	±2,5%	-
Скорость движения заготовки	Электродвигатель П21М	0…1350 об/мин	±2%	-
	Частотный преобразователь Delta	0…2,2 кВт	±0,5%	-

Приложение В

Микроструктуры нижней головки рельсовой накладки



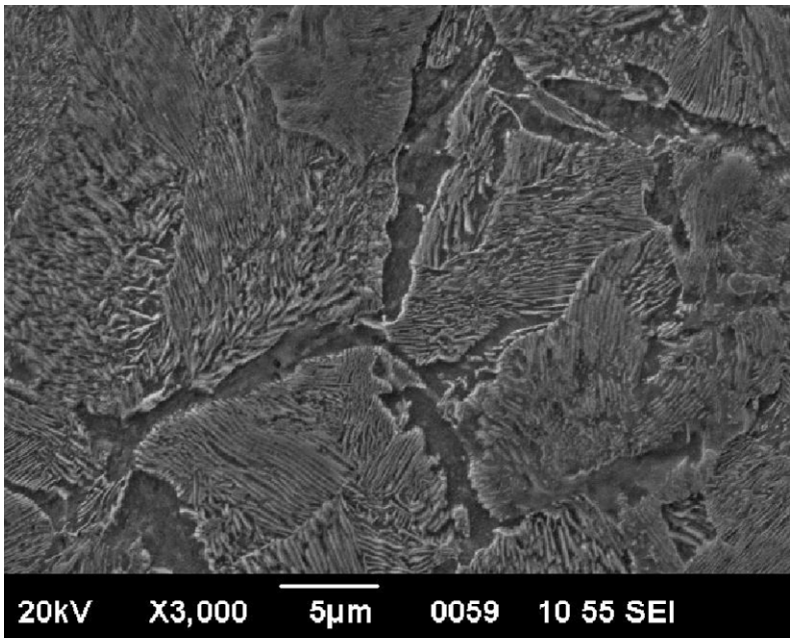
Микроструктура нижней головки рельсовой накладки в горячекатаном состоянии (х200): пластинчатый перлит и феррит, ориентированный по границам зерна.



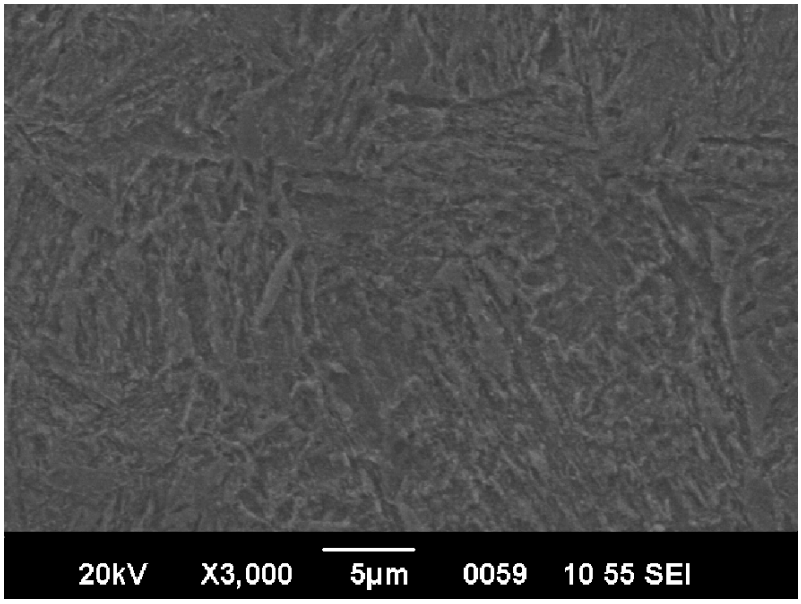
Микроструктура нижней головки рельсовой накладки после термоупрочнения в экспериментальном устройстве (х200): плотный сорбитообразный перлит с ферритной сеткой по границам зерна.

Приложение Г

Микроструктуры верхней головки рельсовой накладки после термоупрочнения в экспериментальном устройстве



Микроструктура середины верхней головки рельсовой накладки после термоупрочнения в экспериментальном устройстве (х3000): пластинчатый перлит и феррит по границе зерна, размер зерна около 10-15 мкм.



