На правах рукописи

МИХЕЕВ Дмитрий Алексеевич

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОССТАНОВЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ НАПЛАВКОЙ ЗАМКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ БУРИЛЬНЫХ ТРУБ

Специальность 05.16.09 – Материаловедение (машиностроение)

автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара 2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Самарский государственный технический университет» на кафедре «Металловедение, порошковая металлургия,наноматериалы»

Научный руководитель: **Амосов Александр Петрович**
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Емелюшин Алексей Николаевич**, доктор технических наук, профессор кафедры «Материаловедение и термическая обработка металлов» ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

Ковтунов Александр Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы» ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет»

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»**

Защита диссертации состоится «10» декабря, в 15 30, на заседании объединённого диссертационного совета Д 999.122.02 на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» по адресу: г.Самара, ул. Галактионовская 141, ауд.33.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» и на сайте http://d99912202.samgtu.ru/sites/d99912202.samgtu.ru/files/miheev_dis.pdf.

Отзывы на автореферат просьба высылать по адресу: 443100, г.Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Главный корпус.

Автореферат разослан «___» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Луц Альфия Расимовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Бурильная труба – это инструмент, используемый при бурении скважин, обеспечивающий передачу крутящего момента от привода к долоту, а также циркуляцию бурового раствора на забое. Работа бурильных труб протекает в условиях комбинированных нагрузок, при одновременном воздействии циклических изгибающих и ударных нагрузок, наружного и внутреннего гидростатического давления, однако статистические данные показывают, что более 60% бурильных труб отбраковываются по причине абразивно–фрикционного износа замкового соединения по наружному диаметру. В соответствии с принятыми стандартами на списание изношенного бурильного инструмента, допускается эксплуатация бурильных труб с износом замковых частей по наружному диаметру не более 38%, после чего труба утилизируется. С учетом весьма короткого жизненного цикла бурильной трубы, а также её высокой стоимости перспективным оказалось восстановление геометрических параметров замковых соединений наплавкой силами центров по ремонту бурильных труб (ЦРБТ).

Существуют различные подходы и способы ремонта, однако наибольшее распространение как один из самых эффективных для замковых соединений, нашел метод восстановления электродуговой наплавкой в защитной среде. Данный метод возник в начале XX века, однако широкое применение нашёл в 80–90–х годах, когда особенно острой стала проблема нехватки бурильного инструмента. Внешне восстановленные замки сложно отличить от новых, а поставляемая после капитального ремонта бурильная труба хорошо зарекомендовала себя при строительстве относительно неглубоких скважин. Однако последние десятилетия, в разрезе добычи полезных ископаемых, характеризуется заметным истощением существующих ресурсных фондов, что ставит добывающие компании перед необходимостью бурения более глубоких и дорогих скважин, а также освоения наклонно направленного бурения, характеризующегося повышенным износом бурильного инструмента. При этом испытываемые бурильной колонной нагрузки постоянно растут, а существующий технологический процесс восстановительного ремонта не претерпевает изменений. Исследования структуры и свойств восстановленных замковых соединений показали, что существующий способ восстановления не обеспечивает стабильного получения в металле замка требуемого уровня механических свойств.

В условиях ЦРБТ разрушающий контроль механических свойств восстановленных замковых соединений, как правило, отсутствует, а неразрушающий ограничен проведением дефектоскопии и замером твердости по поверхности наплавленного слоя, величина которой должна укладываться в интервал значений твёрдости металла замка новой трубы. Считается, что остальные механические свойства восстановленного замкового соединения находятся на необходимом уровне по всей глубине металла под наплавленным слоем. При таком подходе игнорируется влияние температурного фактора в процессе ремонта на микроструктуру металла тела замка под наплавленным слоем. Нанесение наплавки сопровождается перегревом выше температуры

аустенизации с образованием на поверхности закалочной микроструктуры, в то время как основной металл замкового соединения может претерпевать в зоне термического влияния (ЗТВ) процесс отпуска, сопровождающийся значительным снижением твердости по сравнению с поверхностью. Твердость поверхности, как правило, укладывается в регламентируемые нормы, а изделие беспрепятственно проходит контроль качества и допускается к эксплуатации с низкими механическими свойствами основного металла в зоне термического влияния. Полный спектр необходимых механических характеристик не может быть достигнут без получения определённого микроструктурного состояния в металле, обеспечивающего требуемые механические характеристики. Для этого необходимо, прежде всего, проведение исследования зависимости микроструктуры и механических свойств металла наплавленного слоя и основного металла в прилегающей зоне термического влияния от условий реализации процесса наплавки. Во–первых, это определение состава защитной среды (флюсов или газовой среды) наплавки, обеспечивающей необходимую степень легирования ванны расплава, а также надёжную защиту от поступления воздуха в область восстановления. Важным фактором, влияющим на выбор защитной среды, также является степень её адгезии к металлу наплавленного слоя. Во–вторых, требуемая микроструктура не может быть получена без корректировки температурно–временного режима наплавки, заключающегося в ограничении максимальной температуры нагрева тела замкового соединения, а также введении предварительного подогрева изделия перед восстановлением. В–третьих, необходимо проведение оценки влияния толщины единовременно наплавляемого слоя на микроструктурное состояние основного металла, а также определение количества таких слоёв при последовательной наплавке. В–четвёртых, важной проблемой является отсутствие информации об эксплуатационной надёжности восстановленных бурильных труб, которая может быть получена только после проведения лабораторных стендовых испытаний на циклическую усталость и осевую нагрузку.

Таким образом, тематика настоящей диссертационной работы является актуальной и направлена на решение проблемы повышения качества замковых соединений бурильных труб после капитального ремонта.

Цель работы: обеспечение требуемого уровня свойств замковых соединений бурильных труб после восстановления электродуговой наплавкой, на основе материаловедческих исследований влияния условий наплавки на химический состав, микроструктуру и механические свойства наплавленного слоя, прилегающей зоны термического влияния и основного металла.

Задачи исследования

1) Построение простейшей тепловой модели, связывающей температурное поле и градиент температуры в теле замка с характеристиками наплавленного слоя.

2) Определение типа и состава защитной среды (флюсов или газовой среды), обеспечивающей технологичность процесса наплавки, необхо-

димую степень легирования, при сохранении хорошей обрабатываемости наплавленного металла.

3) Исследование влияния температуры предварительного подогрева замка на уровень остаточных напряжений в зоне термического влияния.

4) Исследование влияния толщины наплавляемого слоя на структуру и свойства металла замков после восстановительного ремонта, а также на формирование зоны термического влияния.

5) Оценка степени разупрочнения сварного шва бурильного замка и трубы в результате термического влияния наплавленного слоя.

Методы исследования

При проведении исследований использованы основные положения материаловедения и теории теплопроводности, а также современные качественные и количественные методы металлографического, спектрального и фрактографического анализа, разрушающие и неразрушающие методы контроля механических свойств.

Научная новизна результатов

1) На основе классической теории теплопроводности построена тепловая модель, позволяющая оценивать температурные поля, а также их влияние на градиент температуры и ширину ЗТВ после проведения наплавки.

2) Исследовано влияние различных защитных сред, предварительного подогрева, а также толщины единовременно наплавляемого слоя на структуру и свойства замковых соединений ремонтных бурильных труб.

3) Исследовано влияние параметров процесса восстановления наплавкой на статическую прочность и усталостную долговечность сварного соединения бурильной трубы и бурильного замка.

Практическая ценность результатов работы

1) Разработаны рекомендации для повышения качества процесса наплавки:

– применение в качестве защитной среды смеси флюсов 48–ОФ–10 и ЭЛЗ–ФКН–1/55(Б) в соотношении 1:1;

– предварительный подогрев до 250±50^{o}С и прокалка флюса при температуре 350^{o}С перед наплавкой;

– ограничение толщины единовременно наплавляемого слоя до 3 мм.

2) Проведение стендовых испытаний показало, что при соблюдении рекомендуемых параметров процесса ремонта разрушение в области сварного соединения не происходит.

3) На основе результатов диссертационного исследования были разработаны рекомендации в технологический процесс восстановительного ремонта, а также руководство по эксплуатации бурильных труб после капитального ремонта. Предложенные решения нашли практическое применение в ООО «БУР СЕРВИС», а также в ООО «ТМС–Буровой сервис».

Положения, выносимые на защиту

1. Тепловая модель процесса наплавки, позволяющая оценивать влияние параметров наплавки на температурные профили и величину градиента температуры в металле замкового соединения после восстановления.

