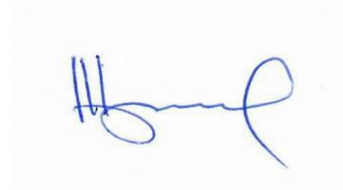


На правах рукописи



Жуков Александр Сергеевич

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ
ГОРЯЧЕПРЕССОВАННЫХ ТРУБ ИЗ СЛОЖНОЛЕГИРОВАННЫХ
СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ РАЗРУШЕНИЯ
МЕТАЛЛОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ ДАВЛЕНИЕМ

Специальность 2.6.4. Обработка металлов давлением

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Челябинск – 2026

Работа выполнена на кафедре процессов и машин обработки металлов давлением в ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель:

Выдрин Александр Владимирович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой процессов и машин обработки металлов давлением ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», г. Челябинск.

Официальные оппоненты:

Рааб Георгий Иосифович – доктор технических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией «Механика градиентных, бимодальных и гетерогенных металлических наноматериалов повышенной прочности и пластичности для перспективных конструкционных применений им. А.П. Жилиева» ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

Шимов Георгий Викторович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры обработки металлов давлением ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»,

Защита диссертации состоится «14» октября 2026 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета 24.2.437.01 при Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ЮУрГУ(НИУ), главный корпус, ауд. 1007.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)» и на сайте: <https://www.susu.ru/ru/dissertation/24243701-d-21229801/zhukov-aleksandr-sergeevich>

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, просьба направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ЮУрГУ (НИУ), Ученый совет. Тел. (351) 267-91-23, Кафедра Процессы и машины обработки металлов давлением. Тел. (351) 265-59-57, e-mail: vydrinav@susu.ru

Автореферат разослан « » 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



Н.А. Шабурова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время для производства бесшовных стальных труб из трудно-деформируемых сталей и сплавов достаточно широко применяется процесс прессования.

К достоинствам этого процесса можно отнести следующее:

1. благоприятную схему напряженно-деформированного состояния, позволяющую деформировать малопластичные металлы и сплавы;
2. технологическую мобильность прессовых установок, благодаря которой облегчается переход на производство труб с одного размера на другой;
3. возможность получения на прессовых установках кроме труб, и других изделий в виде сплошных и полых профилей различного сечения, в том числе биметаллических;
4. стоимость сменного инструмента (матриц и игл) гораздо ниже стоимости технологического инструмента прокатных станов;
5. отпрессованные профили имеют более высокое качество поверхности, обладают более однородными свойствами по сечению и длине, а также имеют более жесткие допуски геометрических размеров.

Процесс производства стальных труб способом прессования появился сравнительно недавно. Первый патент на этот способ был получен братьями Маннесман в 1901 году. Первый механический пресс для производства стальных труб был построен в 1928 году в Германии. В 1931 г. Ф. Зингеру в Германии был выдан патент на способ прессования стальных труб на механических прессах. До 1941 г. в Германии было построено семь механических прессов усилием от 6 до 15 МН.

Однако массовое применение процесса прессования для производства стальных бесшовных труб в промышленных масштабах началось только со второй половины XX столетия.

Во многом это произошло благодаря разработке и освоению французской фирмой «Comptoir d'Etirage» (директор – Жак Сежурне) производства стеклянных смазок, обеспечивших существенное улучшение условий контактного взаимодействия деформируемого металла и технологического инструмента.

В Российской Федерации процесс производства труб на прессах начал применяться в середине 80-х годов XX века на Волжском трубном заводе (в настоящее время АО «ВТЗ»).

Опыт эксплуатации прессовых линий усилием 20 МН и 55 МН в АО «ВТЗ» выявил ряд недостатков процесса, проявляющихся, в первую очередь, при прессовании бесшовных труб из коррозионно-стойких высоколегированных марок

стали и сплавов. К ним относится, прежде всего, появление дефектов на наружной и внутренней поверхностях труб.

Поскольку трубы из таких марок стали востребованы в нефтяной, энергетической и ряде других отраслей экономики, задача повышения качества поверхности горячепрессованных труб с низким расходным коэффициентом металла является актуальной.

В представленной работе объектом исследования является технология прессования труб из сложнолегированных сталей и сплавов, а предметом – исследование влияния деформационных режимов прессования на качество поверхности труб из этих сталей и сплавов.

Целью диссертационной работы является разработка технических решений, обеспечивающих получение горячепрессованных труб из коррозионно-стойких легированных марок стали без дефектов наружной поверхности в виде нарушений сплошности.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ факторов, определяющих вероятность появления дефектов поверхности горячепрессованных труб.

2. Провести компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния поверхностных слоев прессуемой гильзы.

3. Выявить зависимости характеристик напряженно-деформированного состояния металла в очаге деформации от технологических параметров процесса прессования.

4. Провести исследование пластичности сталей специального назначения в горячем состоянии.

5. Разработать комплекс технологических решений, обеспечивающих снижение вероятности появления дефектов поверхности на горячепрессованных трубах.

6. Провести натурные испытания технологии изготовления прессованием труб из сложнолегированных марок стали и сплавов с использованием технологических решений, разработанных в ходе проведенных исследований.

Научная новизна работы:

1. При моделировании горячей деформации по трем схемам нагружения (растяжение, кручение, одноосное сжатие) с использованием универсального исследовательского комплекса Gleeble 3800 выявлена зависимость пластичности сложнолегированных современных трубных марок стали 10X13H3MФБ, 15X13H2, 08X18H10T, 10X17H13M2T, от схемы напряженного состояния, охватывающей диапазон изменения коэффициента напряженного состояния от 0 до 0,58 и температуры деформации в диапазоне от 1000°C до 1200°C. У всех марок стали

повышение температуры испытаний до 1200°C приводило к росту пластичности, а при температурах выше 1200°C наблюдалось снижение пластичности испытанных хромосодержащих марок стали вследствие подтвержденного металлографическими исследованиями появления δ -феррита.

2. Впервые на основе компьютерного моделирования в пакете программ QForm получены закономерности изменения вдоль очага деформации показателя напряженного состояния, накопленной степени деформации и температуры, учитывающие влияние коэффициента трения и формы технологического инструмента. Показано, что значительное влияние на напряженное состояние оказывает коэффициент трения, увеличение которого приводит к росту растягивающих напряжений на выходе из очага. Показатель напряженного состояния в пределах 80% длины очага деформации существенно ниже нуля, поэтому в этой зоне сталь находится фактически в условиях сверхпластичности без накопления поврежденности, а появление дефектов определяется поведением металла в выходной части очага деформации.

3. Впервые определена связь характеристик напряженно-деформированного состояния с вязкостью применяемых при прессовании расплавов стеклосмазок.

Практическая значимость:

1. Сформулированы на основе комплекса исследований в лабораторных и производственных условиях требования к вязкости стеклосмазочных материалов, их гранулометрическому составу и предпочтительному температурному режиму для получения качественной наружной поверхности труб.

