

На правах рукописи



ЕРПАЛОВ Михаил Викторович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВЫСАДКИ КОНЦОВ ТРУБ
НЕФТЯНОГО СОРТАМЕНТА НА ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРЕССАХ**

05.16.05 – Обработка металлов давлением

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Богатов Александр Александрович

Официальные оппоненты: **Готлиб Борис Михайлович**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Уральский государственный университет путей сообщения», профессор кафедры «Мехатроника»

Баричко Борис Владимирович, кандидат технических наук, доцент, ОАО «Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности», заведующий лабораторией волочения и прессования труб

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет), г. Челябинск

Защита состоится «10» марта 2016 г. в 15:00 ч на заседании диссертационного совета Д 212.285.04 на базе ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого 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 «__» _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Мальцева Людмила Алексеевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Причиной интенсивной модернизации трубной промышленности, наблюдаемой в последние годы, часто называют риски, связанные со вступлением России в ВТО, а также обострением конкуренции в отрасли черной металлургии. Однако мероприятия, направленные на увеличение производства, улучшение качества продукции и освоение новых видов труб в первую очередь связаны с необходимостью удовлетворения растущего спроса и с ужесточением требований к продукции со стороны нефте- и газодобывающих компаний. При этом в ряде случаев технические требования к качеству продукции находятся на более высоком уровне, чем требования международных стандартов. Ужесточение требований к трубам нефтяного сортамента продиктовано условиями их эксплуатации при бурении и обустройстве скважин нефтяных, газовых и газоконденсатных месторождений. К ним относятся действие высоких температур, наличие агрессивных сред с сероводородом и углекислым газом, а также рост нагрузок при эксплуатации скважин, особенно тех, которые имеют глубину более 1,5 километров. Требуемая прочность резьбового соединения под действием растягивающих, сжимающих и изгибающих нагрузок, а также кручения обеспечивается высадкой концов труб.

Необходимость увеличения производительности и повышения качества труб с высаженными концами подтверждается высокой долей импорта этой продукции. Так, доля импорта обсадных и насосно-компрессорных труб в общем объеме потребления составляет от 13 до 22%, а бурильных – до 30-40%. При этом поставляемая продукция имеет как правило более высокое качество.

Степень разработанности темы исследования. Значительный вклад в развитие отечественной теории и практики высадки концов труб внесли Баричко Б.В., Выдрин А.В., Ганаго О.А., Ермолов И.В., Зинченко А.В., Козлов И.К., Осадчий В.Я., Остренко В.Я., Стрижак В.И., Шевченко А.А. и др. Однако, несмотря на имеющийся опыт производства труб с высаженными концами и существующие теоретические основы процесса высадки, имеются проблемы с обеспечением качества готовой продукции. По данным ОАО «Первоуральский новотрубный завод» (ОАО «ПНТЗ») доля брака, связанного с незаполнениями калибра металлом, составляет не менее 3%. При высадке отдельных партий заготовок количество дефектов может достигать 30-40% и выше. При этом дефекты расположены на внутренней поверхности высаженных концов труб как вблизи торца, так и в области переходной части высадки. В ряде случаев трубы подлежат отбраковке по причине образования на внутренней поверхности непологого перехода от высаженной части к телу трубы.

Актуальными остаются проблемы повышения производительности при изготовлении труб с высаженными концами, т.к. существующие технологические процессы включают в себя до четырех проходов, в каждом из которых величину утолщения по стенке ограничивают как правило величиной 1,5. Каждая операция высадки осуществляется с контролем температуры конца трубы, а при необходимости осуществляют дополнительный подогрев металла в индукционной установке. Повышается также вероятность получения бракованных изделий за счет увеличения количества операций. Все это ведет к существенному увеличению затрат при производстве труб.