2. Результаты анализа влияния основных параметров наплавки (к таковым относятся защитная среда, температура предварительного подогрева и толщина наплавляемого слоя) на микроструктуру и свойства, металла наплавки и ЗТВ после восстановления.

3. Результаты лабораторных исследований химического состава, механических свойств и металлографического анализа металла замкового соединения после восстановления.

4. Результаты испытаний на осевую растягивающую нагрузку и циклическую усталость по оценке работоспособности бурильных труб после капитального ремонта и определению максимально допустимых нагрузок области сварного шва и прилегающей ЗТВ замка и тела трубы.

Достоверность научных результатов работы

В ходе выполнения исследований было использовано отечественное и зарубежное лабораторное оборудование, состоящее на учёте в едином реестре средств измерений, современные экспериментальные и теоретические методы и подходы теории теплопроводности, механики, теории разрушения и пластичности, теории термической обработки. Результаты работы сопоставлялись с результатами научных исследований иных источников, были апробированы, внедрены и нашли практическое применение на производстве.

Апробация результатов

Основные результаты исследований, представленных в работе, докладывались на: международной научно–практической конференции 17–18 октября 2014 года «Перспективное развитие науки, техники, технологий», в г. Курск; IV международной научно–практической конференции 22 сентября 2014 года «Современные научные исследования: методология, теория, практика», в г. Москва (приложение Д); V всероссийской с международным участием научно–практической конференции 29 июня 2015 года «Актуальные исследования гуманитарных, естественных, общественных наук», в г. Новосибирск; всероссийской научно – технической интернет – конференции с международным участием "Высокие технологии в машиностроении", г. Самара 2016; XXII международной научно–практическая конференции «ТРУБЫ–2016».

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 10 печатных работ (5 – без соавторов), из них 5 в изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав основной части и заключения, списка литературы, включающего ___ наименований. Объем работы - ___ страниц машинописного текста, включая ___ рисунков и ___ таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, практическая значимость, положения, выносимые на защиту, а также дана краткая характеристика работы.

В первой главе приведён литературный обзор. Проанализирован химический состав трубных сталей, выявлены факторы, определяющие физико-

механические свойства замкового соединения. Проанализированы условия работы бурильного замка, обозначены факторы, в значительной степени, сокращающие его жизненный цикл. В сравнительной форме представлены различные способы восстановления, обозначены положительные и отрицательные стороны каждого из методов. Установлено, что наиболее конкурентоспособным в условиях производства является метод восстановления бурильного инструмента электродуговой наплавкой под флюсом. Данный метод позволяет формировать требуемый уровень механических свойств уже в процессе восстановления, однако его применение сопряжено с рядом технологических проблем, главными из которых являются подбор защитной среды для проведения наплавки, температурно-временного режима и толщины наплавляемого слоя.

Во второй главе описаны используемые методики работы, оборудование и материалы. Для проведения металловедческого исследования было использовано оборудование Самарского государственного технического университета и Научно-исследовательского института разработки и эксплуатации нефтепромысловых труб. Химический состав стали определялся с использованием оптико-эмиссионного спектрометра СПАС-02. Испытания на одноосное растяжение проводились на разрывной машине Р-10М. Испытания на ударную вязкость проводились на маятниковом копре МК-30. Замер твёрдости проводился на твердомерах ТК-2М и ТШ-2М. Оценка и фотосъёмка микроструктуры проводилась на инвертированных микроскопах Leitz Wetzlar MM6 и Carl Zeiss Vert A1, а также с использованием электронного микроскопа Jeol Superprobe 733. Тепловая модель строилась на основе классической теории теплопроводности. Экспериментальная оценка остаточных напряжений проводилась по методике Давиденкова на кольцевых образцах. Численные расчеты производились с помощью математического пакета MathCad и Ansys. Натурные испытания восстановленных замковых соединений бурильных труб проводились на испытательных стендах УС-600 и СТ-20.

В третьей главе рассмотрены теоретические основы и физико-технические аспекты построения математической модели. Модель строилась на основе классической теории теплопроводности. Неоспоримым достоинством данной теории является её простота и доступность для понимания, недостатком же является то, что результаты представлены преимущественно в виде сложных формул, номограмм и таблиц. Применение компьютерных технологий существенно облегчает их использование в инженерных расчетах на практике.

Превращения при электродуговой наплавке протекают в обстановке непрерывного изменения температуры вследствие интенсивного местного неравномерного нагрева металла. Оценка изменения температурного поля в процессе электродуговой наплавки является одной из важнейших задач данной работы, так как позволяет прогнозировать микроструктурные превращения, а, следовательно, и уровень механических свойств изделия после ремонта. При построении модели введен ряд допущений, что позволило значительно упростить задачу при сохранении возможности оценки температурного

поля. Рассмотрен один цикл электродуговой наплавки, когда плоский слой расплава металла определённой заданной толщины приводится мгновенно в тепловой контакт с холодным плоским слоем стенки замка. При этом начинается теплопередача из расплава в стенку и перенос тепла в стенке путем теплопроводности. Теплопередача в окружающую среду не учитывалась, так как ее величина значительно меньше теплопередачи из расплава в стенку замка. При построении модели охлаждения наплавленного слоя рассматривалось несколько стадий. **На первой стадии** был изучен нагрев стенки замка в процессе кристаллизации расплава наплавленного слоя с постоянной температурой $T_{пл}$ на поверхности стенки (граничные условия 1 рода). **На второй стадии** происходит остывание закристаллизовавшегося слоя расплава, т.е. уменьшение его температуры, которую считаем одинаковой по толщине наплавленного слоя и совпадающей с температурой поверхности стенки замка $T_{пов}$.

Согласно приведённой модели, профиль температуры в стенке замка на первой стадии определяется выражением:

$$T(x,t) = T_0 + (T_{пл} - T_0) \cdot \left(1 - \mathrm{erf}\left(\frac{x}{2\cdot\sqrt{a\cdot t}}\right)\right), \quad \text{при } t \le t_1 \qquad (1)$$

где: T_0 – начальная температура;
$T_{пл}$ – температура плавления материала наплавленного слоя;
erf – функция ошибки;
a – коэффициент температуропроводности материала стенки;
x –координата рассматриваемой точки (расстояние до поверхности стенки);
t – общее время остывания наплавленного слоя;
t_1- время кристаллизации наплавленного слоя.

На второй стадии ($t \ge t_1$) закристаллизовавшийся наплавленный слой отдаёт тепло стенке бурильного замка, остывает, увеличивая толщину прогретого слоя в стенке при непрерывном снижении температуры поверхности стенки:

$$T_{пов}(t) = T_0 + (T_{пл} - T_0) \cdot \exp\left(-\frac{2\sqrt{a}}{h_H\sqrt{\pi}} \cdot \left(\sqrt{t} - \sqrt{t_1}\right)\right), t \ge t_1 \qquad (2)$$

а профиль температуры в стенке на второй стадии имеет вид:

$$T(x,t) = T_0 + (T_{пов} - T_0) \cdot \left(1 - \mathrm{erf}\left(\frac{x}{2\cdot\sqrt{a\cdot t}}\right)\right), \quad \text{при } t \ge t_1 \qquad (3)$$

Численные расчеты по приведенным формулам позволяют находить профили температуры в стенке в различные моменты времени, а также ширину зоны термического влияния (ЗТВ) $x_{отп}$, за которую принимаем глубину отпущенного слоя с температурой от температуры поверхности стенки $T_{пов}$ до температуры отпуска $T_{отп}$. Эти расчеты позволяют показать влияние начальной температуры T_0 (температуры предварительного подогрева T_0) и толщины наплавки h_H на ширину зоны термического влияния. Результаты таких расчетов для различных температур предварительного подогрева T_0 в графическом виде представлены на рисунке 1.