2. Предложена универсальная формула для аппроксимации диаграмм пластичности металлов и сплавов при горячем деформировании, работоспособность которой получила практическое подтверждение.

3. Определена форма матрицы, минимизирующая вероятность появления трещин на наружной поверхности горячепрессованных труб. Предложенная коническая матрица с углом конусности 28° принята для использования в ТПЦ-2 АО «ВТЗ» при прессовании на всем профильно-марочном составе сортамента труб, в том числе из сталей с низкой пластичностью.

4. Разработана технология производства горячепрессованных труб из малопластичных марок стали на прессе 55 МН АО «ВТЗ», позволившая практически полностью исключить ручной труд по зачистке поверхностных дефектов. Суммарный экономический эффект за 2022-2025 годы от внедрения предложенных технологических решений составил более 43 млн. рублей.

Методология и методы исследования

Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния процесса прессования осуществлялось в программном комплексе QForm-3D методом конечных элементов. При этом предварительно создавались твердотельные трехмерные модели на основе конструкторской документации АО «ВТЗ» с использованием программы трехмерного проектирования CAD Компас-3D. Для оценки вероятности трещинообразования на наружной поверхности труб использован критерий разрушения В.Л. Колмогорова. Для построения диаграмм пластичности, учитывающих влияние температуры, проведены испытания на горячее растяжение, кручение и сжатие образцов в диапазоне температур от 1000°C до 1200°C из сложнолегированных марок стали 10X13H3МФБ, 15X13H2, 08X18H10T, 10X17H13M2T с использованием комплекса Gleeble 3800. Исследование микроструктуры образцов после испытания на горячее растяжение и кручение проводилось на оптическом микроскопе Axiovert 40MAT. Исследования влияния гранулометрического состава и вязкости стеклосмазок при прессовании труб проводились в условиях ТПЦ-2 АО «ВТЗ» на прессе усилием 20МН с фиксацией значений температур гильз на столе стеклосмазки и диаграммы усилий, по которым определяли максимальное усилие в период заполнения очага деформации, а также усредненное усилие при установившейся стадии процесса прессования.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Параметрические уравнения влияния условий деформирования на изменение показателя напряженного состояния (σ/T), степени и температуры деформации по длине очага деформации.
2. Диаграммы пластичности для стали марок 10X13H3МФБ, 15X13H2, 08X18H10T, 10X17H13M2T, учитывающие температуру деформации и показатель напряженного состояния, полученные с использованием результатов испытаний на горячее растяжение и сжатие.
3. Методика оценки степени исчерпания ресурса пластичности при горячем деформировании и полученные на ее основе результаты.
4. Комплекс технических решений, обеспечивших получение горячепрессованных труб из малопластичных марок стали без дефектов, исключаящий применение ручного труда для отделки наружной поверхности труб.

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность результатов исследований обеспечивалась применением стандартных научных методов с использованием современного оборудования и подтверждалась соответствием результатов теоретических исследований лабораторным и промышленным экспериментам. Достоверность результатов

нашла положительную оценку в процессе обсуждения на научных конференциях и семинарах. Основные результаты диссертационной работы были представлены и обсуждены на конференциях: Международная научная конференция «Современные материалы и передовые производственные технологии (СМПТТ-2019)» (Санкт-Петербург, 2019); 13-я научная конференция аспирантов и докторантов ЮУрГУ (Челябинск, 2021); 79-я Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы современной науки, техники, образования» (Магнитогорск, 2021); Международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» (Екатеринбург, 2021); Международная научно-практическая конференция «Трубы-2021» (Челябинск, 2021); XIII Международный конгресс прокатчиков (Москва, 2022).

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 11 научных работ, в том числе 4 статьи – в реферируемых журналах из перечня ВАК при Минобрнауки РФ, 5– статей в зарубежных журналах, входящих в реферативные базы Scopus и Web of Science. Получен патент РФ на изобретение.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность области исследования, отражена степень разработанности темы исследований, сформулированы цель и задачи работы, обозначена научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы.

В **первой главе** проведен анализ видов дефектов, образующихся на поверхности полученных горячим прессованием труб, выявлены факторы, определяющие качество поверхности труб при горячем прессовании, в том числе режимы нагрева заготовок; состав, вязкость и способ нанесения технологических смазок; профилировка и состояние технологического инструмента; параметры деформации (скорость прессования, зазор между гильзой и иглой); физические и структурные особенности прессуемого материала; режимы проведения операций охлаждения и отделки. Проанализированные работы, посвященные методикам расчета вероятности появления дефектов в горячепрессованных трубах, показано, что в настоящее время для оценки вероятности разрушения металла в процессах пластической деформации наибольшее распространение получили методики В.Л. Колмогорова и А.А. Богатова, а также методика Кокрофта-Латама. В соответствии с методиками В.Л. Колмогорова и А.А. Богатова для оценки вероятности появления разрывов и трещин на поверхности горячепрессованных труб можно применять величину отношения накопленной степени деформации к величине пластичности металла (степень использования ресурса пластичности или поврежденность металла). Считается, что разрушение металла наступает при достижении величины степени использования ресурса пластичности значения 1,0. Для оценки вероятности появления разрывов и трещин на поверхности горячепрессованных труб необходимо экспериментально получить диаграмму пластичности (зависимость пластичности металла от влияющих на нее термомеханических параметров) и расчетным путем определить напряженно-деформированное состояние металла при прессовании. Методика А.А. Богатова и С.В. Смирнова позволяет дополнительно учесть восстановление пластических свойств холоднодеформированного металла после разупрочняющей термической обработки.

Анализ научно-технической литературы показал, что физическое и математическое моделирование являются перспективными инструментами для оценки степени использования ресурса пластичности в процессе горячего прессования труб.

Вторая глава посвящена анализу напряженно-деформированного состояния (НДС) металла при горячем прессовании труб на основе компьютерного

моделирования методом конечных элементов с использованием программного продукта QForm-3D. Целью компьютерного моделирования процесса горячего прессования являлось численное определение влияния коэффициента вытяжки, температуры и коэффициента трения на характеристики напряженно-деформированного состояния металла поверхностных слоев гильзы. Моделировался процесс прессования заготовок из стали марки 08X18H10T с известным сопротивлением пластической деформации. Анализ таблиц прессования, применяемых в АО «Волжский трубный завод», показал, что коэффициент вытяжки при прессовании труб изменяется от 6,3 до 36,6; температура прессования труб из высоколегированных марок сталей находится в интервале 1100-1200°C, а коэффициент трения с учетом использования стеклосмазки может изменяться в диапазоне 0,06-0,12. Твердотельные модели процесса прессования созданы на основе конструкторской документации АО «ВТЗ», при этом приняты упрощения, не оказывающие существенное влияние на результат расчета. Для определения изменения НДС на наружной поверхности металла по длине очага деформации использовалась трассирующая точка, нанесенная на первом шаге на наружную поверхность гильзы. В процессе моделирования точка проходила всю длину очага деформации, и программа фиксировала термомеханические параметры в ее окрестностях с привязкой ко времени или координате.

