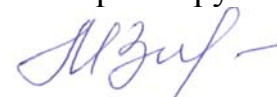


На правах рукописи



**ЗАХАРЧЕНКО Мария Владимировна**

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

05.16.02 – Metallургия чёрных, цветных и редких металлов

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2014

Работа выполнена на кафедре «Теплофизика и информатика в металлургии» ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина» и в ОАО «Научно-исследовательский институт металлургической теплотехники» - ОАО «ВНИИМТ»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,  
Заслуженный деятель науки и техники РФ  
**Ярошенко Юрий Гаврилович**

Официальные оппоненты: **Торопов Евгений Васильевич**,  
доктор технических наук, профессор,  
Заслуженный деятель науки и техники РФ,  
ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский  
государственный университет (национальный  
исследовательский университет)», профессор  
кафедры «Промышленная теплоэнергетика»;

**Сеничкин Борис Кронидович**,  
кандидат технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВПО «Магнитогорский  
государственный технический университет  
имени Г.И.Носова», доцент кафедры  
«Теплотехнические и энергетические системы»

Ведущая организация: ОАО «Уральский институт металлов»,  
г. Екатеринбург.

Защита состоится 26 декабря 2014 г. в 15:00 ч на заседании диссертационного совета Д 212.285.05 на базе ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, И-420 (Зал учёного совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <http://dissovet.science.urfu.ru/news2/>

Автореферат разослан «10» ноября 2014 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета



Сулицин Андрей Владимирович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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. В соответствии с ГОСТ 4133-73 рельсовые накладки подвергаются 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 управления скоростью охлаждения за счёт изменения плотности орошения  $\omega$  позволяет получить требуемую структуру металла, а, следовательно, стабильные значения механических свойств и служебных характеристик, что недостижимо для изделий, закаливаемых 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: прутки, толстый лист и др., а также опробованы для изделий сложной формы – рельсовая подкладка, головка рельса, насосная штанга. Таким образом, разработка тепловых режимов (технологии) ускоренного охлаждения рельсовой накладки и конструкции охлаждающего устройства является актуальной задачей.

**Цель работы.** Разработка технологии и конструктивных параметров работы устройства ускоренного струйного водяного 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:**

1. Провести математическое моделирование процесса охлаждения рельсовой накладки как в баке с маслом, так и струями воды с учётом 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 динамики температуры поверхности накладки от режимных параметров работы устройства, для адаптации математической модели, определения режимов работы устройства, при которых достигаются требования к механическим свойствам и прямолинейности накладки, для уточнения конструктивных параметров устройства.

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

5. На основе экспериментальных данных охлаждения накладки в промышленном устройстве адаптировать математическую модель для расчёта процесса струйного водяного охлаждения несимметричных изделий с разномассивными элементами.

Для решения 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 охлаждения накладки на промышленном устройстве, смонтированном на участке производства накладок

цеха рельсовых скреплений филиала ОАО «ЕВРАЗ НТМК» - Нижнесалдинский металлургический завод.

5. Получены экспериментальные данные, на основании которых была адаптирована математическая модель охлаждения накладки струями воды.

#### **Научная новизна**

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

2. Определены конструктивные характеристики и технологические параметры устройства охлаждения, установлены соотношения расходов на поверхности элементов рельсовой накладки (верхняя, нижняя, боковая поверхности) разной массивности, при которых обеспечиваются прямолинейность изделия и требуемые механические свойства.

3. Получены зависимости плотности теплового потока от плотности орошения при струйном водяном охлаждении рельсовой накладки для адаптации математической модели.

#### **Практическая значимость**

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

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

3. Математическая модель адаптирована для расчёта струйного водяного охлаждения тела несимметричного профиля с разномассивными элементами и может быть использована для прогнозного расчёта конструкции устройства ускоренного охлаждения фасонного проката.

#### **На защиту диссертации выносятся следующие положения:**

1. Результаты математического моделирования процесса охлаждения накладки как в масляном баке, так и струями воды.

2. Конструкция устройства струйного водяного охлаждения и технология охлаждения в нём, обеспечивающие получение требуемых механических свойств и прямолинейность рельсовой накладки.

3. Аналитические зависимости плотности теплового потока от плотности орошения в промышленном устройстве струйного водяного охлаждения рельсовой накладки.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались: на XVI Уральской международной конференции молодых учёных. Секция «Металлургия» (Екатеринбург, 2009 г.); I Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве» (Екатеринбург, 2012 г.); на IX Конгрессе прокатчиков (Череповец,

2013 г.); II Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных с международным участием «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве» (Екатеринбург, 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» (Екатеринбург, 2013 г.); the first International Conference «Energy Production and Management in the 21<sup>st</sup> Century – the Quest for Sustainable Energy» (Yekaterinburg, 2014); международной научно-практической конференции «Творческое наследие В.Е. Грум-Гржимайло» (Екатеринбург, 2014 г.).

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

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, списка литературы, включающего 101 наименование, и 11 приложений, содержит 136 страниц, 49 рисунков и 24 таблицы по тексту, 17 формул.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснованы актуальность темы, цели и задачи исследования, научная новизна, теоретическая, практическая значимость, методология исследования и сведения о реализации в промышленности.

В **первой главе** приведён анализ данных из литературных источников о способах термоупрочнения рельсовых накладок, в том числе по опыту и требованиям нормативной документации разных стран. Рассмотрен традиционный способ термоупрочнения проката – закалка в объёме масла. Показано, что масло является экологически небезопасной закалочной средой, и для обслуживания данного процесса требуется вспомогательный участок. Кроме того, закалка в объёме охладителя любого типа является процессом неуправляемым с точки зрения отвода тепла от элементов изделия разной массивности, поэтому затруднительно в промышленных условиях обеспечить требования к прямолинейности готового продукта. Разная скорость остывания разномассивных элементов сложного профиля обуславливает 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.

Приведён обзор различных закалочных сред, используемых для закалки рельсовых накладок. Сделан вывод, что получаемые механические свойства существенно зависят и от параметров закалочной среды: её температуры, вязкости, количества циклов термообработки.