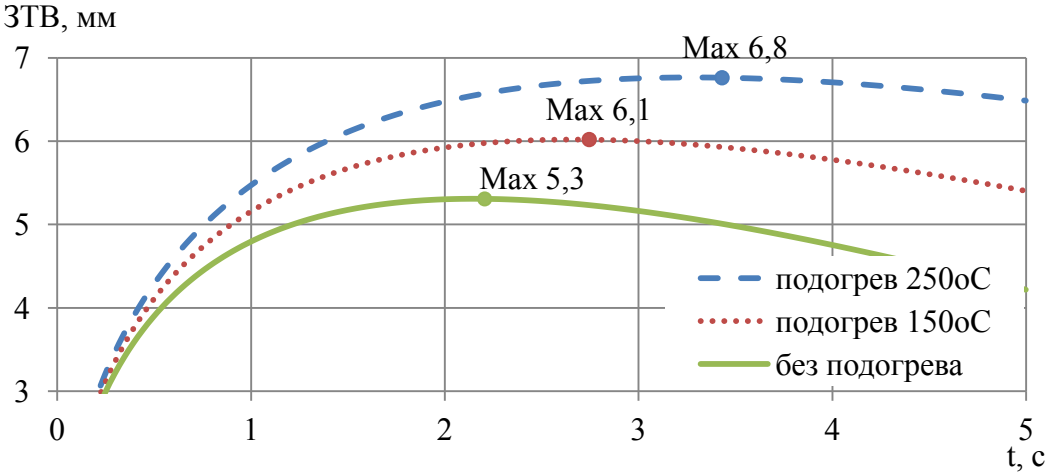


Рисунок 1 – Зависимость ширины ЗТВ от наличия предварительного подогрева

Из рисунка 1 видно, что ширина зоны термического влияния сначала растёт, достигая максимального значения $x^{м}_{отп}$, а затем падает.

На рисунках 2 и 3 представлены температурные профили в стенке замка для наплавленного слоя различной толщины. Из построенных профилей видно, что ширину ЗТВ можно значительно снизить путём уменьшения толщины наплавляемого слоя.

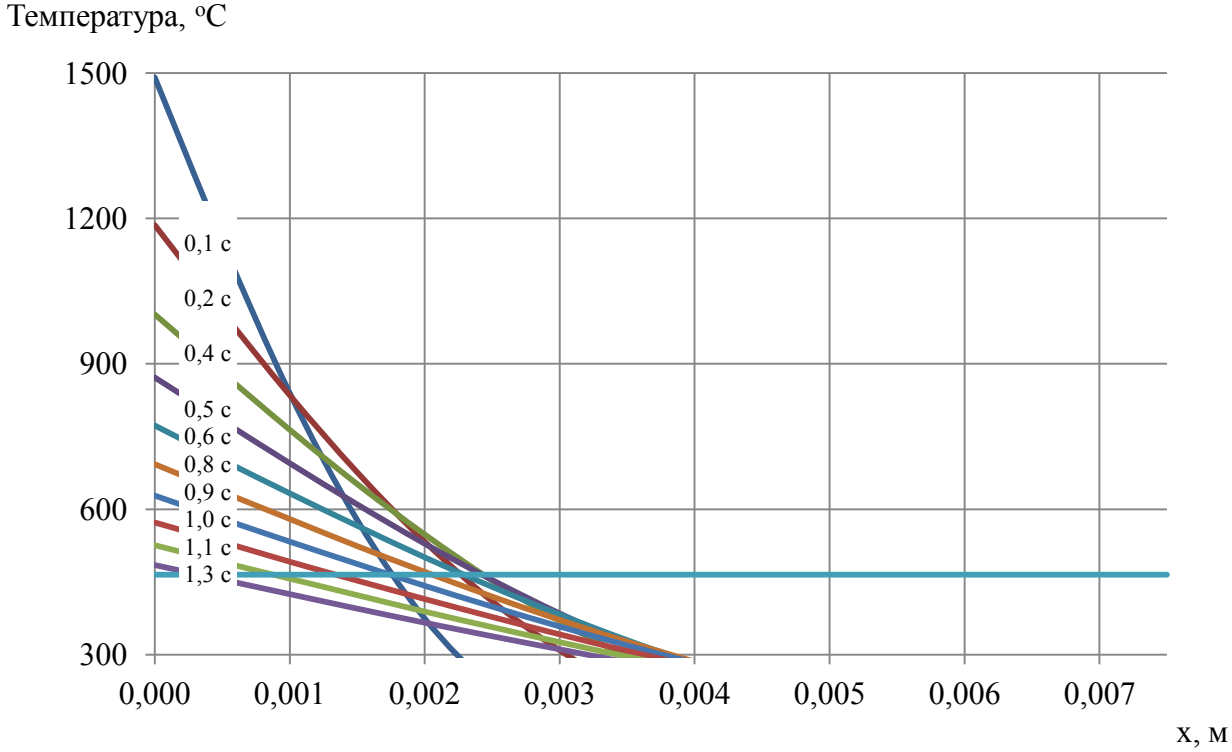


Рисунок 2 - Профили температуры в стенке замка при толщине наплавленного слоя 3 мм

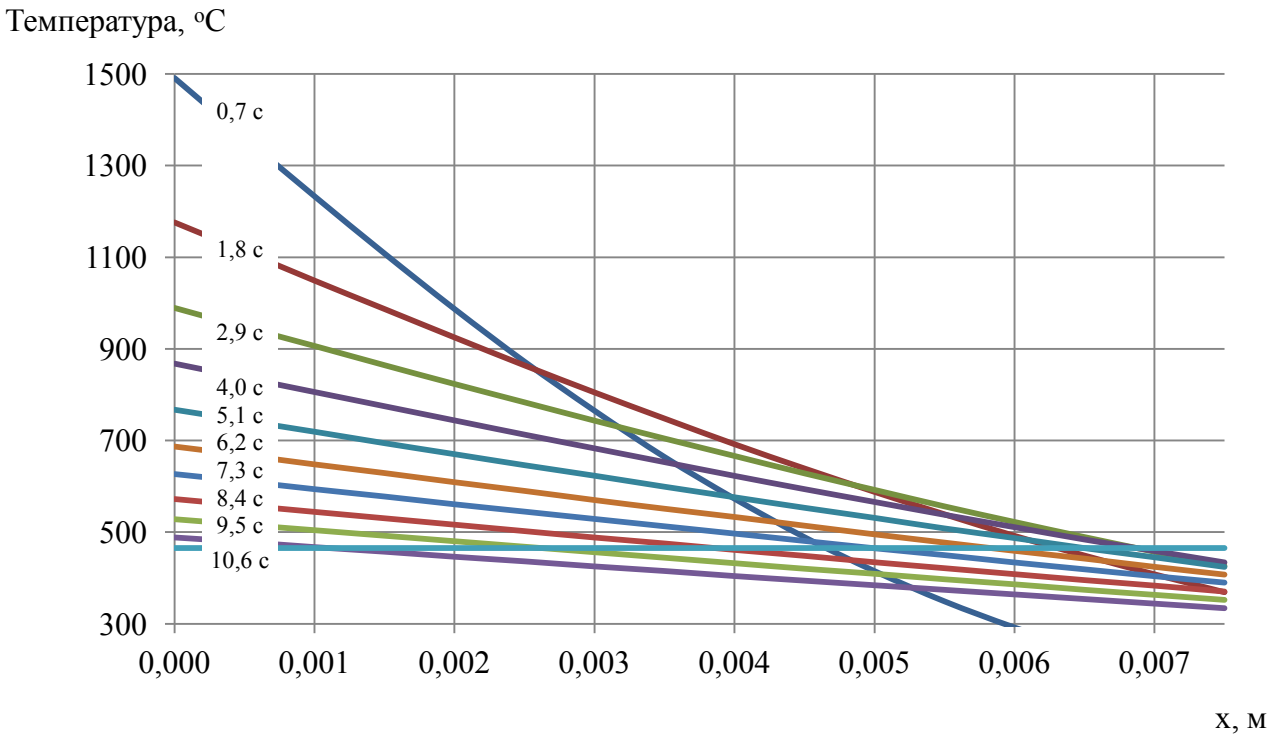


Рисунок 3 - Профили температуры в стенке замка при толщине наплавленного слоя 9 мм

Зависимость ширины зоны термического влияния от толщины наплавленного слоя при введении предварительного подогрева до 250 °С в графическом виде представлена на рисунке 4.