Пример визуализация распределения средних нормальных напряжений по сечению очага деформации при различном коэффициенте трения представлены на рис. 1.

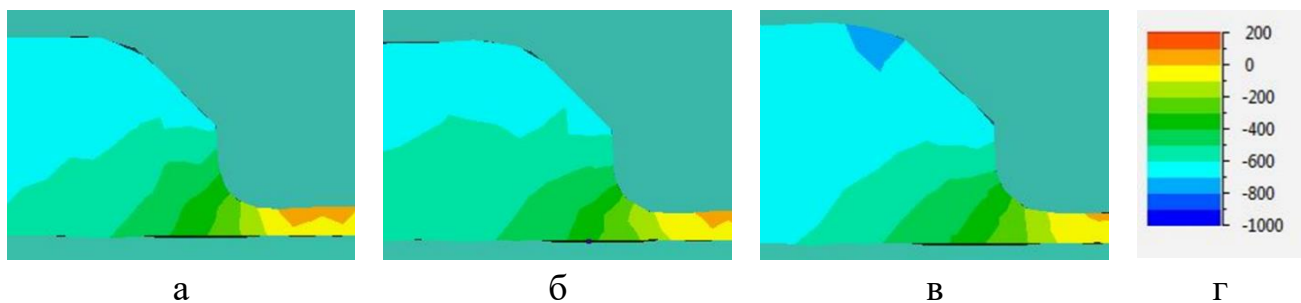


Рисунок 1 – Распределение средних нормальных напряжений в металле по продольному сечению очага деформации при коэффициенте трения: а – 0,06; б – 0,10; в – 0,14; г – шкала визуализации напряжений, МПа

При определении изменения степени деформации и коэффициента жесткости напряженного состояния трубы по длине очага деформации в приконтактном слое использовалась относительная координата, представляющая собой отношение текущей продольной координаты точки к длине очага деформации (рис. 2 и рис. 3).

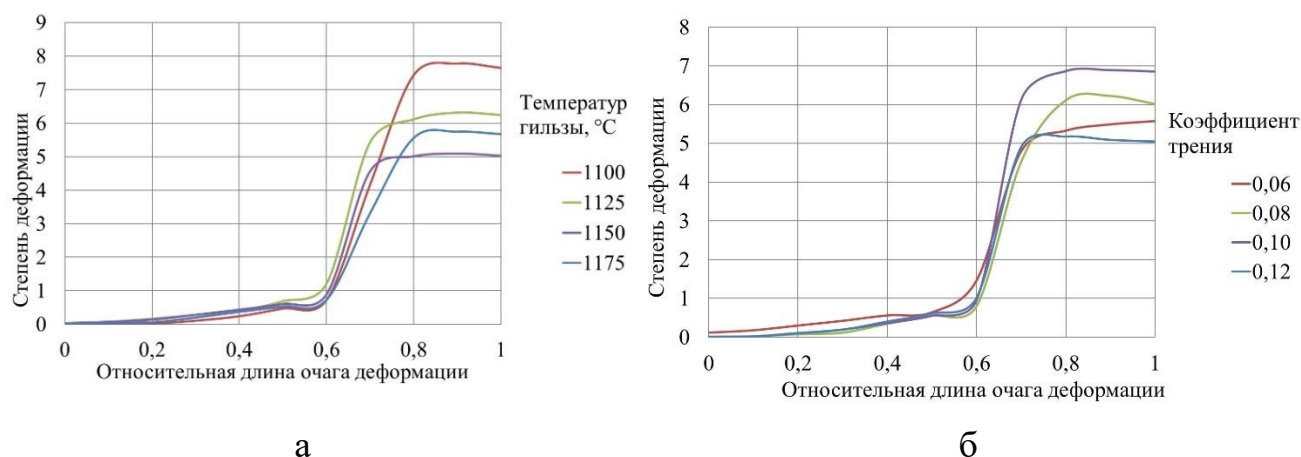


Рисунок 2 – Изменение накопленной степени деформации в наружной поверхности трубы по длине очага деформации при различных параметрах: а – температура гильзы; б – коэффициент трения

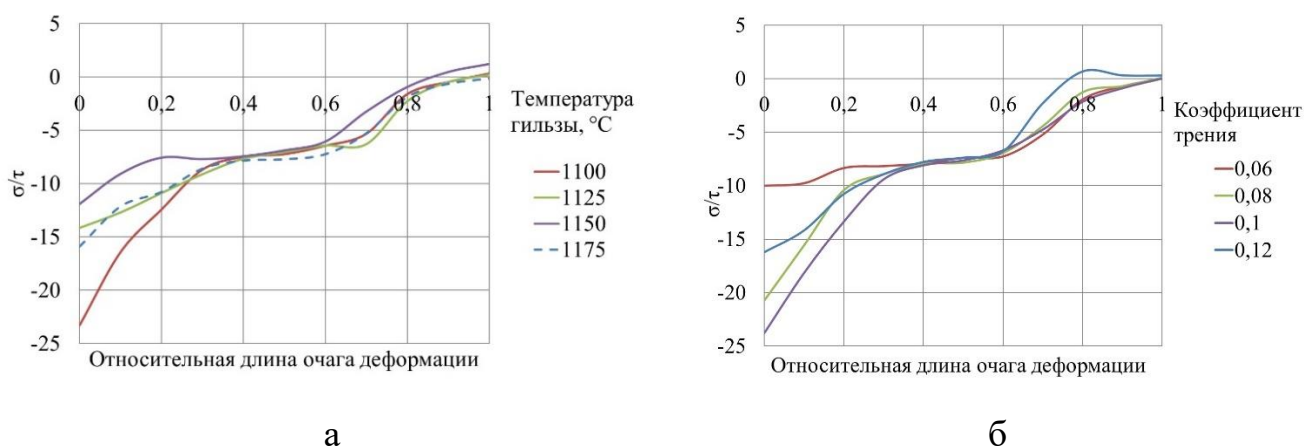


Рисунок 3 – Изменение коэффициента жесткости напряженного состояния в наружной поверхности трубы по длине очага деформации при различных параметрах: а – температура гильзы; б – коэффициент трения

Для определения вида численной зависимости представленных графических материалов выполнен регрессионный анализ, позволивший получить систему параметрических зависимостей коэффициента жесткости напряженного состояния, степени деформации и температуры наружной поверхности трубы по длине очага деформации от температуры гильзы, коэффициента трения и коэффициента вытяжки.

С целью определения фактора, оказывающего наибольшее влияние на схему напряженного состояния, получены зависимости показателя жесткости напряженного состояния от технологических параметров на выходе из очага деформации, представленные на рис. 4. Как видно из рис. 4, увеличение коэффициента трения приводит к росту показателя напряженного состояния, в

отличие от коэффициента вытяжки и температуры гильзы. Отсюда следует, что коэффициент трения является наиболее значимым фактором, определяющим вероятность появления дефектов на наружной поверхности труб.