Целью диссертационной работы является совершенствование технологии высадки концов труб нефтяного сортамента, направленное на повышение качества продукции и увеличение интенсификации деформации металла.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие **задачи исследования**:

- выполнить конечно-элементное моделирование процесса высадки с целью изучения закономерностей формоизменения металла, а также с целью установления связи между качеством готовой продукции и режимами нагрева заготовок, режимами деформации концов труб, параметрами настройки оборудования и размерами заготовок;
- разработать математическую модель процесса высадки концов труб, учитывающую особенности течения металла в очаге деформации и позволяющую с высокой точностью рассчитывать необходимое усилие высадки;
- выполнить промышленное исследование процесса высадки концов труб с целью подтверждения закономерностей формоизменения металла, установленных в результате теоретического исследования;
- выполнить промышленное исследование процесса высадки концов труб с целью изучения температурных полей в металле заготовки в процессах нагрева, деформации и последующего охлаждения;
- на основании закономерностей течения металла в очаге деформации при высадке концов труб сформулировать научно-обоснованные требования к размерам заготовок и к калибровке технологического инструмента;
- на основе сформулированных требований к размерам заготовок и к калибровке технологического инструмента, с учетом разработанной математической модели, а также с учетом результатов термографических исследований процесса высадки разработать новую технологию высадки концов бурильных труб ПН 73х9 по ГОСТ Р 50278-92 за один проход;
- в промышленных условиях оценить техническую и технологическую возможности реализации нового процесса.

Научная новизна представленной работы заключается в следующем:

- установлены закономерности течения металла и формоизменения концов труб в очаге деформации при высадке на гидравлических прессах;
- выявлена зависимость формоизменения металла при высадке концов труб от условий нагрева заготовок, режимов высадки, параметров настройки оборудования пресса и размеров заготовки;
- предложены критерии, характеризующие условия протекания процесса высадки, позволяющие оценить возможность образования дефектов на внутренней поверхности высаженных концов труб;
- установлены причины и условия образования дефектов на внутренней поверхности готовых изделий;
- сформулированы научно-обоснованные требования к размерам заготовки и калибровке технологического инструмента, позволяющие исключить образование дефектов на внутренней поверхности высаженных концов труб, расположенных вблизи торца;
- получено решение задачи по определению усилия деформации при высадке концов труб с применением вариационного метода на основе принципа минимума полной мощности, которое учитывает особенности течения металла в очаге деформации, в том числе в области, расположенной за участком перехода от высаженной части к телу трубы;
- предложена методика проведения и обработки опытных данных промышленного эксперимента, направленного на изучение формоизменения металла при высадке концов труб;
- показана возможность интенсификации процесса высадки концов труб, осуществляемой в несколько проходов.

Теоретическую и практическую ценность представляют следующие результаты работы:

- установлены пути повышения качества внутренней поверхности высаженных концов труб, связанные с ужесточением требований к заготовкам и к калибровке инструмента, а также с улучшением режимов нагрева и высадки;
- на основании промышленного исследования температурных полей в металле заготовки и высадки концов труб применительно к технологии ОАО «ПНТЗ» установлена величина уменьшения фактической длины нагрева за счет потерь тепла, а также значение величины, характеризующей неточность осевого положения трубы в очаге деформации;
- получено уравнение для расчета необходимого усилия прессования концов труб, осуществляемого наружу, внутрь трубы или комбинированным

- способом, обеспечивающее точность результатов на высоком уровне независимо от размеров заготовки и калибровки инструмента;
- разработана и внедрена технология изготовления инструмента путем азотирования поверхностного слоя;
 - предложена и внедрена в производство новая технологическая смазка инструмента;
 - разработана и успешно опробована в промышленных условиях технология высадки концов бурильных труб ПН 73x9 по ГОСТ Р 50278-92.

Методология и методы исследований. Методологической основой исследований послужили общие положения механики обработки металлов давлением, теория планирования эксперимента и основы статистической обработки экспериментальных данных. Для исследования процесса высадки концов труб нефтяного сортамента помимо вариационных методов механики деформируемого тела, эффективность которых доказана в многочисленных работах, использован метод конечных элементов, реализованный в программе Deform-3D. При этом построение геометрических моделей инструмента осуществлялось в программе SolidWorks. При проведении промышленных исследований процесса высадки использованы хромельалюмелевая термопара и тепловизор ThermoCAM P640, признанные по результатам поверки годными к использованию. Обработка результатов термографического исследования процесса нагрева и высадки концов труб выполнена в программе FLIR ResearchIR. Измерения заготовок и высаженных концов труб осуществлены с помощью поверенных линеек и микрометров.