На основании представленной информации сделан вывод, что наиболее перспективным, управляемым и экологичным для термоупрочнения разномассивного проката сложного профиля является дифференцированное охлаждение. В этой связи задача разработки технологии дифференцированного

ускоренного охлаждения накладки и устройства для её реализации является актуальной. Целью представленной работы являлась разработка устройства и технологии ускоренного охлаждения струями воды, а именно, определение конструктивных параметров и тепловых режимов работы устройства ускоренного водяного охлаждения, при которых обеспечиваются требуемые механические свойства и прямолинейность рельсовой накладки.

**Вторая глава** содержит подробное описание принципов математического и физического моделирования процесса ускоренного водяного охлаждения рельсовой накладки, на основе которых были определены основные параметры конструкции экспериментального устройства и проведено экспериментальное исследование охлаждения накладки.

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:

$$\rho(t) \cdot c(t) \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda(t) \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda(t) \frac{\partial t}{\partial y} \right) \quad (1)$$

где  $t$  – температура изделия;  
 $c(t), \lambda(t)$  – удельная теплоёмкость и теплопроводность изделия;  
 $\rho(t)$  – плотность изделия;  
 $x, y$  – координаты в поперечном сечении изделия;  
 $\tau$  – время охлаждения.

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 котором решение уравнения (1) производится с применением явной схемы конечно-разностной аппроксимации с учётом зависимости теплофизических свойств материала от температуры. Исходные данные для расчёта задаются в виде графического изображения сечения тела и точек расчёта, в качестве начальных условий задаётся распределение температуры по сечению изделия, а граничные условия выбираются в зависимости вида теплообмена на его поверхности.

Решение уравнения (1) для случая охлаждения накладки в баке с маслом производилось с использованием начального условия (2) и граничных условий третьего рода (закон Ньютона-Рихмана):

Начальное условие:

$$T(\tau_0) = T_{нач} = \text{const}, \quad (2)$$

Граничное условие:

$$\begin{cases} \lambda(t) \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha(t) \cdot (t_{нов} - t_{окр.сп.}) \\ \lambda(t) \frac{\partial t}{\partial y} \Big|_{y=0} = \alpha(t) \cdot (t_{нов} - t_{окр.сп.}) \end{cases} \quad (3)$$

где  $t_{нов}, t_{окр.сп.}$  — температура поверхности изделия и окружающей среды соответственно;

$\lambda(t)$  — удельная теплопроводность материала изделия;  
 $\alpha(t)$  — коэффициент конвективной теплоотдачи;  
 $x, y$  — координаты в поперечном сечении изделия

При расчётном моделировании ускоренного водяного охлаждения были заданы начальные (2) и граничные условия:

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

$$\begin{cases} \lambda(t) \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha(t_{нов} - t_{окр.сп.}) + \varepsilon_m c_0 \left[ \left( \frac{T_{нов}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{окр.сп.}}{100} \right)^4 \right] \\ \lambda(t) \frac{\partial t}{\partial y} \Big|_{y=0} = \alpha(t_{нов} - t_{окр.сп.}) + \varepsilon_m c_0 \left[ \left( \frac{T_{нов}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{окр.сп.}}{100} \right)^4 \right] \end{cases} \quad (4)$$

где  $t_{нов}, t_{окр.сп.}, T_{нов}, T_{окр.сп.}$  — температура поверхности изделия и окружающей среды соответственно;

$\lambda(t)$  — удельная теплопроводность материала изделия;  
 $\alpha$  — коэффициент конвективной теплоотдачи;  
 $x, y$  — координаты в поперечном сечении изделия;  
 $\varepsilon_m$  — принятая степень черноты;  
 $c_0$  — коэффициент излучения абсолютно чёрного тела.

- второго рода при  $t_{п} > 100$  °С и третьего рода при  $t_{п} < 100$  °С (охлаждение струями воды):

$$\begin{cases} \lambda(t) \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=0} = \begin{cases} q \text{ при } t_{нов} \geq 100^\circ \text{C} \\ \alpha(t_{нов} - t_{окр.сп.}) \text{ при } t_{нов} < 100^\circ \text{C} \end{cases} \\ \lambda(t) \frac{\partial t}{\partial y} \Big|_{y=0} = \begin{cases} q \text{ при } t_{нов} \geq 100^\circ \text{C} \\ \alpha(t_{нов} - t_{окр.сп.}) \text{ при } t_{нов} < 100^\circ \text{C} \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

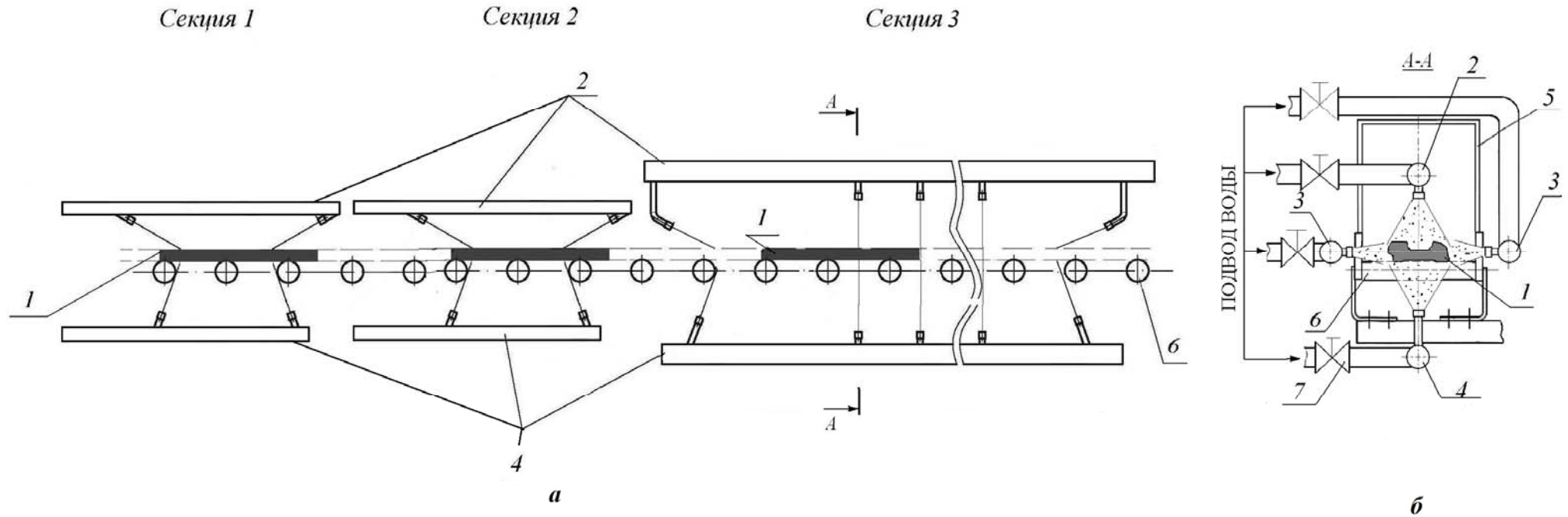
где  $t_{нов}, t_{окр.сп.}$  — температура поверхности тела и окружающей среды соответственно;