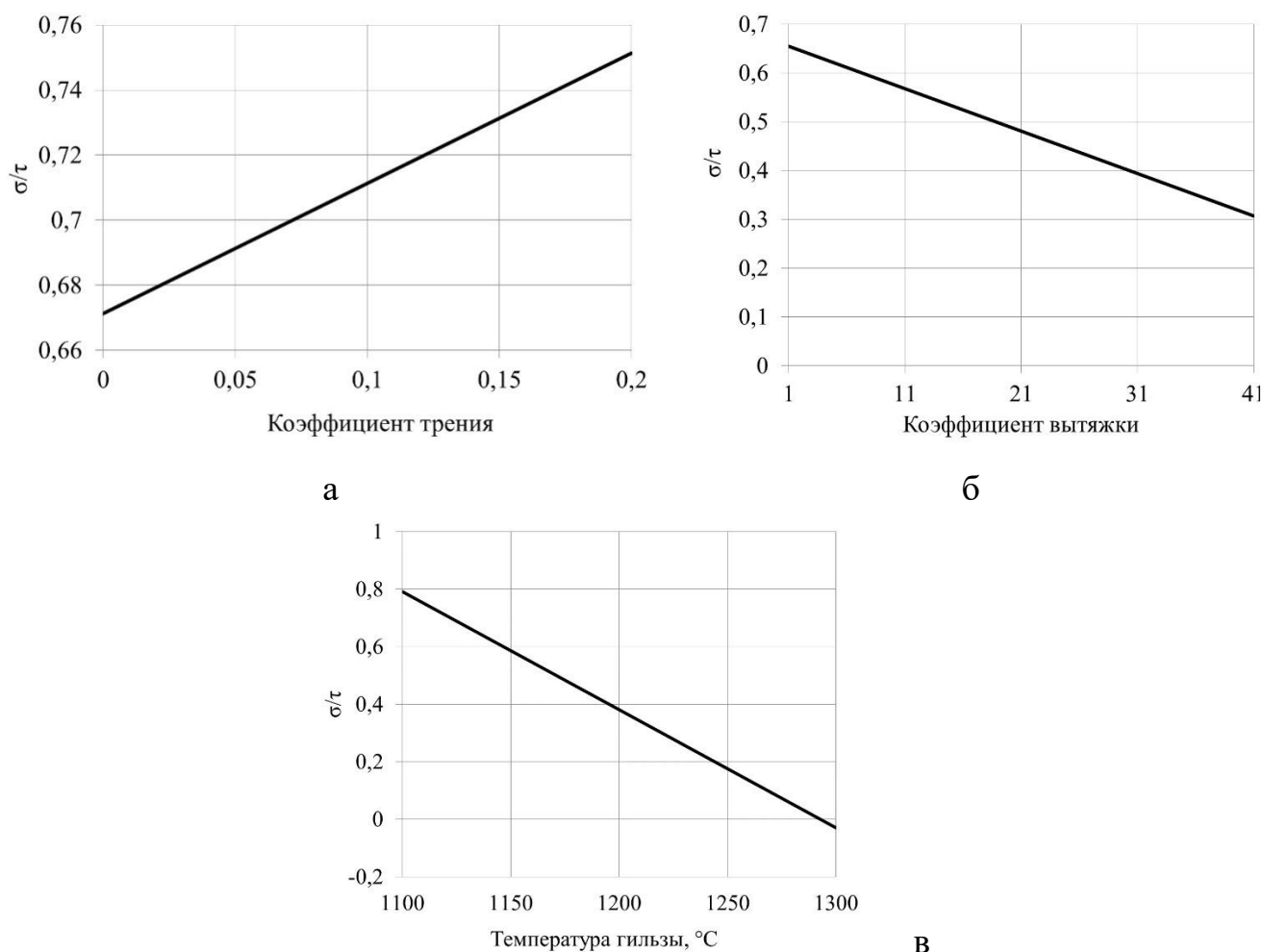


Рисунок 4 – Изменение показателя жесткости напряженного состояния σ/τ на выходе из очага деформации в зависимости от: а – коэффициента трения; б – коэффициента вытяжки; в – температуры гильзы

С использованием полученных зависимостей выполнен тестовый расчет степени использования ресурса пластичности. В качестве модельного материала взята сталь 20, свойства которой при различных температурах хорошо известны. Анализ показал значительное влияние на условия протекания процесса коэффициента трения на поверхности контакта деформируемого металла с инструментом и температуры деформации. На рис. 5 проведена горизонтальная линия значения ресурса пластичности, равного единице, ниже которой находится допустимая область деформации, а выше – область высокой вероятности возникновения дефектов. Пересечение кривых этой линии дает диапазон допустимого коэффициента трения на поверхности контакта металла с матрицей при различных температурах деформации. Для температуры гильзы 1200°C допустимый коэффициент трения $f_m \leq 0,074$, а для температуры 1000°C $f_m \leq 0,024$, то

есть с понижением температуры деформации истощение ресурса пластичности происходит интенсивнее, что приводит к необходимости значительного уменьшения f_m . Это свидетельствует об актуальности вопросов, связанных с подбором эффективных смазочных материалов.

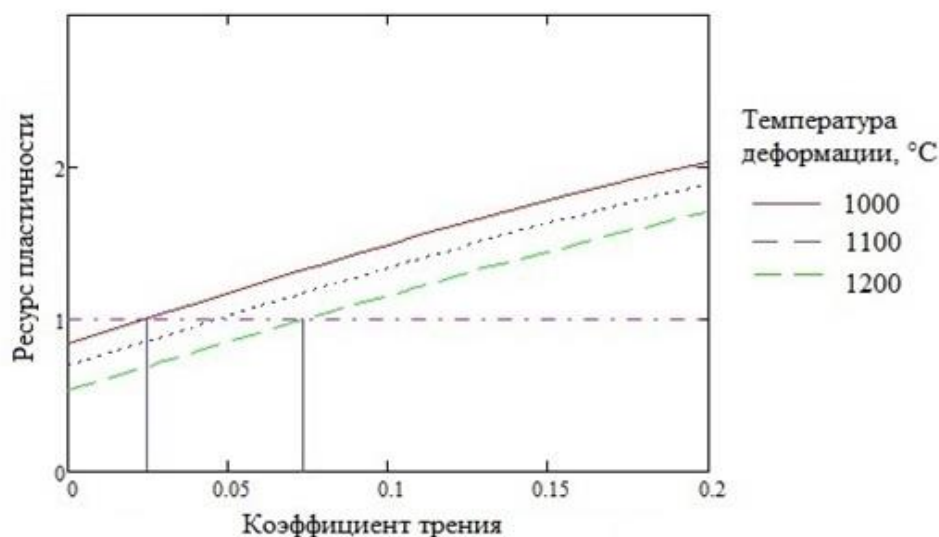


Рисунок 5 - Кривые зависимости ресурса пластичности от коэффициента трения и температуры деформации для модельной стали 20

Третья глава посвящена построению диаграмм пластичности для рассматриваемых марок стали. Образцы изготавливались из стали 15X13H2 (поковки и НЛЗ), а также из непрерывно-литой заготовки из сталей 10X13H3МФБ, 08X18H10Т и 10X17H13M2Т, которые являются наиболее проблемными с точки зрения качества наружной поверхности. Моделирование горячей деформации осуществлялось с использованием универсального исследовательского комплекса Gleeble 3800 по трем схемам: растяжением, кручением и одноосным сжатием (осадкой).