Положения, выносимые на защиту:

- комплексная методика проведения исследования процесса высадки концов труб, включающая компьютерное и математическое моделирование, а также промышленные испытания с целью изучения формоизменения металла в процессе деформации и установления причин образования внутренних дефектов на готовых изделиях;
- научно-обоснованные требования к размерам заготовки и к калибровке технологического инструмента, обеспечивающие отсутствие внутренних дефектов, расположенных вблизи высаженного конца трубы;
- методика и результаты промышленного исследования температурных полей в металле заготовки в процессе нагрева и высадки концов труб;
- новая технология высадки концов бурильных труб ПН 73x9 мм по ГОСТ Р 50278-92 за один проход;
- научно-обоснованные выводы о возможности интенсификации процессов высадки концов труб путем уменьшения числа операций.

Достоверность результатов работы обеспечивается методами математической статистики. Кроме того, результаты теоретических исследований подтверждены промышленными экспериментами, выполненными на гидравлическом прессе SMS Meer в ОАО «ПНТЗ».

Апробация результатов работы. Основные положения диссертации и ее отдельные результаты доложены и обсуждены на: Международной конференции «IX Конгресс прокатчиков», г. Череповец, 2013 г.; XIV Международной научной конференции «Новые технологии и достижения в металлургии и материаловедении», Польша, г. Ченстохова, 2013 г.; III Международной интерактивной научно-практической конференции «Инновации в материаловедении и металлургии», г. Екатеринбург, 2013 г.; Международной конференции «Пластическая деформация металлов», Украина, г. Днепропетровск, 2014 г.; Международном научно-техническом конгрессе «ОМД 2014. Фундаментальные проблемы. Инновационные материалы и технологии», г. Москва, 2014 г.; Международной конференции «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении», г. Екатеринбург, 2014 г.; Международной научно-практической конференции «Трубы-2014», г. Челябинск, 2014 г.; Международной молодежной научно-практической конференции «Инновационные процессы обработки металлов давлением: фундаментальные вопросы связи науки и производства», г. Магнитогорск, 2015 г.; 11-я Международная научно-техническая конференция «Современные металлические материалы и технологии (СММТ'15)», г. Санкт-Петербург, 2015 г.

Публикации. По материалам диссертации имеется 10 печатных работ, в том числе в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК – 3, вошедших в базу данных SCOPUS – 1.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и изложена на 215 страницах машинописного текста, включая 119 рисунков, 18 таблиц и библиографический список из 114 наименований.

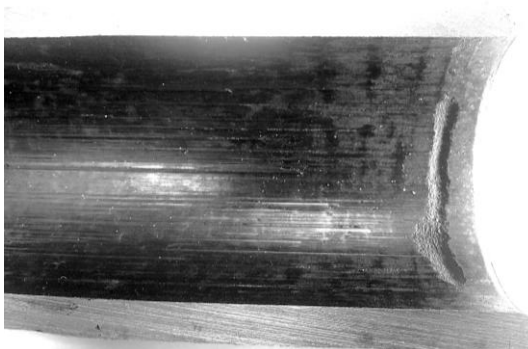
Работа выполнена в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности № 11.1369.2014/К от 18.07.2014 (Номер государственной регистрации: 114122470051) на кафедре обработки металлов давлением Уральского федерального университета, а также в рамках реализации Программы Повышения конкурентоспособности УрФУ на 2013-2020 гг.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

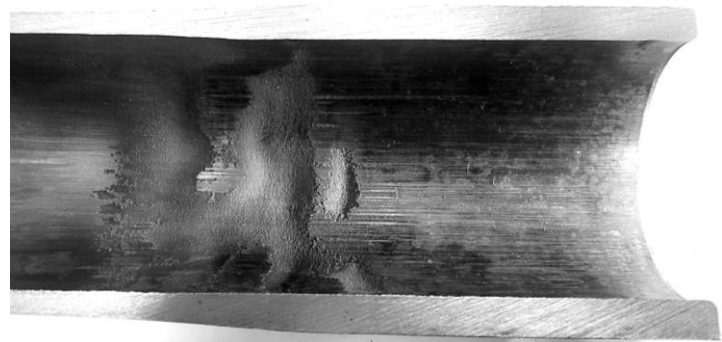
Во введении раскрыта актуальность работы, обоснована цель и сформулированы задачи исследования, представлена научная новизна и практическая значимость диссертационной работы.