$\lambda(t)$  — удельная теплопроводность материала изделия;  
 $q$  — плотность теплового потока;  
 $\alpha$  — коэффициент конвективной теплоотдачи;  
 $x, y$  — координаты в поперечном сечении изделия.

При задании граничных условий (5) использовали аналитические зависимости удельного теплового потока от плотности орошения водой, полученные экспериментально в промышленных условиях на устройствах контролируемого охлаждения разного типа: в частности для верхней поверхности толстого листа  $q = 0,054 \cdot \omega + 0,0799$ , где  $\omega$  - плотность орошения водой,  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ .

По результатам расчётного моделирования была предложена конструкция устройства, состоящая из трёх секций, между которыми организовано два воздушных промежутка (рисунок 1).





*a* – 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 1 – Схема устройства ускоренного струйного охлаждения рельсовых накладок

Такая конструкция позволяла осуществлять охлаждение накладки с различными скоростями, тем самым обеспечивала возможность изучить широкий диапазон режимов охлаждения и выбрать наиболее подходящий. Было предложено использовать форсунки с плоским факелом, установленные перпендикулярно к поверхности накладки с четырёх сторон. Плоский факел позволял избежать возникновения «паровой рубашки» на поверхности накладки. Кроме того, регулируя плотность орошения, можно было управлять процессом охлаждения, следовательно, влиять на прямолинейность готового изделия, к чему предъявляются требования действующей нормативной документацией. Полученные расчётные данные в первом приближении позволили оценить расходы воды будущего устройства для верхней и нижней поверхностей накладки. Расчётное время охлаждения позволило определить длину устройства в 2,5-2,7 м. Общее количество форсунок для верхней поверхности составило 9 шт., столько же потребовалось для нижней и боковых поверхностей накладки.

Для проведения экспериментальных исследований по охлаждению рельсовой накладки струями воды на стенде ОАО «ВНИИМТ» была смонтирована установка с устройством ускоренного водяного охлаждения.

Первая и вторая секции высокоинтенсивного охлаждения обуславливали получение структуры накладки, третья секция низкоинтенсивного охлаждения позволяла минимизировать напряжения в теле накладки.

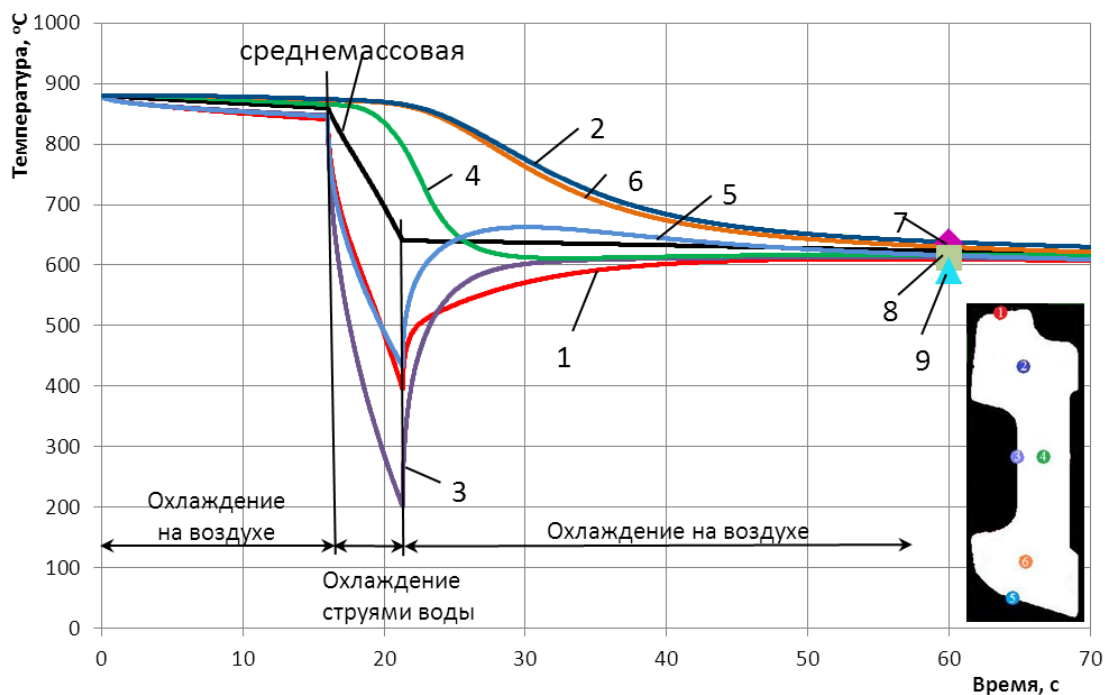
В процессе исследований было проведено два вида экспериментов: теплотехнические и технологические. Теплотехнические эксперименты были выполнены с целью проведения адаптации математической модели, определения фактических значений плотностей тепловых потоков по секциям при различной ориентации поверхности накладки и расходах воды, определения режимов работы системы охлаждения, обеспечивающих одинаковую температуру разномассивных элементов после окончания ускоренного охлаждения.

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 одной секции.

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.