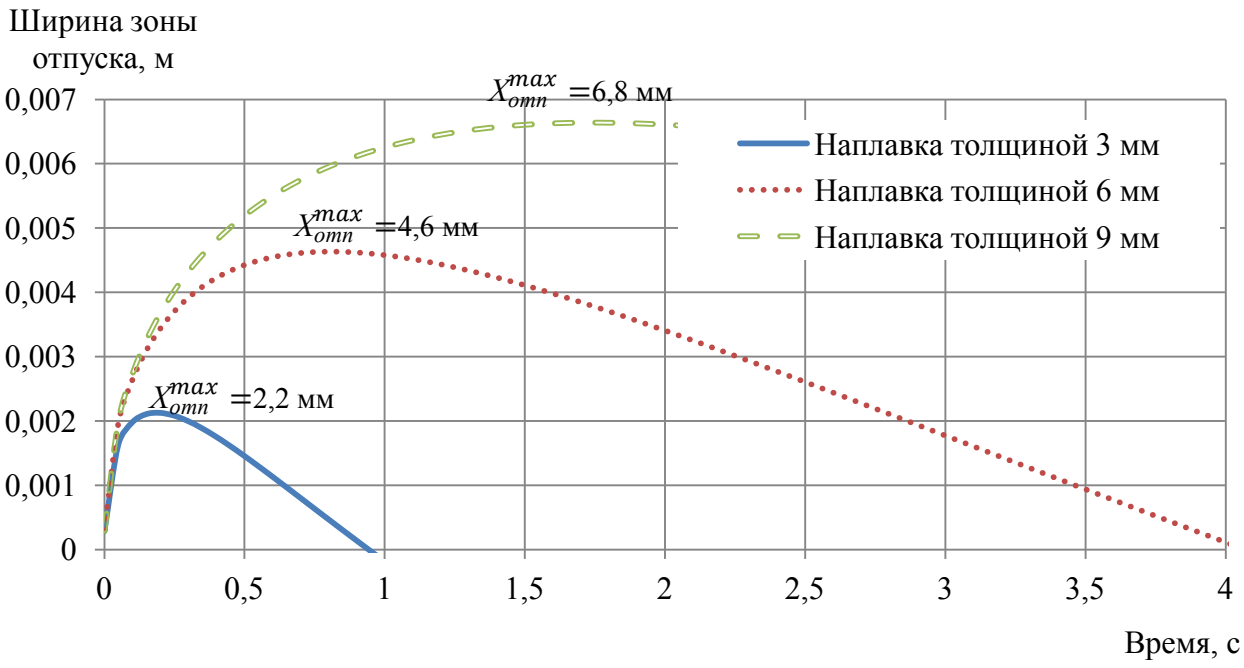


Рисунок 4 – Значения толщины отпущенного слоя в стенке замка в различные моменты времени для наплавленных слоев толщиной 3, 6 и 9 мм

Рассмотрим влияние предварительного подогрева на остаточные напряжения. Остаточные напряжения возникают из температурных при наплавке из-за неравномерного нагрева. Неравномерность нагрева, в свою оче-

редь, характеризуется градиентом температуры, то есть производной $\frac{\partial T}{\partial x}$. Чем больше градиент температуры, тем выше температурные, а, следовательно, и остаточные напряжения. Для уменьшения градиента температур производится предварительный подогрев. Зависимость градиента температуры на поверхности стенки, от толщины наплавленного слоя отражает выражение:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = -\frac{2\cdot(T_{пл}-T_0)^2\cdot c}{\pi\cdot L\cdot h_н}, \qquad (4)$$

где: c – удельная теплоемкость;
L – удельная теплота плавления;

Из выражения (4) видно, что градиент температуры имеет сильную квадратичную зависимость от начальной температуры или температуры предварительного подогрева T_0. Чем меньше разница $T_{пл}$ и T_0, тем меньше градиент температуры, чем и объясняется влияние предварительного подогрева на уменьшение величины остаточных напряжений. Результаты расчетов изменения градиента температуры в зависимости от температуры предварительного подогрева графически представлены на рисунке 3.

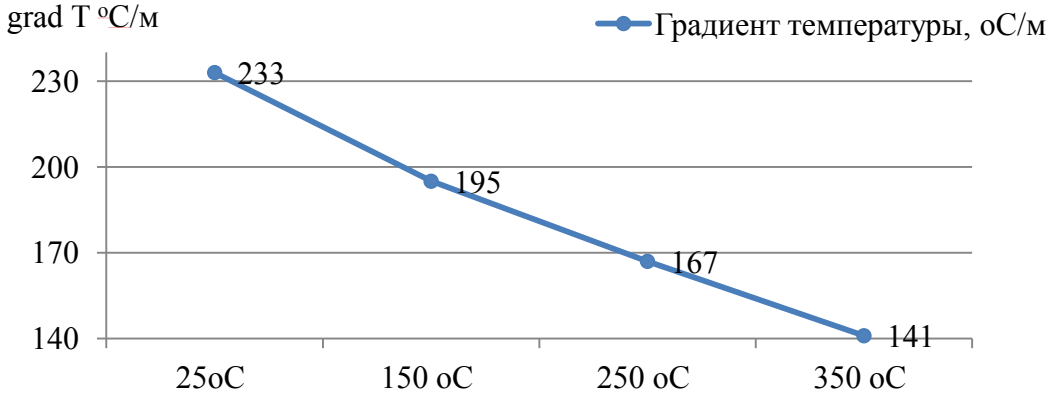


Рисунок 3 - Зависимость градиента температуры от предварительного подогрева T_o

Из рисунка 3 видно, что введение предварительного подогрева должно приводить к снижению градиента температуры, а, следовательно, к уменьшению остаточных напряжений в металле.

Четвёртая глава посвящена материаловедческому исследованию факторов, оказывающих существенное влияние на микроструктуру металла замковых соединений после восстановления электродуговой наплавкой. Таковыми факторами определены защитная среда, предварительный подогрев и толщина наплавляемого слоя.

Для исследований влияния состава защитной среды (флюсов или углекислого газа) на комплекс механических свойств и микроструктурное состояние металла замка после наплавки были отобраны пять ниппельных фрагментов замковых соединений бурильных труб группы прочности “Д”, изготовленных в соответствии с ГОСТ 27834-95 из стали 40ХМФА. На каждом объекте было произведено по две опытных наплавки. Наплавка производилась в условиях центра по ремонту бурильных труб, на наплавочном комплексе, без реализации предварительного подогрева, под плавленым флюсом 48ОФ-10 и керамическим флюсом ЭЛЗ-ФКН-1/55(Б) по отдельности, а также

в различных соотношениях наплавочной проволокой НП-30ХГСА. Также была проведена опытная наплавка в газовой среде без использования флюсов. Толщина наплавленного слоя регулировалась посредством изменения технологических параметров процесса, а также варьированием диаметра наплавочной проволоки и составляла не более 9-10 мм на диаметр (4-5мм на сторону) за один проход. Все объекты исследования перед наплавкой прошли предварительный контроль химического состава, а после восстановления - разрушающий контроль механических свойств и металлографических параметров с последующим сопоставлением результатов с требованиями ГОСТ 27834-95. В таблице 1 представлены исследуемые защитные среды (флюс или углекислый газ) и характеристики процессов:

Таблица 1 – Защитные среды для наплавки

Маркировка	**Защитная среда**	**Выявленные замечания**
Б	плавленый флюс 48ОФ-10	Шлаковая корка удаляется только после застывания. Низкая твёрдость
С	плавленый флюс ЭЛЗ-ФКН-1/55(Б)	
Б4/С1	флюсы 48ОФ-10 и ЭЛЗ-ФКН-1/55(Б) в соотношении 4:1	Шлаковая корка сложно удаляется. Твёрдость наплавленного слоя значительно ниже регламентируемой.
Б3/С1	флюсы 48ОФ-10 и ЭЛЗ-ФКН-1/55(Б) в соотношении 3:1	
Б2/С1	**флюсы 48ОФ-10 и ЭЛЗ-ФКН-1/55(Б) в соотношении 2:1**	**Шлаковая корка легко удаляется. Твёрдость наплавленного слоя на нижнем регламентируемом уровне.**
Б1/С1	**флюсы 48ОФ-10 и ЭЛЗ-ФКН-1/55(Б) в соотношении 1:1**	
Б1/С2	флюсы 48ОФ-10 и ЭЛЗ-ФКН-1/55(Б) в соотношении 1:2	Шлаковая корка не нуждается в принудительном удалении. Наплавленный слой имеет высокую поверхностную твёрдость, обработка затруднительна
Б1/С3	флюсы 48ОФ-10 и ЭЛЗ-ФКН-1/55(Б) в соотношении 1:3	
Б1/С4	флюсы 48ОФ-10 и ЭЛЗ-ФКН-1/55(Б) в соотношении 1:4	
УГ	углекислый газ	Разбрызгивание металла в процессе наплавки. Твёрдость наплавленного слоя ниже регламентируемого уровня

Наилучшие показатели в части обеспечения процесса нанесения наплавки были получены при использовании смеси флюсов 48ОФ-10 и ЭЛЗ-ФКН-1/55(Б) в соотношениях 1:1 и 1:2. При использовании в качестве защитной среды углекислого газа необходимость в удалении шлаковой корки отпадает, однако процесс наплавки сопровождается интенсивным разбрызгиванием металла, что затрудняет его осуществление.