Микроструктура верхней головки рельсовой накладки на расстоянии 500 мкм от кромки после термоупрочнения в экспериментальном устройстве (х3000): дисперсный сорбит отпуска

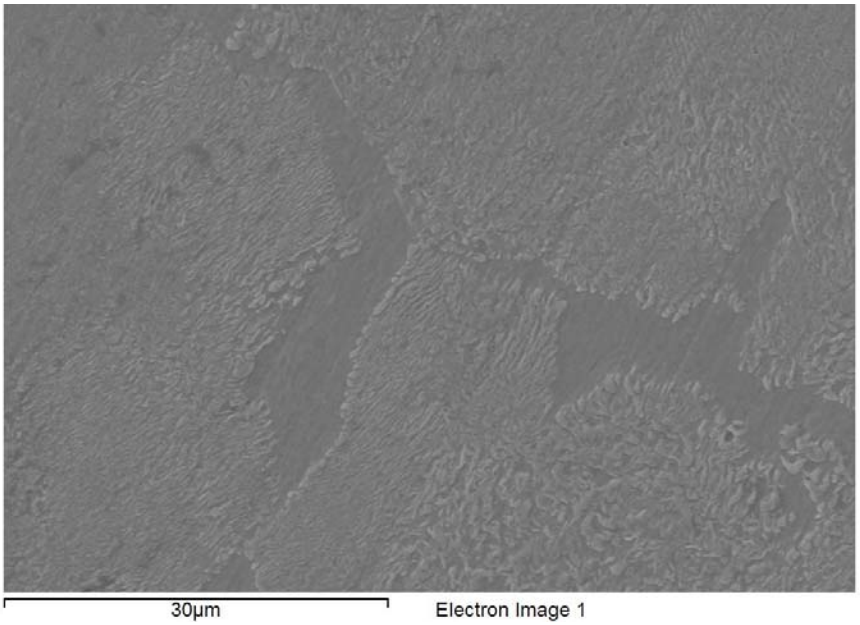
Приложение Д

Данные о метрологическом обеспечении исследований тепловых режимов УЗН

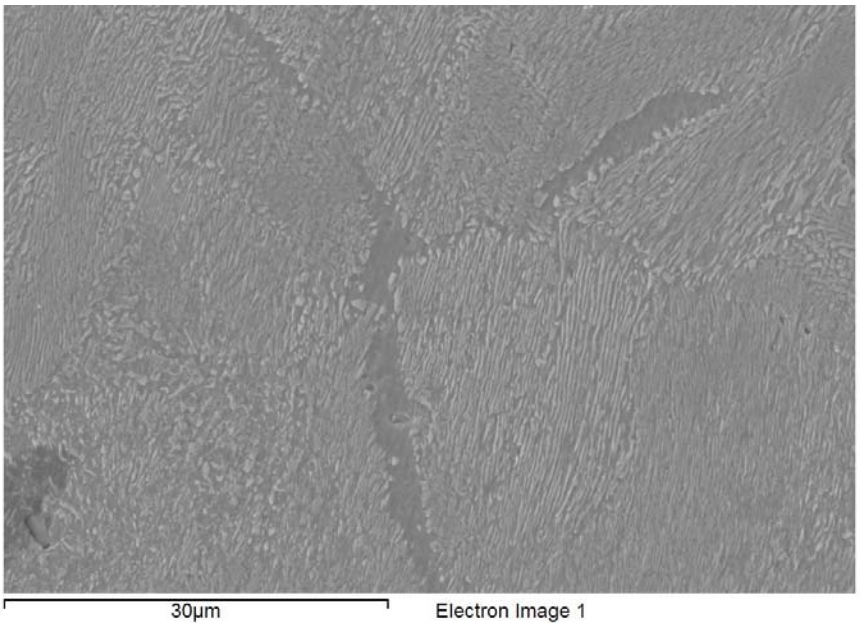
Параметр	Характеристики прибора			
	Тип	Пределы измерения	Класс точности	Инерционность, не более, с
Температура поверхности накладки	Термоскоп MIKRON M67	300…1200 ^{o}C	1%	0,5
	Термоскоп-200 СТ0	400…900 ^{o}C	1%	0,5
Температура воды, воздуха	Термометр сопротивления ТС	-50…+150	0,5%	30
Расход воды	Расходомер электромагнитный Взлет ПРОФИ 222	0,2…35 м^3/ч	±1,0%	-
Давление воды	Манометр	0...6 кгс/см^2	±2,5%	-
Скорость движения заготовки	АСУ электропривода рольгангов	0,05…0,26 м/с	±1,5%	-