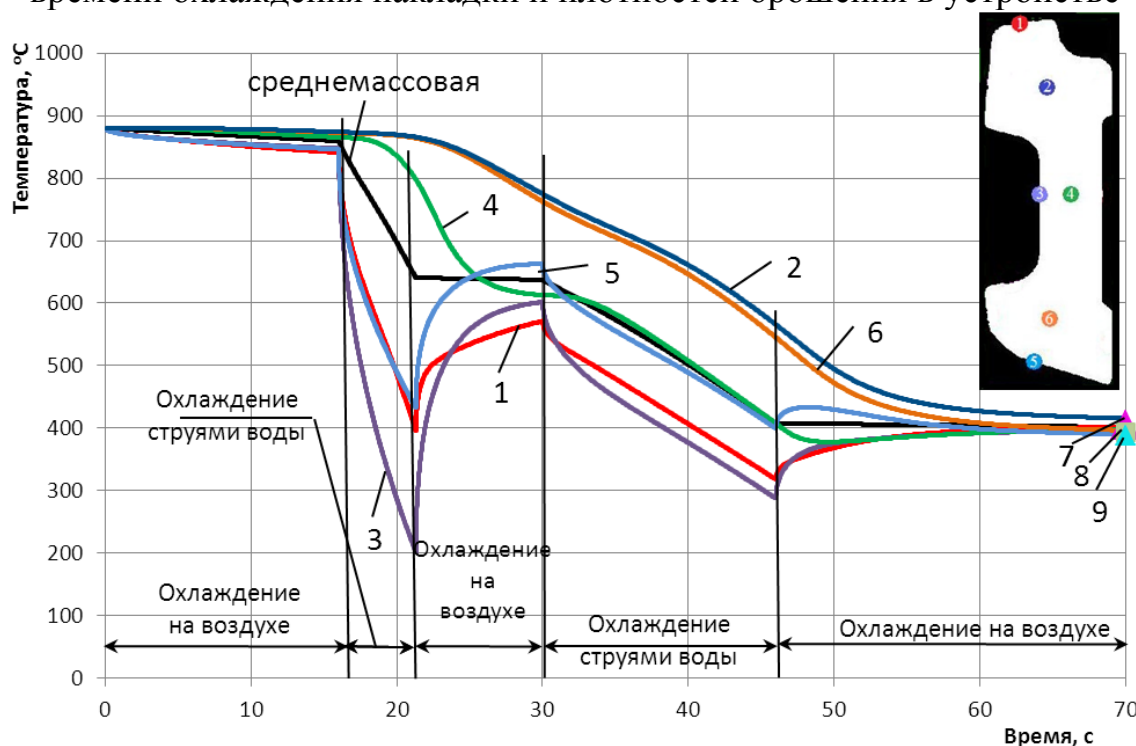
Таким образом, задаваемое в программный модуль значение плотности теплового потока должно было обеспечивать получение температур разных элементов накладки, соответствующих эксперименту (граничное условие второго рода (5)).

Расчётное изменение температуры разных точек накладки во времени при охлаждении в одной секции с наложением средних значений температуры, полученных в эксперименте, приведено на рисунке 2. На рисунке 3 представлено расчётное изменение температуры накладки по сечению, а также представлены средние значения экспериментальных данных для случая охлаждения в двух секциях устройства (№2 и №3) с учётом плотностей тепловых потоков, полученных при расчёте охлаждения в одной секции (рисунок 2).



1-6 - номер кривой, соответствующий номеру расчётной точки; 7-9 – среднее экспериментальное значение температур верхней головки, шейки и нижней головки соответственно

Рисунок 2- 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 экспериментальное значение температур верхней головки, шейки и нижней головки соответственно

Рисунок 3 - 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

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, т.е. плотностью орошения, и температурой конца охлаждения. В качестве параметра регулирования температуры конца охлаждения была выбрана скорость прохождения накладки через устройство, что позволило сделать процесс достаточно легко управляемым.

Эксперименты показали, что использование струйного водяного охлаждения обеспечило требования к механическим свойствам накладки и при определённом соотношении расходов – к прямолинейности.

В **третьей главе** приведены результаты внедрения ускоренного струйного водяного охлаждения рельсовой накладки в промышленных условиях филиала предприятия ОАО «ЕВРАЗ НТМК» НСМЗ.

Для реализации 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»

Опробованная в стендовых условиях конструкция системы охлаждения послужила аналогом промышленного устройства закалки накладок (УЗН). Промышленное устройство также состоит из трёх секций, единственным отличием стала бóльшая длина секции №3. На каждый коллектор каждой секции УЗН организован отдельный подвод воды, что позволяет обеспечивать разные условия охлаждения для разномассивных элементов накладки (головки-шейка), следовательно, сделать процесс управляемым. Подача воды, как и в устройстве на стенде, осуществляется в плоскости, перпендикулярной направлению движения накладки, с четырёх сторон через плоскоструйные форсунки ВНИИМТ специальной конструкции. Устройство позволяет обрабатывать накладки всех типов без замены или перемещения элементов системы охлаждения. Регулирование процессом термоупрочнения накладки производится по температуре конца охлаждения её в устройстве и изменением плотности орошения в секциях.

Критерием выбора технологических режимов работы промышленного устройства является соответствие значений механических свойств термообработанных накладок из разных марок сталей, поставляемых предприятию, требованиям нормативных документов. Первоначально технология охлаждения, т.е. расходы воды по секциям, их соотношения и скорость транспортировки накладки выбиралась с учётом данных, полученных при стендовых 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 рассчитывать значения плотностей тепловых потоков для соответствующих поверхностей накладки – верхней, нижней, боковых. Известные расходы воды на каждую секцию позволили найти плотность орошения разных поверхностей накладки в устройстве по выражению:

$$\omega = \frac{G_{в.п.}}{b_{в.п.} \cdot l_{з.охл}}, \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}) \quad (6)$$

где  $G_{в.п.}$  – расход воды на верхнюю поверхность накладки в 1,2 или 3 секции УЗН,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;

$b_{в.п.}$  – ширина верхней поверхности по образующей, на которую приходится расход воды  $G_{в.п.}$ , м;

$l_{з.охл}$  – длина зоны охлаждения накладки, м.