Результаты исследования механических свойств исследуемых замков представлены в таблице 2. Данные таблицы 2 свидетельствуют о том, что ни один из объектов исследования не соответствует требованиям ГОСТ на новую продукцию. В условиях ЦРБТ контролируется только твёрдость наплавленного слоя, которая не отражает фактических значений по сечению стенки замкового соединения. Согласно полученным данным, несколько образцов, могут пройти контроль, при этом твёрдость основного металла у них значительно ниже контролируемой твердости поверхности.

Таблица 2 - Механические свойства металла замковых соединений после наплавки

№ п/п	Защитная среда	Испытания на одноосное растяжение			Испытания на ударный изгиб, кДж/м^2, KCV	Твердость, НВ	
		$\sigma_в$, МПа	$\sigma_т$, МПа	δ, %		Тело замка	Поверхность наплавки
1	Б	830	671	**21**	378	256	252
2	Б4/С1	839	682	**21**	420	245	263
3	Б3/С1	892	718	**19**	491	246	270
4	Б2/С1	899	642	**18**	559	246	282
5	Б1/С1	905	734	**16**	**738**	271	**298**
6	Б1/С2	919	754	**14**	**674**	260	**300**
7	Б1/С3	927	688	**14**	543	262	383
8	Б1/С4	927	667	12	454	265	395
9	С	961	733	11	330	272	405
10	УГ	848	651	**20**	417	277	295
ГОСТ 27834-95		**≥981**	**≥832**	**≥13**	**≥589**	**300-355**	

Повышенная твёрдость наплавленного слоя в данном случае может быть связана с его химическим составом и является негативным фактором, так как затрудняет механическую обработку и повышает риск образования трещин. Результаты исследования химического состава наплавленного слоя, приведены на рисунке 4. Из рисунка 4 можно сделать вывод, что наибольшей легирующей способностью обладает керамический флюс, чем и объясняется рост поверхностной твёрдости наплавленного слоя с повышением его концентрации в смеси.

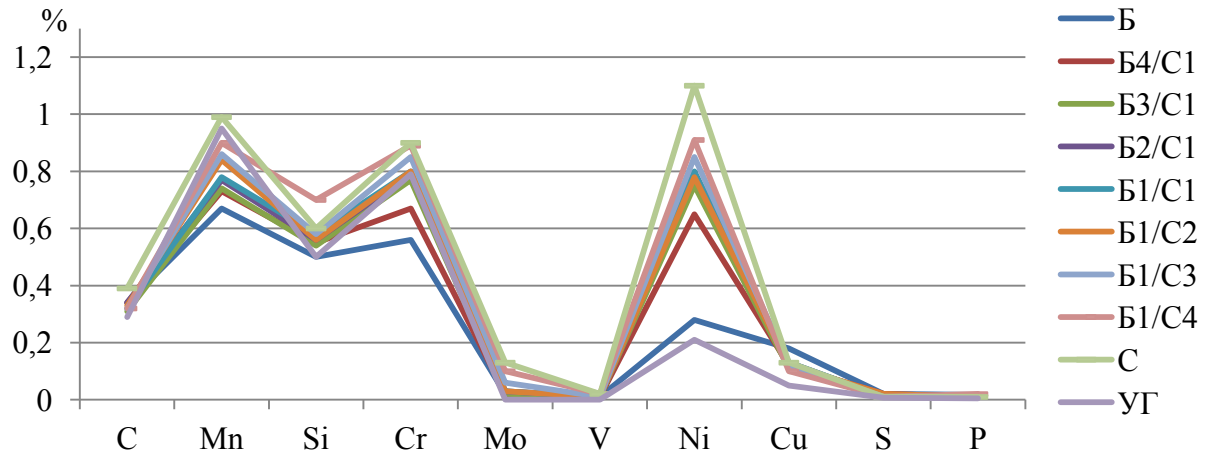


Рисунок 4 – Содержание легирующих элементов в наплавленном слое

Введение предварительного подогрева преследует прежде всего это снижение остаточных напряжений. Кроме того, сталь 40ХМФА, из которой изготовлены замки, легирована хромом и ванадием и относится к сталям с ограниченной свариваемостью, что повышает риск образования микротрещин в области проплавления основного металла. Для сталей такого класса сварные кодексы рекомендуют применение предварительного подогрева. Температура подогрева, рассчитывается по углеродному эквиваленту и в данном случае составляет 250^{o}C. Кроме того, в РД заложены рекомендации по прокалке флюса при температуре 350^{o}C перед использованием.

Для исследования влияния режимов предварительного подогрева на комплекс механических свойств и микроструктурное состояние были отобраны шесть образцов (три замковых соединения бурильных труб, образованных ниппелем и муфтой) группы прочности “Д”, изготовленных в соответствии с ГОСТ 27834-95 из стали 40ХМФА. Ремонт производился под смесью флюсов ЭЛЗ-ФКН-1/55(Б), 48 ОФ-10 в соотношении 1:1, наплавочной проволокой НП-30ХГСА. Наплавка производилась в условиях центра по ремонту бурильных труб (ЦРБТ), на наплавочном комплексе, без реализации, а также с реализацией предварительного подогрева до 150^{o}С, 250^{o}С и 350^{o}С. Подогрев изделий проводился двумя способами – при помощи ручной газовой горелки и при помощи индуктора. При наплавке с подогревом до 350^{o}С флюс менял физические свойства и стекал по образующей замка, поэтому от проведения данного опыта отказались. Толщина наплавленного слоя регулировалась посредством изменения технологических параметров процесса, а также путём варьирования диаметра наплавочной проволоки и составляла не более 9-10 мм на диаметр (4-5мм на сторону) за один проход.

Оценка влияния предварительного подогрева на величину остаточных напряжений проводилась по методике Давиденкова. В основе методики лежит сравнительный анализ величины расхождения кромок колец, изготовленных из опытных образцов замковых соединений после восстановления при различных температурных режимах. Остаточные напряжения внутри колец до разрезки находятся в равновесии: суммы сил и моментов равны нулю. После разрезки равновесие сил и моментов нарушается, и кромки колец деформируются (в данном случае расходятся). Анализ проводился на пяти кольцах, изготовленных из ниппельных частей замковых соединений. Задача по определению остаточных напряжений сводится к определению нагрузки, которая восстанавливает цельность колец. Такими нагрузками являются осевая сила и изгибающий момент сжимающие кольцо в области разреза до соприкосновения кромок. Осевые напряжения в кольцах будут находиться из выражения:

$$\sigma_1 = \frac{h \cdot E \cdot I}{3 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^3 \cdot F}, \quad (5)$$

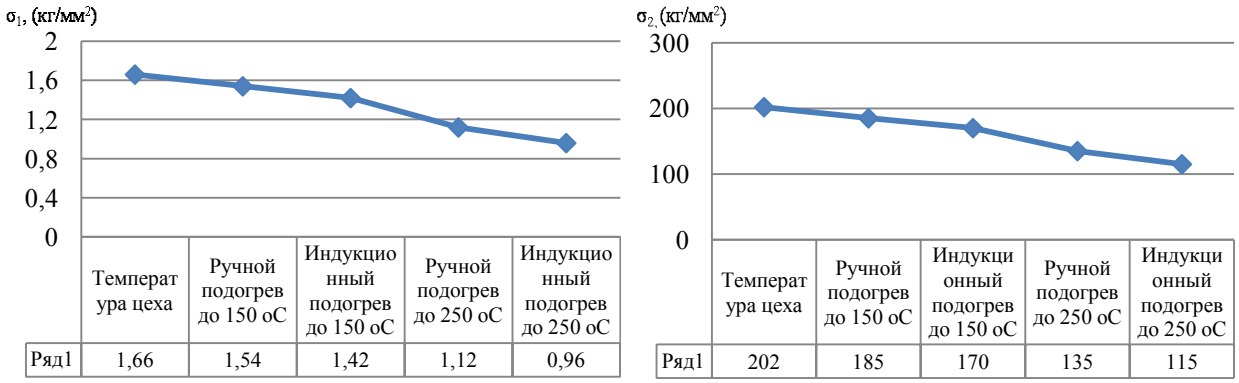
где: F - площадь разреза, в котором сосредоточены напряжения.
h-расстояние между кромками кольца;
D - наружный диаметр кольца;
E – модуль Юнга для стали;
I – момент инерции поперечного сечения кольца.