При сжатии образцов в горячем состоянии довести их до разрушения не удалось, и предельная степень деформации в этом случае определяется техническими возможностями испытательной установки. Для повышения точности полученных результатов по пластичности исследованных марок стали проведены дополнительные исследования на кручение при температурах горячей деформации и значении показателя напряженного состояния σ/τ , равном нулю. Данное решение основывается том, что в соответствии с результатами компьютерного моделирования, показатель напряженного состояния в пределах 80% длины очага деформации существенно меньше нуля, и накопление поврежденности там не происходит. Существенным, с точки зрения разрушения, является только поведение

металла в выходной части очага деформации, которой соответствуют положительные значения показателя напряженного состояния.

Проведенный регрессионный анализ экспериментальных результатов позволил получить для различных марок стали коэффициенты уравнений типа

$$\Lambda_p = a_0 \theta^{a_1} \exp \left(a_2 \frac{\sigma}{\tau} \right),$$

где a_0 , a_1 , a_2 – эмпирические коэффициенты, зависящие от физико-химической природы металла или сплава, θ – температура

. Таблица 1 – Уравнения диаграмм пластичности

Марка стали	Зависимость
15X13H2	$\Lambda_p = 1,693 \frac{\theta}{1000}^{10,88-15,71 \cdot \frac{\sigma}{T}} \times \exp \left(-0,94 \cdot \frac{\sigma}{\tau} \right) \quad (1)$
10X13H3МФБ	$\Lambda_p = 0,89 \frac{\theta}{1000}^{3,35-2,02 \cdot \frac{\sigma}{T}} \exp \left(0,04 \cdot \frac{\sigma}{\tau} \right) \quad (2)$
08X18H10T	$\Lambda_p = 2,55 \frac{\theta}{1000}^{5,73-8,32 \cdot \frac{\sigma}{T}} \exp \left(0,3 \cdot \frac{\sigma}{\tau} \right) \quad (3)$
10X17H13M2T	$\Lambda_p = 2,61 \cdot \frac{\theta}{1000}^{3,51-6,01 \cdot \frac{\sigma}{T}} \exp \left(0,46 \cdot \frac{\sigma}{\tau} \right) \quad (4)$

Четвертая глава описывает результаты разработки и промышленного опробования технических решений по повышению качества поверхности горячепрессованных труб

Моделирование напряженно-деформированного состояния поверхностных слоев заготовки при прессовании позволило определить характер изменения скорости деформации, температуры и показателя напряженного состояния по длине очага деформации. На рис. 6 представлены характерные зависимости изменения скорости деформации, показателя напряженного состояния и температуры заготовки по длине очага деформации. В качестве продольной координаты очага деформации принималась безразмерная величина $\tilde{z}$, равная отношению фактической координаты z к длине очага деформации l .

Для описания изменения показателя напряженного состояния и температуры вдоль очага деформации при прессовании труб, с учетом влияния на них температуры начала прессования и коэффициента трения получены следующие выражения:

$$\frac{\sigma}{T} = \frac{-2,63 - 2,06 \cdot 10^{-1} \theta_{om} - 2,28 f}{1 + \left(\frac{\tilde{z}}{(7,52 \cdot 10^{-1} - 2,07 \cdot 10^{-1} \theta_{om} - 3,04 \cdot 10^{-1} f)} \right)^{(3,07 + 1,84 \theta_{om} - 4,43 f)} + (9,21 \cdot 10^{-1} - 5,99 \cdot 10^{-1} \theta_{om} - 3,06 \cdot 10^{-1} f);} \quad (5)$$

$$\begin{aligned}
 \theta = & (75.3 + 9.36 \cdot 10^2 \theta_{om} + 12.8f) \\
 & + (-9.84 \cdot 10^2 + 6.39 \cdot 10^2 \theta_{om} + 41.8f) \tilde{z} \\
 & + (4.42 \cdot 10^3 - 3.53 \cdot 10^3 \theta_{om} + 1.23 \cdot 10^3 f) \tilde{z}^2 \\
 & + (-2.83 \cdot 10^3 + 2.36 \cdot 10^3 \theta_{om} - 1.05 \cdot 10^3) \tilde{z}^3
 \end{aligned} \tag{6}$$

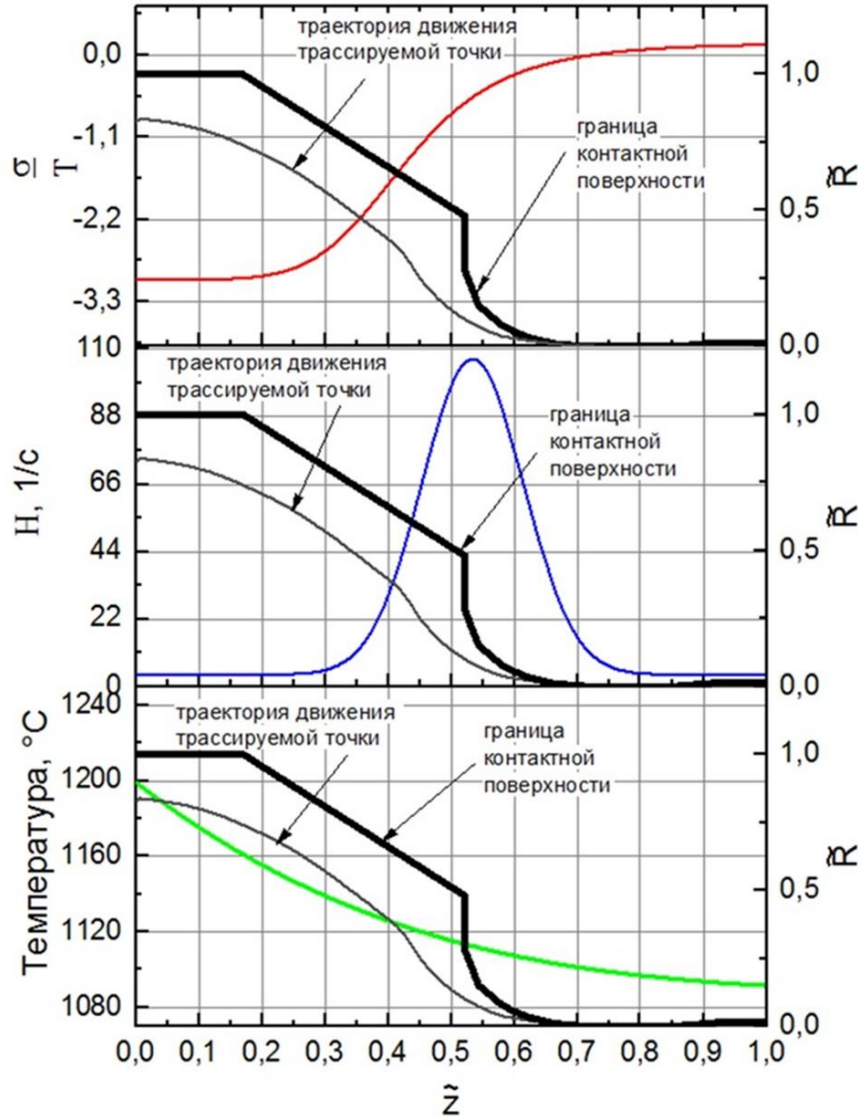


Рисунок 6 – Изменение параметров процесса прессования (показателя напряженного состояния, скорости деформации, температуры) по длине очага деформации