Таким же образом была рассчитана плотность орошения 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 теплового потока от плотности орошения для соответствующей поверхности. На рисунках 4 и 5 представлены полученные данные и линия линейного тренда. Отклонение линии тренда от экспериментальных данных составило не более 5-7%.

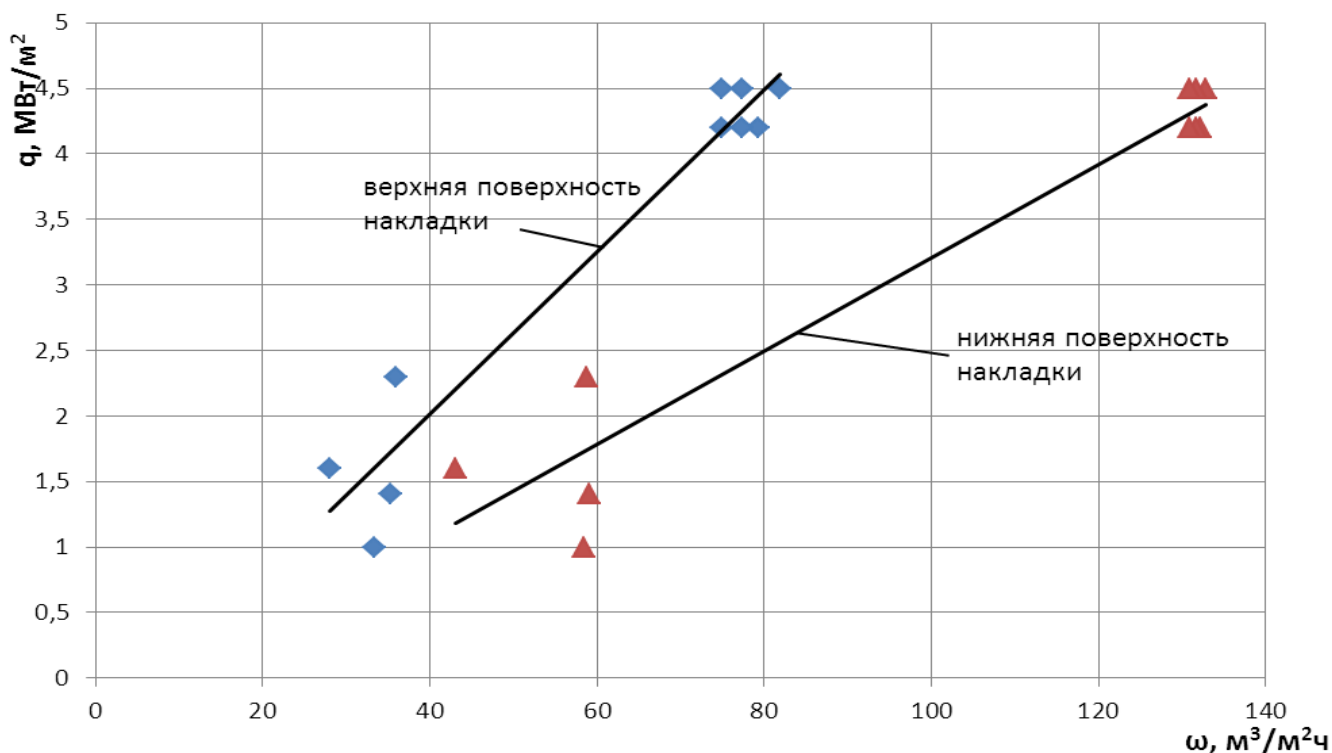


Рисунок 4 – Аналитическая зависимость плотностей тепловых потоков от плотностей орошения, полученная по экспериментальным данным для верхней и нижней поверхностей накладки

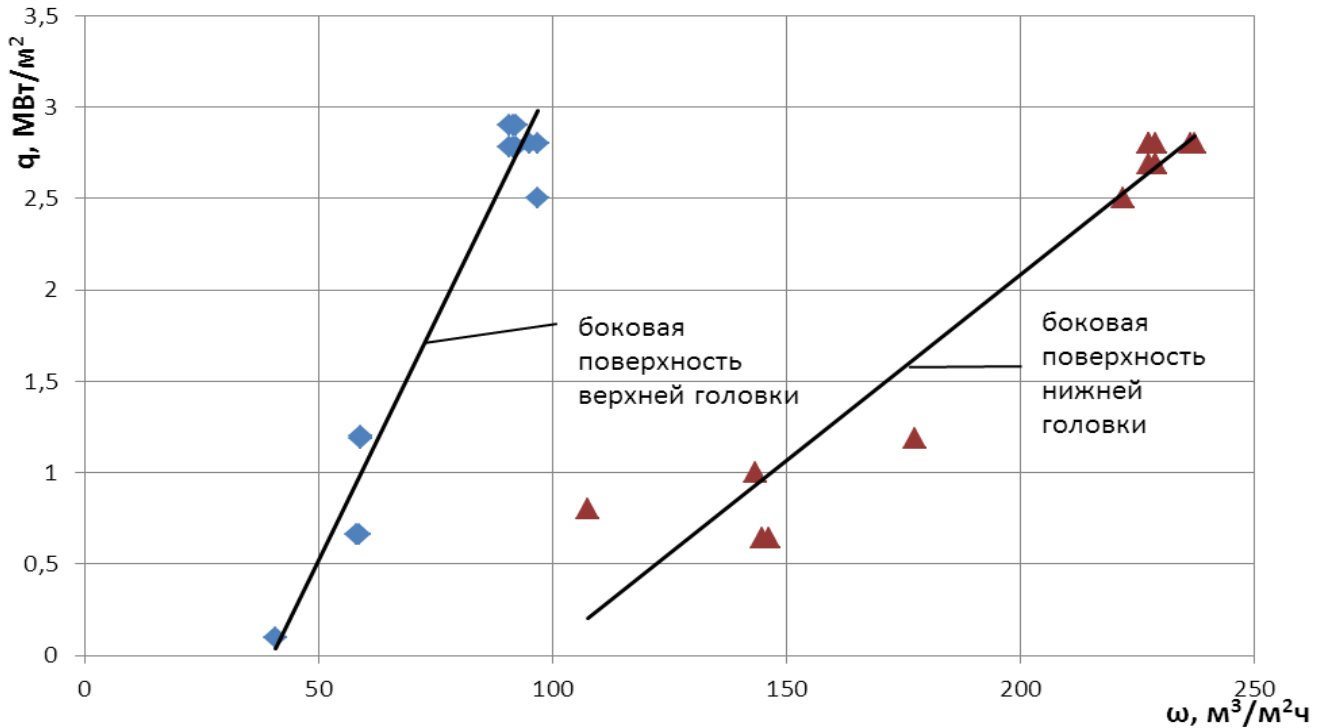


Рисунок 5 – Аналитическая зависимость плотностей тепловых потоков от плотностей орошения, полученная по экспериментальным данным для боковых поверхностей накладки