Приложение Е

Микроструктуры шейки рельсовой накладки в горячекатаном состоянии



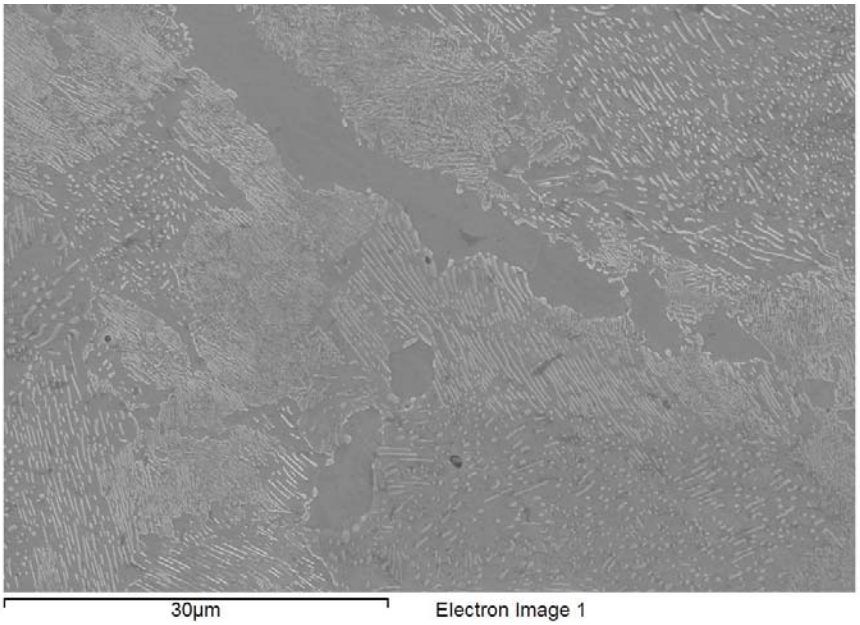
Микроструктура шейки образца %С=0,57 в горячекатаном состоянии (без термо-упрочнения) на расстоянии 500 мкм от края (х2000).



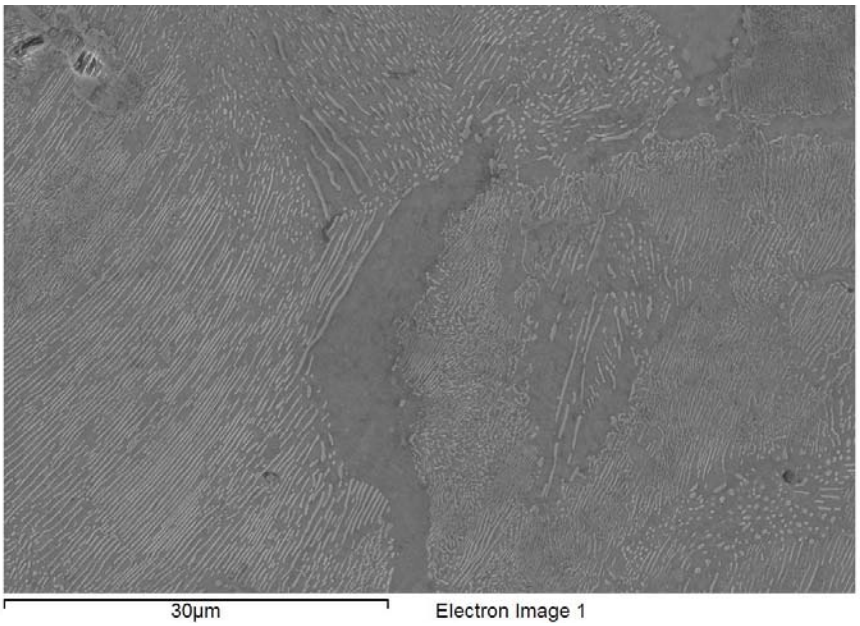
Микроструктура центра шейки образца %С=0,57 в горячекатаном состоянии (без термоупрочнения) (х2000).