Матрицы являются одним из основных технологических инструментов трубопрессовых установок, определяющих наружный диаметр труб. Поскольку поврежденность металла или степень использования ресурса пластичности при обработке металлов давлением напрямую зависит от характера напряженно-деформированного состояния, можно предположить, что, варьируя форму матрицы, можно оказать влияние на вероятность трещинообразования на поверхности горячепрессованной трубы. Для оценки влияния формы матрицы на

технологические параметры процесса прессования было проведено компьютерное моделирование процесса прессования трубы размером $\varnothing 88,9 \times 6,45$ мм с различными видами профилирования матриц (рис. 7).

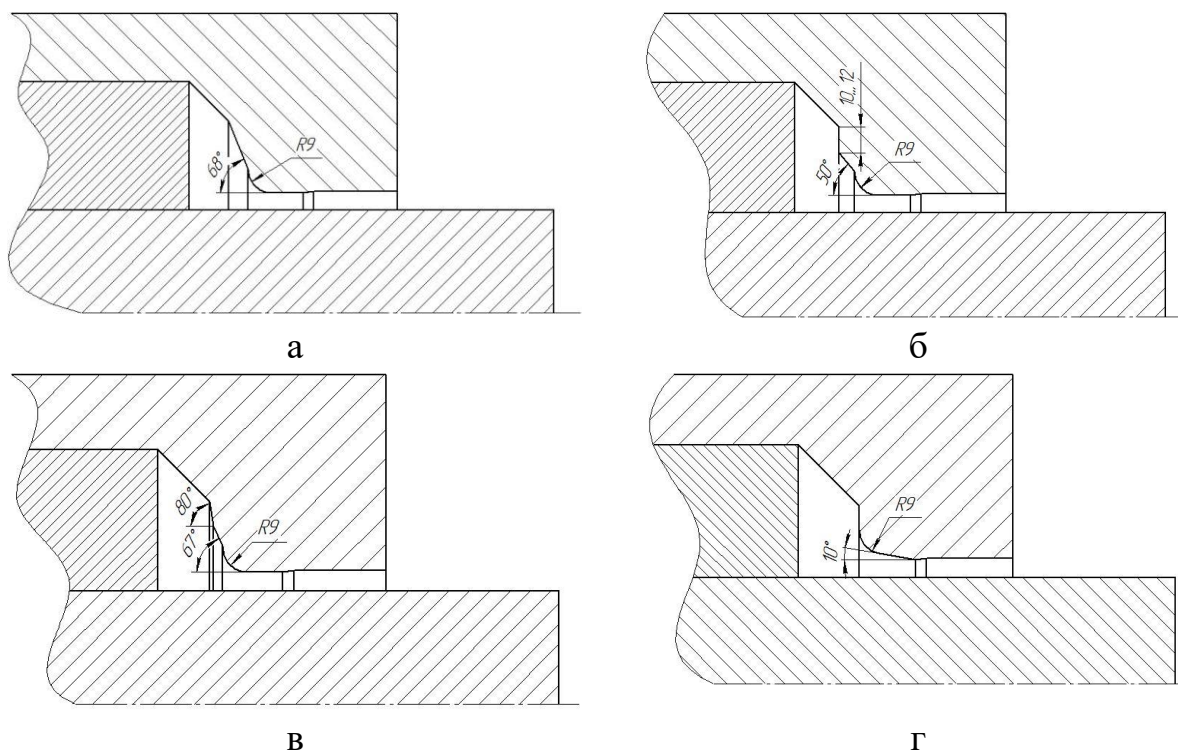


Рисунок 7 – Очаги деформации при прессовании трубы: а - коническая матрица с углом конусности матрицы 59° (М1); б - плоско-коническая матрица с углом конусности 62° (М2); в - матрица с ломанным углом наклона образующей с углом конусности 68° (М3); г - матрица с противодавлением с углом конусности 72° (М4)

Результаты компьютерного моделирования с различными видами матриц для стали 15X13H2 приведены на рис. 8. Линиями М1, М2, М3 и М4 показана степень истощения ресурса пластичности для соответствующих видов матриц, изображенных на рис. 7, а линией М5 - для применяемой в настоящее время матрицы. В случае цилиндрической матрицы приближенно можно отметить, что траектория материальной частицы при подходе к плоской поверхности матрицы поворачивается на 90° , а затем, при подходе к очку матрицы, опять поворачивается на 90° , но уже в другую сторону.

Анализируя рис. 8, видно, что коническая матрица М1 удовлетворяет условию получения труб без дефектов, так как значение степени истощения ресурса пластичности при этом меньше 1,0. Использование плоско-конической матрицы М2 и действующей М5 приводит к незначительному превышению допустимого значения степени истощения ресурса пластичности (на

относительной длине очага деформации свыше 0,9). У матриц М3 и М4 уже при относительной длине очага деформации больше 0,7-0,8 наблюдается превышение допустимого значения истощения ресурса пластичности.

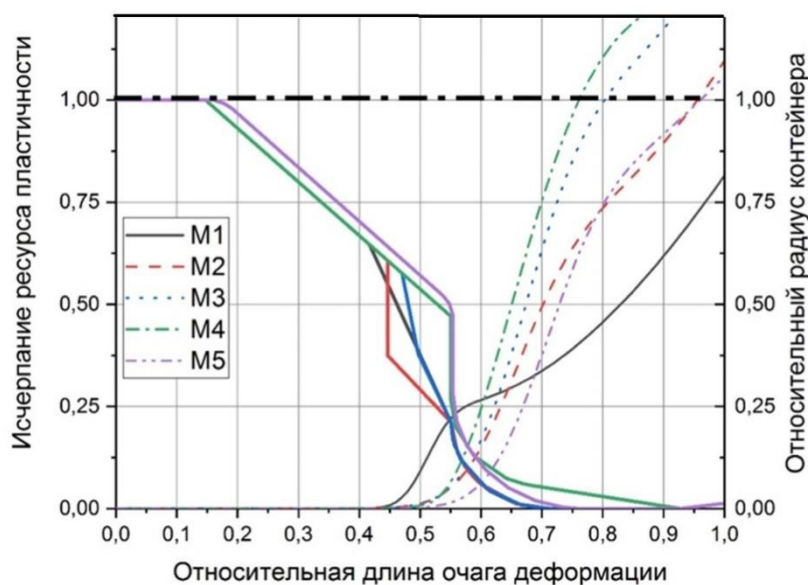


Рисунок 8 – Истощение ресурса пластичности у стали 15X13H2 по длине очага деформации

Аналогично был проведен анализ применимости рассматриваемых матриц для получения труб из других марок стали.