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

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 «Нижнетагильского 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 условиях стенда. Установлено, что с увеличением температуры конца охлаждения прочностные свойства накладки снижаются, а пластические, напротив, возрастают (рисунки 6 и 7). Наиболее высокое сочетание пластических и прочностных свойств наблюдается при пересечении линий тренда этих двух характеристик.

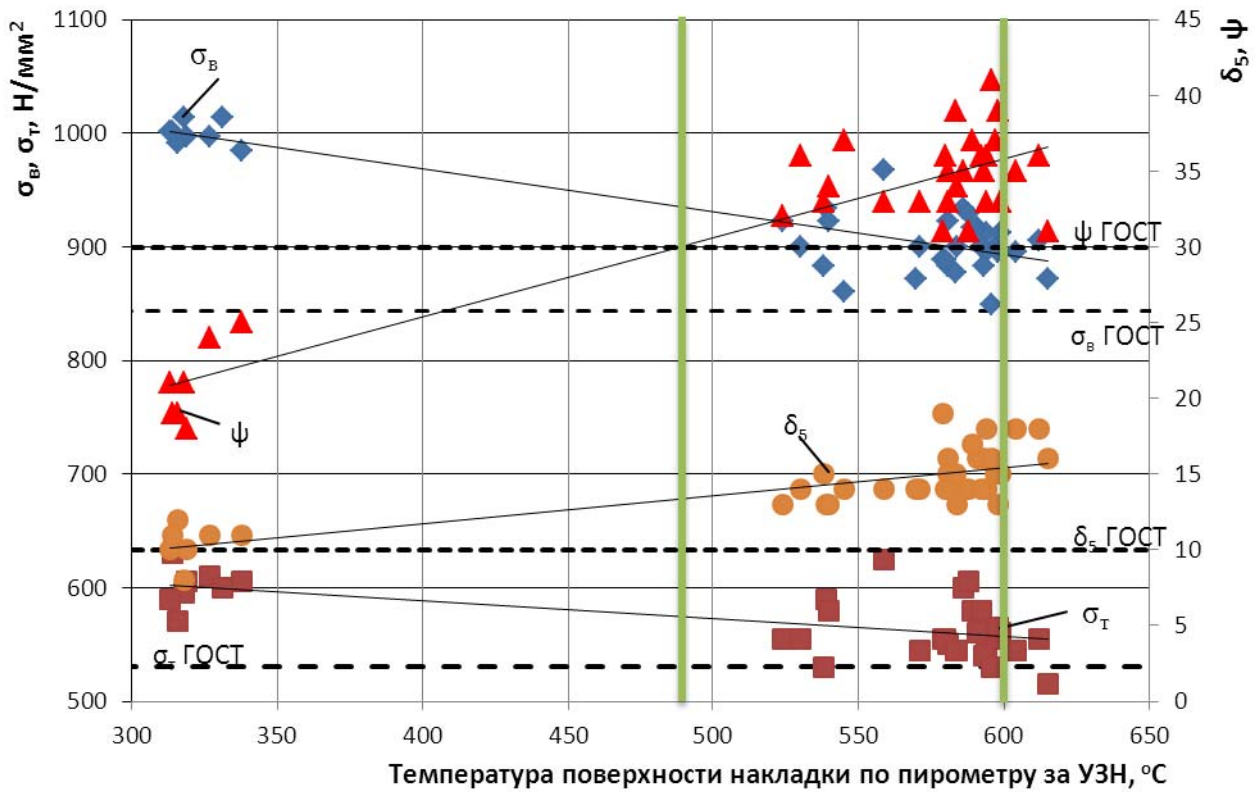


Рисунок 6 – Зависимость прочностных и пластических свойств рельсовой накладки от температуры конца охлаждения поверхности накладки с содержанием углерода 0,560-0,570%