Изгибающие напряжения будут находиться из выражения:

$$\sigma_2 = \frac{h \cdot E \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot F(t-2u)}, \quad (6)$$

где: u – толщина слоя с максимальными остаточными напряжениями.
t - толщина кольца.

Результаты вычислений по приведённым формулам представлены на рисунке 5 (а, б). Из рисунка 5 видно, что введение предварительного подогрева приводит к значительному снижению осевых и касательных напряжений в сечениях рассматриваемых колец.



а) Осевые напряжения б) Изгибающие напряжения

Рисунок 5 – Сравнительная оценка остаточных напряжений в сечениях колец

Результаты исследования механических свойств металла замковых соединений после восстановления приведены в таблице 3.

Таблица 3 - Механические свойства металла замковых соединений после наплавки

№ п/п	Защитная среда	Испытания на одноосное растяжение			Испытания на ударный изгиб, кДж/м^2, KCV	Твердость, НВ	
		$\sigma_в$, МПа	$\sigma_т$, МПа	δ, %		Тело замка	Поверхность наплавки
1	$М_{бп}$	925	682	**15**	**818**	276	**305**
2	$Н_{бп}$	931	798	**17**	**865**	280	**320**
3	$М_{150-р}$	978	754	**15**	610	290	**300**
4	$Н_{150-р}$	890	732	**17**	534	280	**332**
5	$М_{150-и}$	925	765	**16**	**763**	290	295
6	$Н_{150-и}$	956	823	**16**	**844**	288	**305**
7	$М_{250-р}$	878	725	**15**	482	261	295
8	$Н_{250-р}$	888	738	**16**	425	265	288
9	$М_{250-и}$	946	820	**16**	**634**	281	**325**
10	$Н_{250-и}$	**995**	**883**	**18**	**715**	295	**315**
ГОСТ 27834-95		**≥981**	**≥832**	**≥13**	**≥589**	**300-355**	

Из таблицы 3 видно, что ни один образец в полной мере не соответствует требованиям ГОСТ 27834-95 в части механических свойств. Ширина зоны термического влияния варьируется от 5 до 9 мм и повышается с ростом температуры подогрева. Следует отметить, что ширина ЗТВ в образцах, восстановленных с ручным подогревом, выше, чем в образцах с индукционным. Наилучший комплекс механических свойств был получен в образцах, восстановленных с индукционным предварительным подогревом до 250^{o}С. Несколько заниженные механические свойства муфтовых частей замковых соединений по сравнению с ниппельными можно объяснить меньшей толщиной основного металла, т.е. скорость прогрева муфты выше. Для того, чтобы нивелировать влияние толщины основного металла на результат восстановления бурильного замка, необходимо ограничение толщины единовременно наплавляемого слоя до значения, позволяющего максимально производительно и, в то же время, без риска перегрева производить его восстановление как на ниппельной так и на муфтовой частях.

Для исследований влияния толщины наплавленного слоя на комплекс механических свойств и микроструктурное состояние были отобраны шесть образцов (три замковых соединения бурильных труб, образованных ниппелем и муфтой), группы прочности “Д”, изготовленных в соответствии с ГОСТ 27834-95 из стали 40ХМФА. Ремонт производился наплавочной проволокой НП-30ХГСА под слоем смеси флюсов ЭЛЗ-ФКН-1/55(Б), и 48 ОФ-10 в соотношении 1:1 с предварительным подогревом ремонтного изделия в индукторе до температуры 250 ^{o}C и прокалкой флюса до 350^{o}C. Толщина наплавленного слоя регулировалась посредством изменения технологических параметров процесса, а также путём варьирования диаметра наплавочной проволоки и составляла в совокупности не более 20 мм на диаметр (9-10 мм на сторону). Наплавка производилась тремя способами: в один проход, толщиной наплавленного слоя 9-10 мм на сторону, в 2 прохода, толщиной наплавленного слоя 5-6 мм на сторону, в 3 прохода, толщиной наплавленного слоя 2-3 мм на сторону. Результаты исследования механических свойств приведены в таблице 4.

Таблица 4 - Механические характеристики металла замковых соединений

№ п/п	Маркировка образцов	Испытания на одноосное растяжение			Испытания на ударный изгиб, кДж/м^2, KCV	Твердость, НВ	
		$\sigma_в$, МПа	$\sigma_т$, МПа	δ, %		Тело замка	Поверхность наплавки
1	1 проход $Н_9$	823	630	9,5	520	242	294
2	1 проход $М_9$	950	835	10,5	496	280	305
3	2 прохода $Н_6$	954	875	12,5	563	280	290
4	2 прохода $М_6$	998	884	11,7	578	296	302
5	3 прохода $Н_3$	**1050**	**952**	**13,9**	**620**	**310**	**335**
6	3 прохода $М_3$	**1089**	**980**	**14,5**	**654**	**320**	**342**
ГОСТ 27834-95		**≥981**	**≥832**	**≥13**	**≥589**	**300-355**	

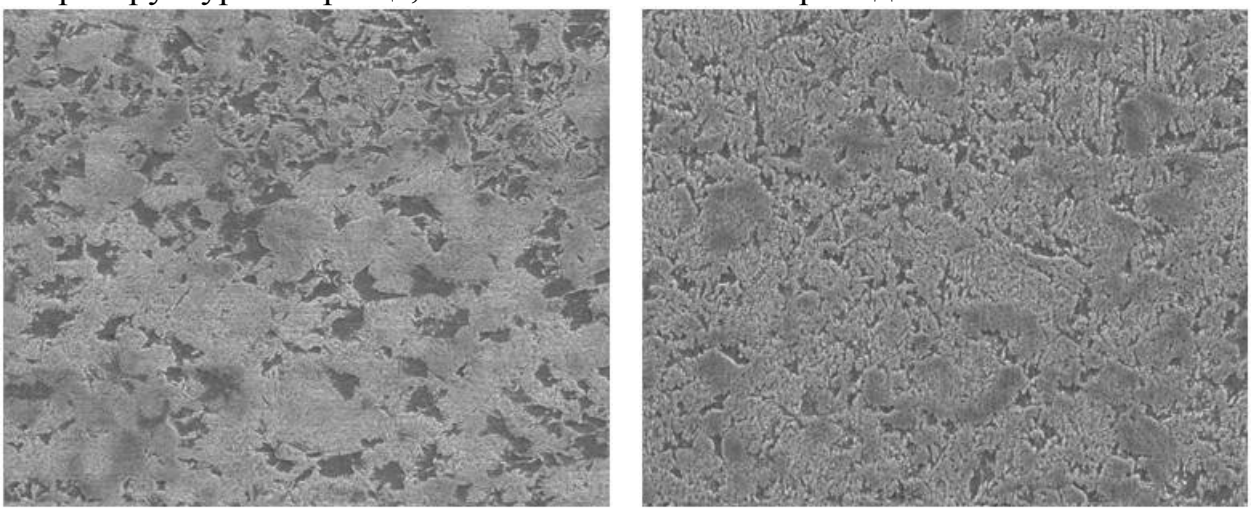
Данные таблицы 4 свидетельствуют о том, что наилучшие показатели механических свойств были получены на образцах с маркировкой $Н_3$ и $М_3$, восстановленных в 3 прохода, толщиной наплавленного слоя 2-3 мм на сторону. У образцов, восстановленных в один и два прохода наплавленным слоем большей ширины, характеристики прочности и пластичности не удовлетворяют требованиям стандарта. Микроструктура наплавленного слоя состоит преимущественно из сорбита с отдельными участками феррита и перлита. Ширина зоны термического влияния растёт при повышении толщины наплавленного слоя на сторону до 9-10 мм, и пропорционально падает в случае уменьшения толщины слоя до 3 мм при увеличении количества слоёв. Наименьшая ширина зоны термического влияния (2-3 мм) была зафиксирована в образцах, восстановленных в три прохода. Панорамные фотографии зоны термического влияния образца, восстановленного в один и в три прохода с индукционном подогревом до 250 ^{o}C, представлены на рисунке 6 (а, б).

а)

б)

Рисунок 6 – Панорамы зон термического влияния образцов, восстановленных с применением индукционного подогрева до 250 °С при различных режимах (а – в один проход, толщиной 9-10 мм, б – в три прохода, толщиной 2,5-3мм каждый)

На рисунке 7 (а, б) представлены фотографии микроструктуры зоны термического влияния этих же образцов. Видно, что микроструктура образца, восстановленного в один проход, значительно более грубая по сравнению с микроструктурой образца, восстановленного в 3 прохода.