Приложение Ж

Микроструктуры верхней головки рельсовой накладки (%С=0,57) после термоупрочнения в объёме масла



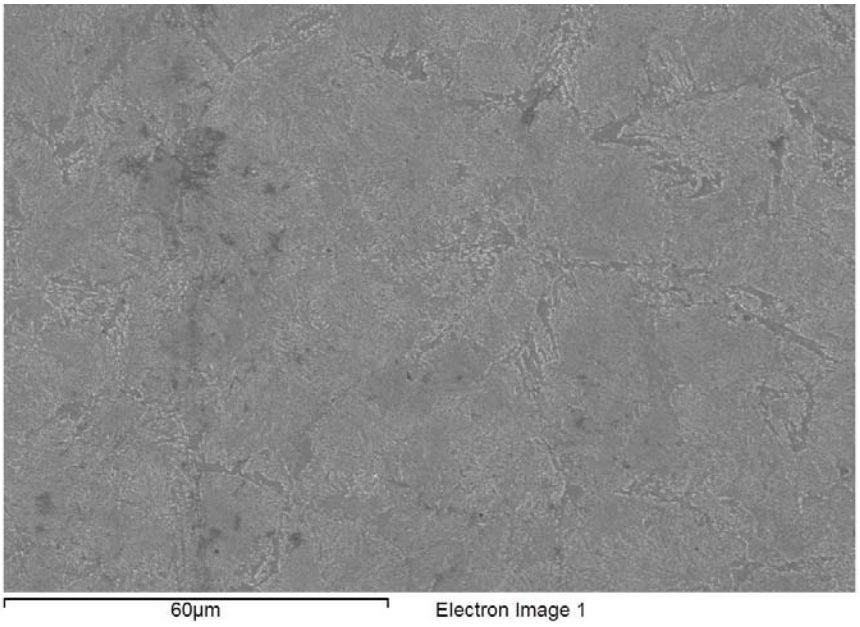
Микроструктура верхней головки образца %С=0,57 на расстоянии 500 мкм от края после охлаждения баке с маслом (х2000): $V_м$ = 3м^3; $t_м$ = 19 до 22 ^oC; $t_{нагр}$ = 810-820 ^oC.



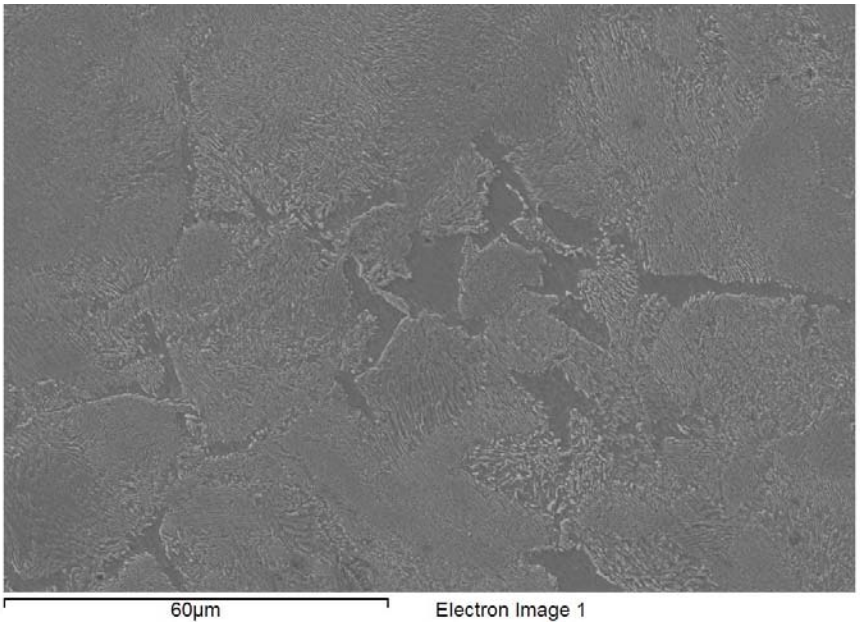
Микроструктура центра верхней головки образца %С=0,57 после охлаждения баке с маслом (х2000): $V_м$ = 3м^3; $t_м$ = 19 до 22 ^oC; $t_{нагр}$ = 810-820 ^oC.