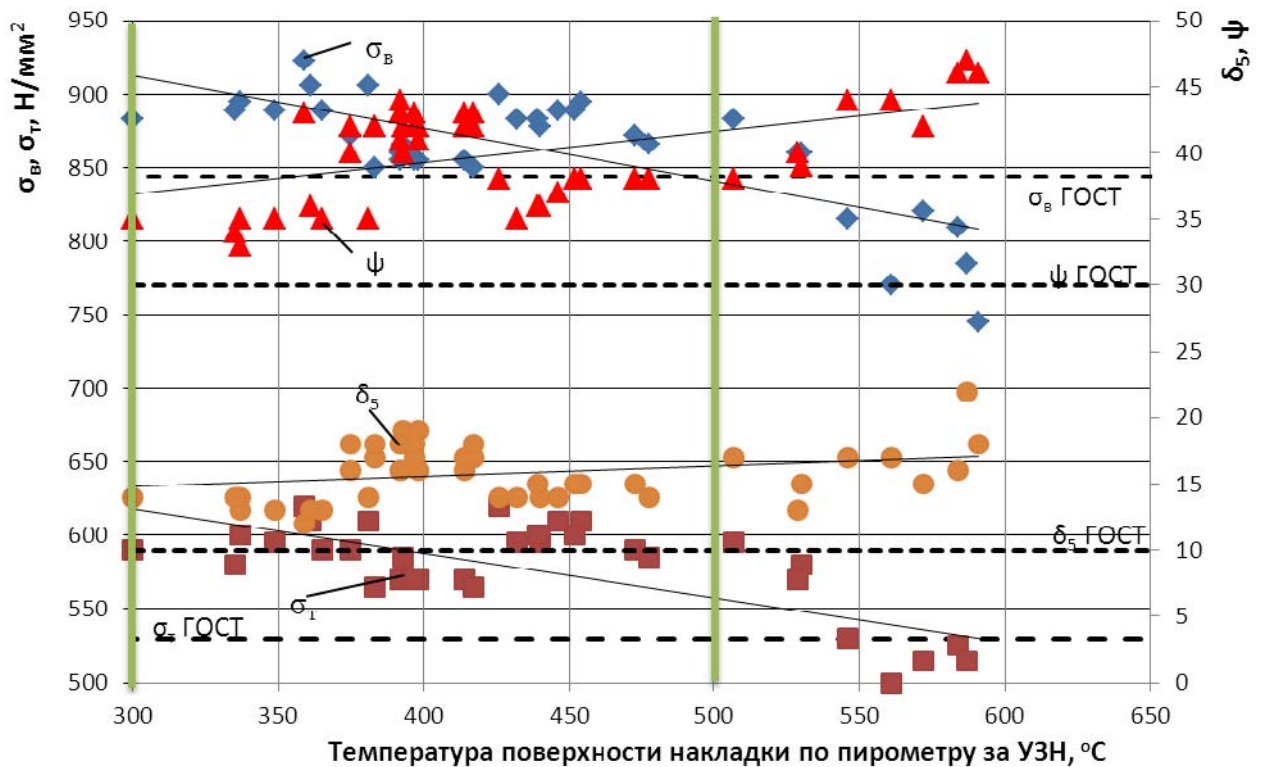


Рисунок 7 – Зависимость прочностных и пластических свойств рельсовой накладки от температуры конца охлаждения поверхности накладки с содержанием углерода 0,485%



Для металла с содержанием углерода 0,560-0,570% диапазон температур конца охлаждения, при которых механические свойства удовлетворяют требованиям ТУ, находится в пределах 480-600°C (рисунок 6), для металла с содержанием углерода 0,485% эти пределы составляют 300-500°C (рисунок 7), причём верхнее значение ограничивается требованиями твёрдости по Бринеллю. Таким образом, чтобы достичь требуемых значений механических свойств с увеличением содержания углерода, необходимо увеличивать температуру конца охлаждения накладки в устройстве. На сегодняшний день определены режимы работы устройства для металла различного химического состава, на которых подтверждена повторяемость результатов по механическим характеристикам, соответствующим требованиям нормативной документации.

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  $\frac{G_n}{G_6} = 1,4$  и  $\frac{G_{н.г.}}{G_{6.г.}} = 2,0$ . 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 одинаковы. Данный вывод был сделан ещё в процессе стендовых экспериментов и нашёл своё подтверждение в промышленных условиях.

## 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 управляемость процессом охлаждения проката несимметричного профиля можно обеспечить 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 технологии 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 внедрена технология ускоренного струйного водяного охлаждения взамен традиционной – 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 теплового потока от плотности орошения для каждой поверхности элемента накладки с различным химическим 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 ускоренного струйного водяного охлаждения подтвердил достоинства этой технологии 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.

**Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:**

**Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК:**

1. Захарченко, М.В. (Старцева, М.В.) 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 (0,3 п.л. / 0,15 п.л.).

2. Zakharchenko, M.V. (Startseva, M.V.) Developing a modern thermal strengthening technique for regulated fishplate cooling / Y.G. Yaroshenko, Y.I. Lipunov, M.V. Zakharchenko (M.V. Startseva), K.Y. Eysmond, E.V. Nekrasova, G.G. Trayanov // Energy Production and Management in the 21<sup>st</sup> Century. The Quest for Sustainable Energy. – 2014. – Volume 1. – pp .491-501 (0,6 п.л. / 0,3 п.л.).

3. Захарченко, М.В. (Старцева, М.В.) Термоупрочнение рельсовой накладки струйным водяным охлаждением / Ю.И. Липунов, К.Ю. Эйсмонт, Ю.Г. Ярошенко, М.В. Захарченко (М.В. Старцева), Е.В. Некрасова // Сталь. – 2014. – №8. – С. 88-91 (0,2 п.л. / 0,1 п.л.).

**Другие публикации:**

4. Захарченко, М.В. (Старцева, М.В.) Охлаждение в баке как один из способов закалки металлов и их сплавов / М.В. Захарченко (М.В. Старцева), К.Ю. Эйсмонт, Ю.И. Липунов, Ю.Г. Ярошенко // XVI Уральская международная конференция молодых ученых (секция «Металлургия»): сборник трудов. Екатеринбург, 2009. – С. 128-132 (0,25 п.л. / 0,125 п.л.).

5. Захарченко, М.В. (Старцева, М.В.) Исследование процесса охлаждения рельсов на воздухе / М.В. Захарченко (М.В. Старцева), Ю.И. Липунов, Ю.Г. Ярошенко // Инженерная поддержка инновации и модернизации: научные труды международной заочной конференции, посвященной 15-летию со дня создания Регионального Уральского отделения Академии Инженерных наук им.А.М.Прохорова. Екатеринбург: ИВТОБ, вып. 1, 2010. – С.98-102 (0,25 п.л. / 0,125 п.л.).

6. Захарченко, М.В. (Старцева, М.В.) Численное моделирование теплообмена при регулируемом охлаждении тел различной формы / М.В. Захарченко (М.В. Старцева), Е.В. Некрасова, Ю.И. Липунов, Ю.Г. Ярошенко // Моделирование, программное обеспечение и наукоемкие технологии в металлургии: труды 3-й Всероссийской научно-практической конференции. Новокузнецк, 2011. – С.209-215 (0,4 п.л. / 0,2 п.л.).

7. Захарченко, М.В. (Старцева, М.В.) Термоупрочнение рельсовых накладок в устройстве регулируемого охлаждения / М.В. Захарченко (М.В. Старцева), Ю.Г. Ярошенко, Ю.И.Липунов // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве: сборник докладов I Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (ТИМ'2012) с международным участием, 29–30 марта, 2012 г. / под ред. Н.А. Спирина. Екатеринбург: УрФУ, 2012. – С. 129-133 (0,25 п.л. / 0,125 п.л.).