Выполнено экспериментальное исследование процесса прессования с применением различных стеклосмазочных материалов. При прессовании труб из нержавеющей стали 08X18H10T при обработке внутренней поверхности трубы стеклопорошком марки Ф-1 (стандартная стеклосмазка, применяемая при прессовании труб в АО «ВТЗ») уменьшение размера гранул стеклопорошка способствует уменьшению уровня как пикового, так и установившегося усилия прессования. Однако если размер гранул стеклопорошка Ф-1 меньше 0,1 мм, стеклопорошок начинает комковаться, поэтому на внутреннюю поверхность трубной заготовки рекомендовано наносить порошок с размерами гранул 0,1 – 0,25 мм.

Исходя из результатов проведенных исследований, разработаны технические предложения, направленные на устранение поверхностных дефектов в виде трещин: для нанесения на внутреннюю поверхность трубной заготовки стеклопорошок с вязкостью 170 – 250 Па·с, а для изготовления стеклошайб рекомендуется использовать стеклопорошок с вязкостью 115 – 130 Па·с. Эта вязкость соответствует вязкости порошка марки Ф-1. Наибольший эффект

использования стеклопорошков с указанными интервалами вязкости проявляется в температурных диапазонах:

- для внутренней поверхности трубной заготовки 1159 – 1172°C;
- для стеклошайбы 1167 – 1185°C.

Такой узкий температурный диапазон в практических условиях поддерживать одновременно невозможно, поэтому при горячем прессовании нержавеющей стали применение стеклопорошка одного химического состава не технологично.

Имеющийся в АО «ВТЗ» опыт применения стеклопорошков фирмы «MEFRIT» spol. s.r.o., позволил предложить следующий вариант использования смазочных материалов в температурном диапазоне от 1167°C до 1185°C:

- для нанесения на внутреннюю поверхность гильзы стеклопорошок марки RS 2735 с размерами гранул 0,1 мм и ниже;
- для изготовления стеклошайбы использовать порошок марки Ф-1 с размерами гранул 0,55 – 1,0 мм.

Глава пятая описывает опробование в производственных условиях, разработанных в работе на основе компьютерного моделирования и экспериментальных исследований технических предложений. Опытное прессование проводилось с использованием заготовок из наиболее проблемной стали 08X13H4M1Ф, как наиболее востребованной при производстве. Для проведения опытных работ было изготовлено шесть матриц конической формы по разработанным чертежам (с твердостью рабочей поверхности HRC 43...48). Угол конусности матриц в соответствии с результатами расчетов назначен равным 28°.

Производство опытной партии труб наружным диаметром $\varnothing 89$ мм с толщиной стенки 6,45 мм из стали 08X13H4M1Ф-1 (плавка №211960А) осуществлялось в условиях ТПЦ-2 АО «ВТЗ» по принятому режиму деформации. Для уточнения температурного режима была проведена дополнительная серия испытаний на установке Gleeble 3800 по исследованию пластичности при температуре 1250°C, которая показала тенденцию к снижению пластичности металла при температурах выше 1200°C вследствие выделения δ -феррита. Выполненный анализ исчерпания ресурса пластичности показал, что для получения труб из стали 08X13H4M1Ф-1 с качественной поверхностью температура металла при прессовании должна находиться в диапазоне 1150 – 1200°C.

Фиксирование в процессе прессования усилия прессования подтвердило имеющиеся в научно-технической литературе данные о том, что усилие прессования практически не зависит от формы матрицы. При всех режимах усилия прессования не превышали предельного значения для установки (55МН).

Осмотр и приемка труб, полученных при опытном прессовании с применением штатной цилиндрической матрицы М5, показали наличие на поверхности

многочисленных разрывов и трещин (рис. 9, а). На поверхности труб, прессование которых осуществлялось с применением опытной конической матрицы, наружные дефекты отсутствовали (рис. 9, б).

Результаты прессования с использованием конических матриц показали выход годного более 90% и снижение расходного коэффициента металла в 1,25-1,86 раза.

Коническая матрица с углом конусности 28° принята для использования при прессовании на всем профильно-марочном составе сортамента труб, в том числе из сталей с низкой пластичностью. Суммарный экономический эффект за 2022-2025 годы от внедрения предложенных технологических решений составил более 43 млн. рублей.



а



б

Рисунок 9 - Вид горячепрессованных труб, полученных с использованием штатной матрицы (а) и при использовании разработанных технических решений (б)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе на основании выполненных взаимосвязанных исследований решена актуальная научно-техническая задача - повышение качества и расширение размерного сортамента горячепрессованных труб из сложнолегированных сталей и сплавов за счет рационального применения стеклосмазочных материалов, профилирования технологического инструмента и параметров деформации.

Проведённые теоретические и экспериментальные исследования позволили получить следующие основные результаты:

1. Выполненное компьютерное моделирование в пакете программ QForm процесса прессования труб позволило произвести оценку влияния технологических параметров на напряженно-деформированное состояние металла на наружной поверхности прессуемой трубы. Показано, что значительное влияние на напряженное состояние оказывает коэффициент трения, причем увеличение коэффициента трения приводит к росту растягивающих напряжений на выходе из

очага деформации и повышению вероятности образования дефектов. Доказано, что показатель напряженного состояния в пределах 80% длины очага деформации существенно меньше нуля, следовательно, сталь в большей части очага деформации находится фактически в условиях сверхпластичности без накопления поврежденности. Возможность появления дефектов определяется поведением металла в выходной части очага деформации, которой соответствуют положительные значения показателя напряженного состояния.

2. Проведенные испытания на горячее сжатие, растяжение и кручение на универсальном исследовательском комплексе Gleeble 3800 образцов из сталей марок 10X13H3МФБ, 15X13H2, 08X18H10T, 10X17H13M2T, которые являются наиболее проблемными с точки зрения качества наружной поверхности бесшовных труб, полученных прессованием, позволили построить диаграммы, охватывающие диапазон изменения коэффициента напряженного состояния от 0 до 0,58. Предполагалось, что металл в процессе деформирования с отрицательным показателем напряженного состояния проявляет свойство неограниченной пластичности.

3. Предложены зависимости для аппроксимации диаграмм пластичности сталей, обеспечивающие высокую сходимость с результатами экспериментальных исследований пластичности сталей марок 10X13H3МФБ, 15X13H2, 08X18H10T, 10X17H13M2T и удобство коэффициентов аппроксимации для проведения вычислительных процедур. У всех марок стали повышение температуры испытаний до 1200°C приводило к росту пластичности. При температурах выше 1200°C наблюдалось снижение пластичности хромосодержащих марок стали вследствие появления δ -феррита, подтвержденного металлографическими исследованиями.