Приложение И

Микроструктура верхней головки рельсовой накладки (%С=0,57) после охлаждения в УЗН (х1000)



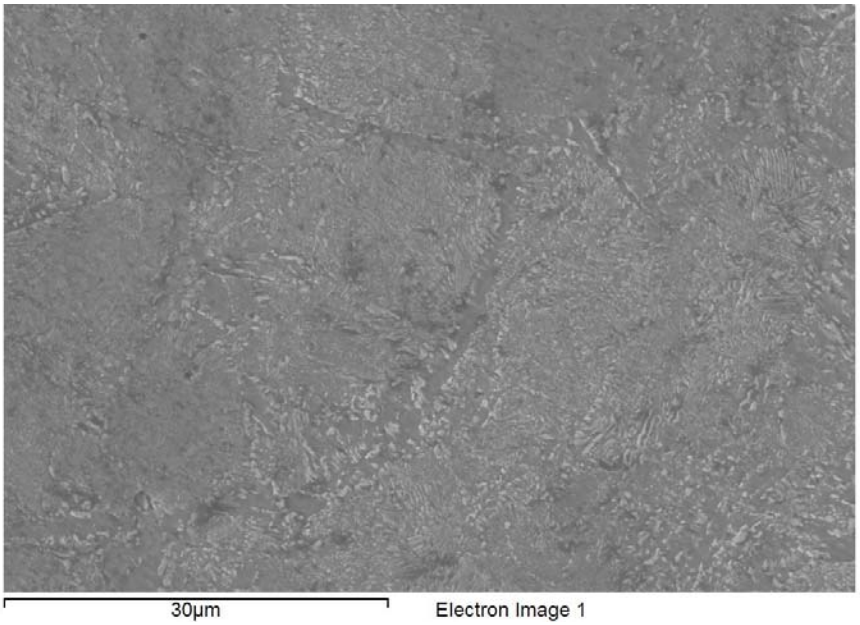
Микроструктура верхней головки образца %С=0,57 на расстоянии 500 мкм от края после охлаждения в промышленном устройстве закалки рельсовых накладок УЗН (х1000).



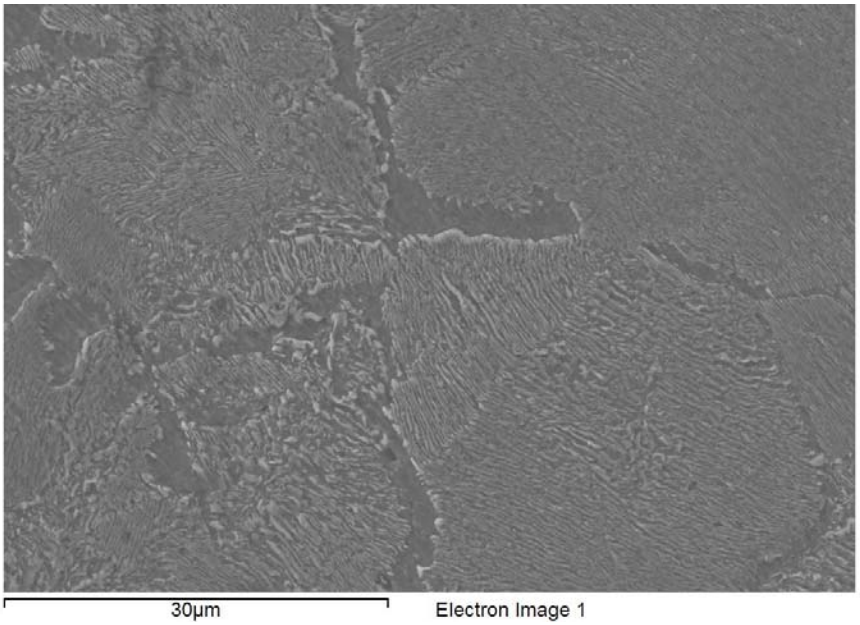
Микроструктура центра верхней головки образца %С=0,57 после охлаждения в промышленном устройстве закалки рельсовых накладок УЗН (х1000).