8. Захарченко, М.В. (Старцева, М.В.) Разработка новой технологии и устройства для термоупрочнения рельсовых накладок / Ю.И. Липунов, К.Ю. Эйсмонт, 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(0,3 п.л. / 0,15 п.л.).

9. 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. Калягин, 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 (0,4 п.л. / 0,2 п.л.).

10. Захарченко, М.В. (Старцева, М.В.) 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 (0,4 п.л. / 0,2 п.л.).

11. Захарченко, М.В. (Старцева, М.В.) Инновационная экологичная технология улучшения рабочих характеристик рельсовых накладок / М.В. М.В. Захарченко (М.В. Старцева), Ю.И. Липунов, К.Ю. Эйсмондт, Ю.Г. Ярошенко // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве: сборник докладов II Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных (ТИМ'2013) с международным участием, 28–29 марта 2013 г. Екатеринбург: УрФУ, 2013. – С. 103-106 (0,2 п.л. / 0,1 п.л.).

12. Захарченко, М.В. (Старцева, М.В.) Современная экологичная ресурсосберегающая технология термоупрочнения железнодорожного проката / М.В. Захарченко (М.В. Старцева), Ю.Г. Ярошенко, К.Ю. Эйсмондт, Ю.И. Липунов, Е.В. Некрасова // Система управления экологической безопасностью: сборник материалов VII заочной международной научно-технической конференции 30-31 мая 2013 г. Екатеринбург, 2013. – С. 140-145 (0,3 п.л. / 0,15 п.л.).

13. Захарченко, М.В. (Старцева, М.В.) Исследование влияния струйного водяного охлаждения на свойства и структуру рельсовой накладки Р65 / Ю.И. Липунов, Е.В. Некрасова, Т.П. Пургина, М.В. М.В. Захарченко (М.В. Старцева), К.Ю. Эйсмондт, Ю.Г. Ярошенко // Создание высокоэффективных инновационных производств на предприятиях Уральской горно-металлургической компании (настоящее и будущее): сборник докладов международной научно-практической конференции 1-7 сентября 2013г. Верхняя Пышма, 2013. – С.115-116 (0,125 п.л. / 0,06 п.л.).

14. Захарченко, М.В. (Старцева, М.В.) Внедрение современного энерго- и ресурсосберегающего оборудования и экологически чистой технологии термоупрочнения в производстве рельсовых накладок / Г.М. Дружинин, Ю.И. Липунов, Е.В. Некрасова, Е.В. Попов, М.В. Захарченко (М.В. Старцева), К.Ю. Эйсмондт, Ю.Г. Ярошенко // Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершённых фундаментальных исследований и НИОКР: труды научно-практической конференции с международным участием и элементами школы для молодых учёных. Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2013. – С. 80-84 (0,15 п.л. / 0,125 п.л.).

15. Zakharchenko, M.V. (Startseva, M.V.) Development of high–efficiency technologies and devices of controlled cooling for thermohardening of metal / Y.I. Lipunov, L.A. Zaynullin, M.V. Zakharchenko (M.V. Startseva) // Advanced metals, ceramics and composites: proceedings of the XI China-Russia Symposium on Advanced

Material & Technologies, ed. Hailing Tu, Solntsev K., Ring Zhou. Part I / China, Kunming, Yunnan Publishing Group Corporation, Yunnan Science & Technology Press, 2013. – pp. 295-298 (0,2 п.л. / 0,1 п.л.).

16. Захарченко, М.В. (Старцева, М.В.) Эффективный экономичный способ термоупрочнения рельсовых накладок водяными струями / Ю.И. Липунов, Ю.Г. Ярошенко, М.В. Захарченко (М.В. Старцева), К.Ю. Эйсмонтт, Е.В. Некрасова // Научно-технический прогресс в чёрной металлургии: материалы I международной научно-технической конференции, 2 – 4 октября 2013 г. Череповец: ФГБОУ ВПО «Череповецкий государственный университет», 2013. – С. 207-211(0,25 п.л. / 0,125 п.л.).

17. Захарченко, М.В. (Старцева, М.В.) Внедрение современного энерго- и ресурсосберегающего оборудования и экологически чистой технологии термоупрочнения в производстве рельсовых накладок / Ю.И. Липунов, К.Ю. Эйсмонтт, М.В. Захарченко (М.В. Старцева), Ю.Г. Ярошенко, Е.В. Некрасова // Бюллетень «Чёрная металлургия». – 2013. – №12. – С. 61-64 (0,2 п.л. / 0,1 п.л.).

18. Захарченко, М.В. (Старцева, М.В.) Адаптация математической модели в условиях стендового эксперимента при струйном водяном охлаждении рельсовой накладки [Электронный ресурс] // Студенческий научный форум: труды VI Международной студенческой электронной научной конференции. 2014. – Режим доступа: <http://www.scienceforum.ru/2014/pdf/7667.pdf> (0,125 п.л.).

19. Захарченко, М.В. (Старцева, М.В.) Современный экологичный способ термоупрочнения рельсовых накладок / Ю.И. Липунов, К.Ю. Эйсмонтт, М.В. Захарченко (М.В. Старцева), Ю.Г. Ярошенко, Е.В. Некрасова // Творческое наследие Е.В. Грум-Гржимайло: сборник докладов международной научно-практической конференции. Екатеринбург: УРФУ, 2014. – С. 256-260 (0,25 п.л. / 0,125 п.л.).

Автор выражает глубокую признательность научному руководителю профессору Ю.Г.Ярошенко и коллективу Центра новых систем охлаждения и термоупрочнения металлов ОАО «ВНИИМТ» за помощь в работе над диссертацией.

Подписано в печать 21.10.2014 г. Формат 60x84/16.

Бумага для множ. аппаратов.

Печать плоская. Усл.печ. 1,2 п. л. Уч.-изд. 1,0 л. Тираж 110 экз. Заказ № \_\_\_\_.

Издательство УМЦ УПИ