4. Проведенные исследования различных вариантов наносимого на внутреннюю поверхность гильзы порошка стеклосмазки марки Ф-1 при прессовании труб показали, что в интервале температур 1129 - 1186°C уменьшение размера частиц приводит к незначительному снижению пикового усилия, наименьшее установившееся усилие получено при использовании крупной фракцией (1,00–0,55 мм) порошка стеклосмазки марки Ф-1. Влияние granulometрии наносимого на наружную поверхность гильзы порошка стеклосмазки марки Ф-1 на пиковое усилие имеет различный характер в температурных интервалах 1129–1148°C; 1148–1167°C и 1167–1186°C. В каждом температурном интервале максимальное усилие получено при размере частиц менее 0,25 мм, что связано с комкованием порошка марки Ф-1 этой фракции и, в результате, к его неравномерному нанесению.

5. Полученные значения вязкости расплавов, формирующихся из порошков стеклосмазки марки Ф-1 различных фракций, показали необходимость прессовать

трубы в крайне узком температурном интервале, который в производственных условиях поддерживать невозможно. Это свидетельствует о нетехнологичности применения при горячем прессовании труб из нержавеющей стали порошков стеклосмазок одного и того же химического состава для получения разделяющих покрытий на внутренней и внешней поверхностях заготовки. Поэтому предложено использовать для нанесения на внутреннюю поверхность гильзы стеклопорошок марки RS 2735 с размерами гранул 0,1 мм и ниже, а для изготовления стеклошайб использовать порошок марки Ф-1 с размерами гранул 0,55 – 1,0 мм.

6. Результаты прессования опытных партий труб в условиях АО «ВТЗ» показали целесообразность использования разработанных на основе компьютерного моделирования конических матриц при прессовании стали марки 08X13H4M1Ф. По сравнению с прессованием в традиционно используемых цилиндрических матрицах конические матрицы обеспечивают высокий уровень выхода годного при прессовании ($\text{ЦП} > 90\%$) и снижение расходного коэффициента металла в 1,25-1,86 раза. Предложенная коническая матрица с углом конусности 28° принята для использования при прессовании на всем профильно-марочном составе сортамента труб, в том числе из сталей с низкой пластичностью. Суммарный экономический эффект за 2022-2025 годы от внедрения предложенных технологических решений составил более 43 млн. рублей.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации в научных изданиях, входящих в список ВАК при Минобрнауки России:

1. Исследование влияния гранулометрического состава стеклосмазок на процесс прессования труб из стали марки 20 / В.И. Кузнецов, А.В. Выдрин, А.В. Король, Е.Ю. Пашнина, **А.С. Жуков**, А.М. Зубков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallurgy. 2017. Т. 17. № 4. С. 74-82.

2. Влияние свойств стеклосмазок на процесс прессования труб из нержавеющей марки стали 08X18H10T / В.И. Кузнецов, А.В. Выдрин, А.В. Король, Е.Ю. Пашнина, **А.С. Жуков**, А.М. Зубков / Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallurgy. 2018. Т. 18. № 3. С. 67-78.

3. Смазочно-дезоксирующие материалы и оборудование для их подачи в линиях ТПА с непрерывными станами / В.И. Кузнецов, А.В. Красиков, А.В. Выдрин, Е.Ю. Пашнина, Д.К. Соколов, **А.С. Жуков** // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallurgy. 2021. Т. 21. № 2. С. 42-50.

4. Влияние профиля матрицы на характер напряженно-деформированного состояния при прессовании труб / А.В. Выдрин, **А.С. Жуков**, А.С. Тумашев, Д.Ю. Звонарев, М.А. Павлова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallurgy. 2021. Т. 21. № 3. С. 49-55.

5. Совершенствование технологии процесса прессования труб из нержавеющей марки стали / А.С. Жуков. – Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия». 2024. №80(12). С.15-22.

Публикации в изданиях, индексируемых в БД Scopus и Web of Science:

6. Особенности напряженно-деформированного состояния металла при горячем прессовании стальных труб / А.В. Выдрин, **А.С. Жуков**, Е.В. Храмков, М.А. Павлова // Черные металлы. 2019. № 9. С. 39-43.

7. Исследование пластичности хромистых сталей при прессовании труб / А.В. Выдрин, **А.С. Жуков**, Е.В. Храмков, В.Д. Николенко // Металловедение и термическая обработка металлов. 2020. № 1 (775). С. 102-104.- Study of chromium steel ductility during pipe extrusion / A.V Vydrin., E.V. Khramkov, V.D. Nikolenko, A.S. Zhukov // Metal Science and Heat Treatment. 2020. Т. 62. № 1-2. С. 103-105.

8. Ресурс пластичности высокохромистой стали 08X13H4M1Ф при прессовании / А.В. Выдрин, **А.С. Жуков**, А.С. Тумашев, М.А. Павлова // Черные металлы. 2021. № 12. С. 59-62.

9. Повышение трещиностойкости при прессовании труб из стали 08X13H4M1Ф / А.В. Выдрин, **А.С. Жуков**, Д.Ю. Звонарев, М.А. Павлова // Черные металлы. 2022. № 7. С. 53-57.

Другие публикации в научных журналах

10. Жуков А.С. Разработка технологии для получения горячепрессованных труб специального назначения с высоким качеством наружной поверхности / **А.С. Жуков**, А.В. Выдрин. - В сборнике: ТРУБЫ - 2021. Труды XXIV Международной научно-практической конференции. Сборник докладов АО "РусНИТИ". Под редакцией И.Ю. Пышминцева. Челябинск, 2021. С. 36-40.

Патенты на изобретения:

11. Пат. 2811876 Российская Федерация, МПК В23D 45/00 Способ термофрикционной резки дисковой пилой нагретого трубопроката из аустенитной хромоникелевой стали диаметром 120-140 мм / Л.М. Гуревич, А.И. Банников, С.П. Писарев, Д.В. Проничев, **А.С. Жуков**, С.А. Стручков, Ю.Г. Пономарев, А.А. Банников, А.С. Губарев, О.В. Слаутин; ФГБОУ ВО ВолгГТУ. - 2024.

Жуков Александр Сергеевич

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ТРУБ ИЗ
СЛОЖНОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ НА
ОСНОВЕ РАЗВИТИЯ ТЕОРИИ И ТЕХНОЛОГИИ ПРОЦЕССА
ПРЕССОВАНИЯ**

**Специальность 2.6.4 - «Обработка металлов давлением»
(технические науки)**

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Подписано в печать 21.07.2026 г. Заказ №337. Тираж 100 экз.
Печ. л.1.75. Формат 60 x 84 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Отпечатано в типографии Издательства ВолгГТУ.
400005, г. Волгоград, просп. Ленина, 28, корп. 7.