Приложение К

Микроструктура верхней головки рельсовой накладки (%С=0,57) после охлаждения в УЗН (х2000)



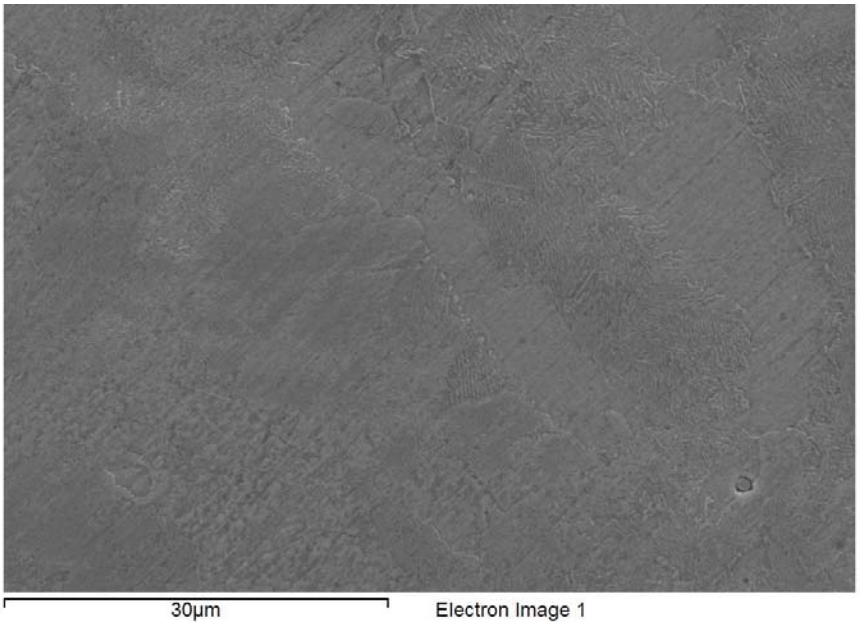
Микроструктура верхней головки образца %С=0,57 на расстоянии 500 мкм от края после охлаждения в промышленном устройстве закалки рельсовых накладок УЗН (х2000).



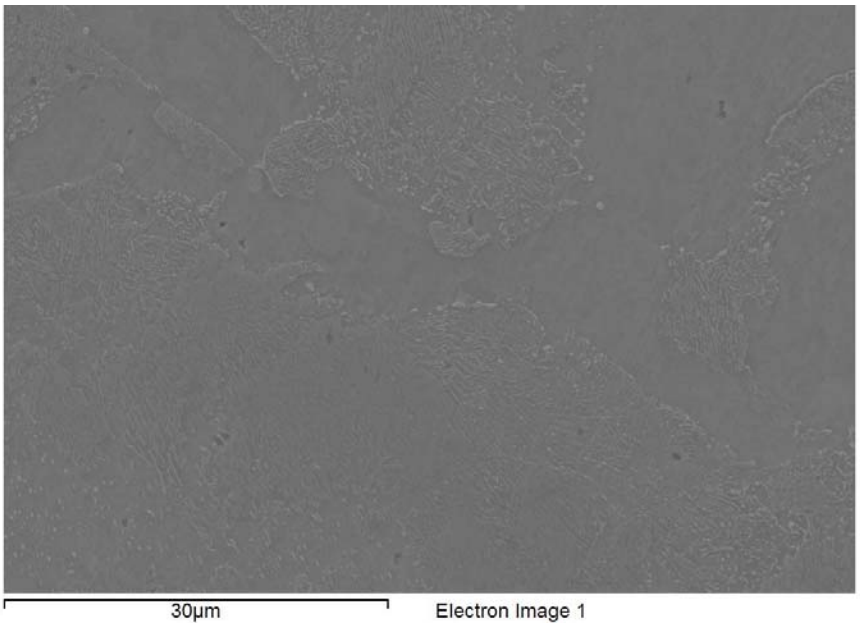
Микроструктура центра верхней головки образца %С=0,57 после охлаждения в промышленном устройстве закалки рельсовых накладок УЗН (х2000).