а) зона термического влияния б) зона термического влияния

Рисунок 7 - Микроструктура ЗТВ образцов, восстановленных при различных режимах (а – в один проход 9-10 мм, б - в три прохода по 2,5-3 мм)

Следует отметить тот факт, что уровень механических характеристик, установленных для новых замковых соединений ГОСТ 27843, был достигнут только после получения в металле восстанавливаемых замковых соединений микроструктуры сорбита. При этом режим наплавки включал применение защитной среды из смеси флюсов ЭЛЗ-ФКН-1/55(Б) и 48 ОФ-10 в соотношении 1:1, предварительный подогрев ремонтного изделия в индукторе до температуры 250 °С, прокалку флюса при температуре 350°С перед наплавкой, а также ограничение максимальной толщины единовременно наплавляемого слоя 3 мм в пользу увеличения количества таких слоёв до трёх.

Сравнительный анализ экспериментальных данных с данными, полученными после построения тепловой модели, приведен на рисунках 8-10. Полученная модель пригодна для качественной оценки температурного поля

в процессе наплавки, и остаточных напряжений после проведения наплавки в зависимости от толщины наплавленного слоя и температуры предварительного подогрева перед восстановлением.

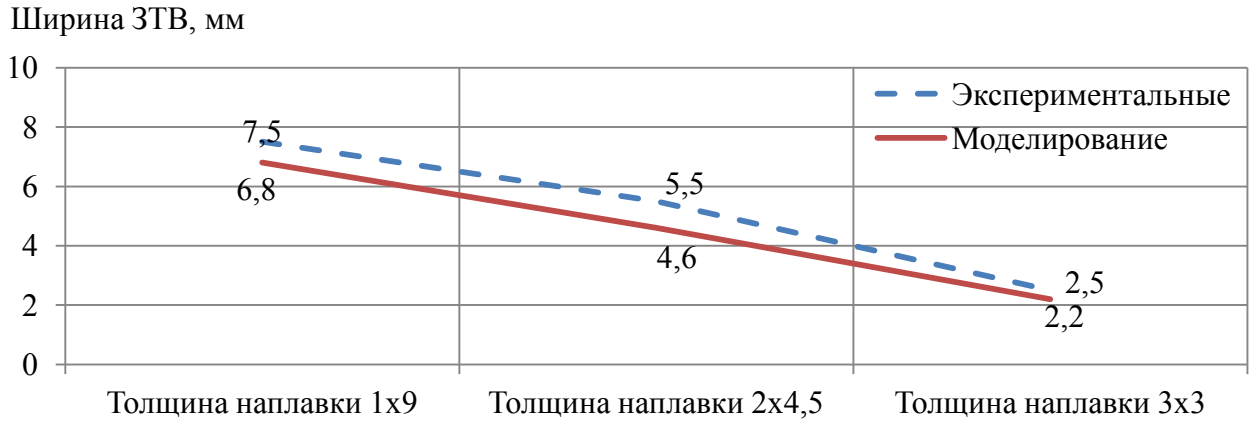


Рисунок 8 – Зависимость ширины ЗТВ от толщины наплавленного слоя $h_н$

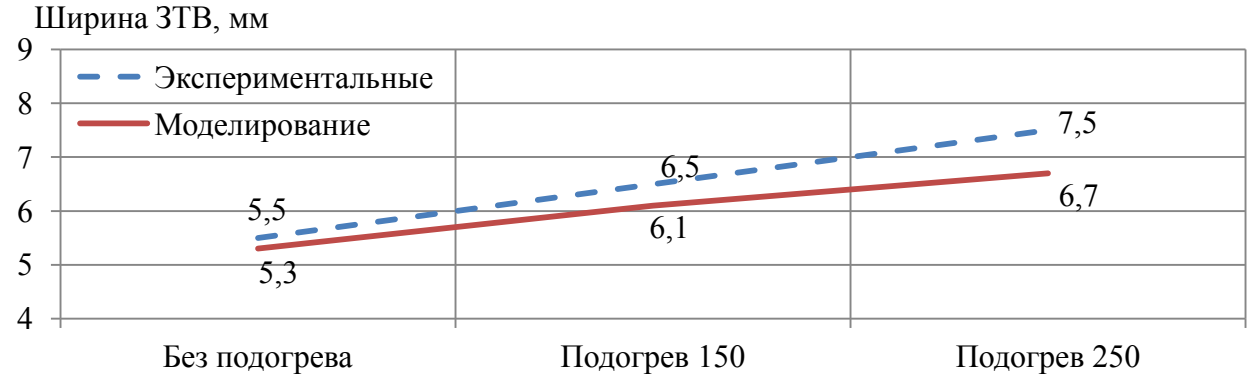


Рисунок 9 – Зависимость ширины ЗТВ от величины предварительного подогрева T_0

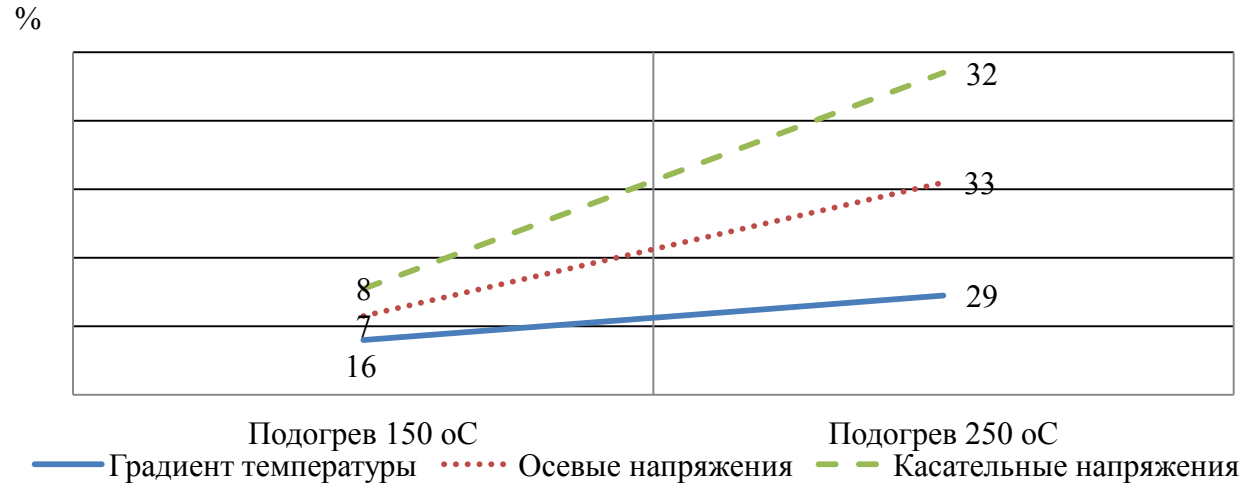


Рисунок 10 – Зависимость снижения (в %) остаточных напряжений и градиента температуры от величины предварительного подогрева

Пятая глава посвящена стендовым испытаниям на осевую нагрузку и усталость бурильных труб после восстановления электродуговой наплавкой. Целью стендовых испытаний являлось определение степени разупрочнения областей высадки и сварного шва по отношению к металлу тела трубы, а также определение области разрушения восстановленной бурильной трубы при достижении критических нагрузок.

Для испытаний на осевую нагрузку были отобраны три ниппельных конца (идентификационные номера 8Н, 7Н, 20Н) от бурильных труб ПК 127×9 мм группы прочности «Д», три муфтовых конца (идентификационные номера 1М, 2М и 3М) от бурильных труб ПН 89×9 мм группы прочности «Д». Испытание образцов проводилось на универсальном стенде УС-600 для испытания труб и спуско-подъёмного инструмента на растяжение и сжатие в соответствии с принятой методикой. За результат испытания принималось соблюдение критерия достаточности прочности труб с приварными замками, т.е. прочность тела трубы должна быть выше прочности сварного соединения. В таблице 6 представлены результаты испытаний на растяжение бурильных труб в виде нагрузки, при которой произошло разрушение натурного образца, а также расчетные характеристики нагрузки. Из данных таблицы 6 следует, что все испытуемые образцы выдержали испытания.