Приложение Л

Микроструктуры верхней головки рельсовой накладки (%С=0,485) после термоупрочнения в объёме масла



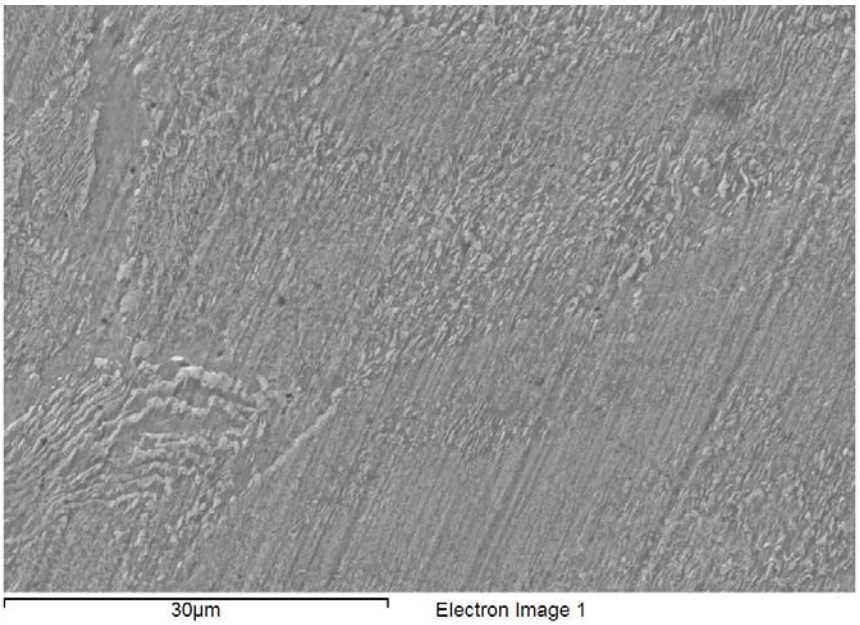
Микроструктура верхней головки образца %С=0,485 на расстоянии 500 мкм от края после охлаждения баке с маслом (х2000): $V_м$ = 3м^3; $t_м$ = 19 до 22 ^oC; $t_{нагр}$ = 810-820 ^oC.



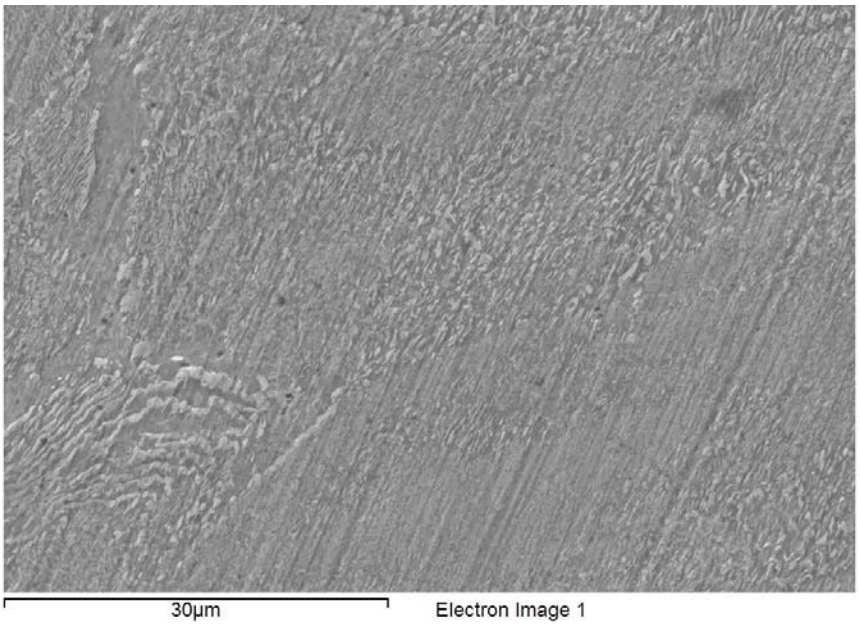
Микроструктура центра верхней головки образца %С=0,485 после охлаждения баке с маслом (х2000): $V_м$ = 3м^3; $t_м$ = 19 до 22 ^oC; $t_{нагр}$ = 810-820 ^oC.

Приложение М

Микроструктура верхней головки рельсовой накладки (%С=0,50) после охлаждения в УЗН (х2000)



Микроструктура верхней головки образца %С=0,50 на расстоянии 500 мкм от края после охлаждения в промышленном устройстве закалки рельсовых накладок УЗН (х2000).



Микроструктура центра верхней головки образца %С=0,50 после охлаждения в промышленном устройстве закалки рельсовых накладок УЗН (х2000).