Таблица 6 - Экспериментальные и расчетные значения нагрузки разрушения растяжением образцов бурильных труб

Маркировка	**Значения нагрузок до разрушения, т**		
	Расчетные		**Экспериментальные**
	Сварной шов	**Тело трубы**	
Значения прочностных характеристик образцов бурильных труб ПК 127 х 9 мм "Д"			
8Н	423,5	238,8	298
7Н	425,6	210,4	303
20Н	426,8	217,3	301
Значения прочностных характеристик образцов бурильных труб ПН 89 × 9 мм "Д"			
2М	265,8	167,5	210
1М	268,9	173,2	196
3М	273,8	178,1	204

Разрушений образцов по зоне термического влияния наплавленного слоя не происходило. Следует отметить, что экспериментально полученные значения нагрузки разрушения во всех случаях превышали расчетные, что характеризует высокий уровень запаса прочности бурильной трубы.

Для испытаний на усталость были отобраны семь образцов от бурильных труб ПК 127×9 мм группы прочности «Д» в виде компоновок ниппельного и муфтового конца, свинчиваемых в дальнейшем между собой в процессе испытаний. Испытаниям подвергались компоновки образцов со следующими идентификационными номерами 1Н – 3М, 9Н – 10М, 13М – 14Н, 6М – 11Н, 16М – 12Н, 17М – 4Н, 19М – 14Н, в которых первым указывается испытуемый конец (Н – ниппельный, М – муфтовый). Испытание образцов проводилось на универсальном стенде СТ-20 для определения предела выносливости образцов бурильных труб при знакопеременном изгибе в соответствии с принятой методикой. Результаты испытаний приведены в таблице 7. Из данных таблицы 7 видно, три образца из семи выдержали базовое число циклов нагружения для стали (10×10^6 циклов) при приложении напряжений знакопеременного изгиба в диапазоне 10…13 кг/мм^2. Четыре образца из семи разрушились досрочно по основному телу вследствие наличия дефектов в виде скрытых трещин. Разрушений образцов по зоне термического влияния наплавленного слоя не происходило.

Таблица 7 - Результаты стендовых испытаний образцов бурильных труб ПК 127×9мм группы прочности "Д" на знакопеременный изгиб (усталость)

№ п/п	Компоновка образцов	Число циклов, которое выдержал образец	Результат испытаний
1	1Н – 3М	$0{,}8 \times 10^6$	Слом по дефекту в стенке трубы
2	9Н – 10М	$1{,}3 \times 10^6$	Слом по дефекту в стенке трубы
3	13М – 14Н	10×10^6	Испытания выдержал
4	6М – 11Н	10×10^6	Испытания выдержал
5	16М – 12Н	$0{,}9 \times 10^6$	Слом по дефекту в стенке трубы
6	17М – 4Н	$0{,}5 \times 10^6$	Слом по дефекту в стенке трубы
7	19М – 14Н	10 × 106	Испытания выдержал

Полученные в ходе стендовых испытаний сведения были использованы при разработке руководства по эксплуатации стальных бурильных труб с приваренными замками после ремонта в части восстановления замковых соединений методом наплавки.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. На основе классической теории теплопроводности построена простейшая тепловая модель процесса нагрева стенки замка при наплавке с учетом теплопередачи от расплава наплавляемого слоя к стенке, а затем от закристаллизовавшегося наплавленного слоя к стенке. Данная модель позволяет рассчитать температурное поле в теле замка и оценить толщину зоны термического влияния, а по изменению градиента температуры оценить изменение остаточных напряжений при изменении толщины наплавленного слоя и температуры предварительного подогрева перед восстановлением.

2. Исследование влияния защитной среды показало, что наилучшие результаты в отношении обеспечения надёжной защиты от окисления и подстуживания, механических свойств для хорошей обрабатываемости получаются при использовании смеси керамического флюса ЭЛЗ–ФКН–1/55(Б) и плавленого флюса 48 ОФ–10 в соотношении 1:1.

3. По результатам исследований остаточных напряжений в металле замков после восстановления было установлено положительное влияние предварительного подогрева на снижение их уровня. Рекомендовано применение подогрева до температуры 250±50^{o}С.

4. Экспериментально установлено, что толщина единовременно наплавляемого слоя не должна превышать 2–3 мм, и потому для получения наплавленного слоя толщиной 10 мм (при максимальном износе замка) должно последовательно наплавляться 3–4 слоя.

5. С учетом предложенных рекомендаций в металле ремонтных замков был достигнут уровень механических свойств, соответствующих ГОСТ 27834 для новых замков. Кроме того, в наплавленного слое и зоне термического влияния (ЗТВ) была получена микроструктура сорбита, наиболее близкая к микроструктуре металла замка в состоянии поставки. Ширина ЗТВ при этом была уменьшена более чем в три раза по сравнению с шириной ЗТВ до введения рекомендаций.

6. Испытания натурных образцов восстановленных бурильных труб на осевое растяжение и циклическую усталость показали, что разупрочнения в сварном соединении и области высаженной части не происходит, и восстановленные электродуговой наплавкой бурильные трубы могут быть использованы во всём диапазоне эксплуатационных нагрузок для новых труб.

7. Материалы диссертационного исследования были использованы при разработке и внедрении в ООО «БУР СЕРВИС» и ООО «ТМС–Буровой сервис» технических условий ТУ 1324-003-37072885-2015 и руководства по эксплуатации БТ. 3369-01 РЭ для стальных бурильных труб с приваренными замками после ремонта в части восстановления замковых соединений методом наплавки, что подтверждено соответствующими актами о внедрении.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Амосов А.П., Михеев Д.А. Оптимизация технологии восстановления замковых соединений бурильных труб методом наплавки // Ежемесячный научно-технический и производственный журнал «Наукоёмкие технологии в машиностроении». – Машиностроение. – 2015 г., №1. С.41 – 47.

2. Амосов А.П., Михеев Д.А. Оптимизация режима предварительного подогрева при восстановлении замковых соединений бурильных труб методом наплавки - Экспозиция нефть, газ, 2015. – №4 (43). С.23 – 25.

3. Амосов А.П. Михеев Д.А., Подбор оптимальной толщины наплавочного слоя при восстановлении замковых соединений бурильных труб // Ежемесячный научно-технический и производственный журнал «Наукоёмкие технологии в машиностроении». – Машиностроение. – 2015 г., №12. С.22 - 25.

4. Михеев Д.А., Восстановление замковых соединений бурильных труб методом наплавки // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия Технические науки. №1. Самара, 2016. С.143-148.

5. Михеев Д.А., Стендовые испытания замковых соединений бурильных труб после восстановления наплавкой // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия Технические науки. №4. Самара, 2016. С.139-146.

Публикации в других изданиях

1. Михеев Д.А., Подбор защитной атмосферы при восстановлении замковых соединений бурильных труб// Сборник научных статей IV-ой Международной научно-практической конференции 17-18 октября 2014 года «Перспективное развитие науки, техники, технологий», Курск, 2014. С.226 – 230.

2. Михеев Д.А., Оптимизация технологии восстановления бурильных труб методом наплавки// Материалы IV Международной научно-практической конференции (Москва, 22 сентября 2014 г.). «Современные научные исследования: методология, теория, практика», М.: Грифон, 2014. С.129 – 136.

3. Михеев Д.А., Отработка режима предварительного подогрева в ходе восстановительного ремонта бурильных труб // Материалы V всероссийской с международным участием научно-практической конференции 29 июня

2015г. «Актуальные исследования гуманитарных, естественных, общественных наук», Новосибирск. – 2015. С.128 – 142

4. Михеев Д.А., Амосов А.П. Математическое моделирование процесса наплавки при восстановительном ремонте замковых соединений бурильных труб// Труды международной научно-практической конференции ОАО "РосНИТИ", НО "ФРТП" 20 сентября 2016 г. «Трубы 2016» Открытое акционерное общество "Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности" (Челябинск). С.129 – 132.

5. Михеев Д.А., Амосов А.П. Исследование аварийных муфт замков бурильных труб, восстановленных наплавкой// Материалы Всероссийской научно – технической интернет – конференции 25 – 28 октября 2016 г. « ВЫСОКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ» – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2016. С.207 – 209.

Научное издание

Михеев Дмитрий Алексеевич

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук на тему:
Материаловедческое исследование восстановленных электродуговой наплавкой замковых соединений бурильных труб

Подписано в печать 12.09.2018.
Формат 60 х 90 1/16. Набор компьютерный.
Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ 524.

Отпечатано на ризографе.
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»
Отдел типографии и оперативной печати
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244.