В первой главе представлен обзор литературных источников по рассматриваемой теме исследования. Приведен сортамент труб с высаженными концами, наиболее востребованных на российском рынке, а также представлены основные технические требования к ним. Выполнен обзор известных способов получения изделий с высаженными концами и показано, что наиболее эффективным способом при их изготовлении является высадка концов труб на горизонтальных гидравлических прессах. В главе рассмотрено современное состояние теоретического описания процесса и приведены данные о имеющихся экспериментальных исследованиях. На основании обзора литературы и патентов по высадке концов труб сформулированы задачи исследования.

Вторая глава посвящена изучению формоизменения металла в процессе высадки концов труб и установлению причин образования дефектов в виде незаполнений штампового пространства со стороны внутренней поверхности высаженных концов труб (рисунок 1). Изучение формоизменения металла выполнено в программе конечно-элементного моделирования Deform-3D. Модель горизонтального высадочного пресса представлена на рисунке 2. Изучалось влияние следующих технологических факторов на форму, размеры и качество высаженных концов: длина, температура и равномерность нагрева заготовки, фактические размеры заготовок в пределах допусков на диаметр и толщину стенки, условия трения на контактной поверхности и температура инструмента, параметры, характеризующие точность настройки оборудования, а именно осевое и радиальное смещение заготовки от номинального положения, а также радиальное смещение и перекос оси пуансона относительно оси матриц.



а – незаполнение штампового пространства
вблизи торца трубы



б – незаполнение штампового пространства
в области конического пояса матриц

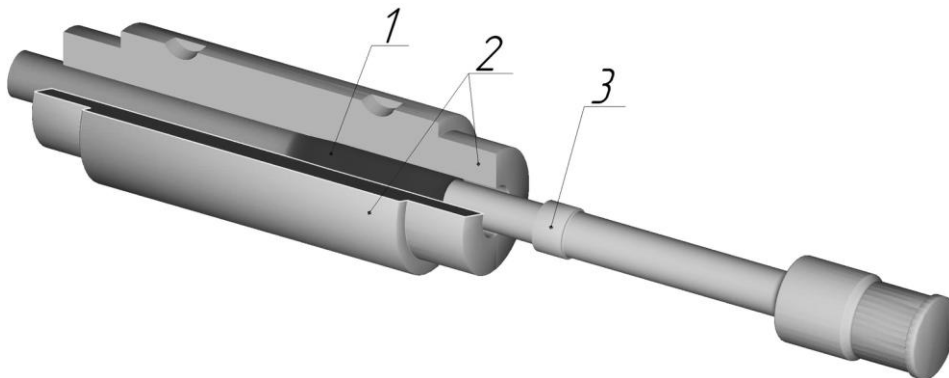
Рисунок 1 – Вид внутренних дефектов при высадке концов труб

При конечно-элементном моделировании процесса высадки концов труб был составлен план вычислительного эксперимента, включающий в себя решение 17 задач для заготовок насосно-компрессорных труб с исходными размерами $73,02 \times 5,51$ мм, $72,23 \times 4,82$ мм, $73,81 \times 6,2$ мм и $73,02 \times (4,82 \div 6,2)$ мм в соответствии с API 5CT, а также 1 задачи для заготовки бурильной трубы размером $73 \times 9,2$ мм, высаживаемой наружу по ГОСТ Р 50278-92.

Распределение температур по длине нагретого конца заготовок было задано по результатам отдельного решения температурных задач в программе Deform-3D с учетом результатов термографического исследования реального процесса нагрева. При этом температура металла заготовки была установлена на двух уровнях 1200°C и 1100°C, а длина нагрева для разных задач соответствовала 240, 190 и 290 мм. Температура металла в узкой области вблизи торца заготовки кроме номинального значения 1200°C имела отклонение в большую сторону до 1290°C и в меньшую до 1100°C, что позволило смоделировать различную настройку нагревательных установок.

Условие трения на контактной поверхности с инструментом было выбрано в соответствии с законом трения Зибеля, при этом показатель трения ψ был установлен равным 0,3 и 0,7, что в соответствии с рекомендациями разработчика программного обеспечения соответствует случаям трения со смазкой и без нее. Температура матриц и пуансона также подлежала изменению в диапазонах от 150 до 250°C и от 100 до 180°C соответственно.

Задача №1 была решена для насосно-компрессорной трубы размером 73,02×5,51 мм, установленной соосно матрицам и пуансону. Положение заготовки относительно матриц при этом определялось расстоянием от торца трубы до передней кромки матриц, равным расчетной величине 85 мм. Отдельно были решены задачи, в которых осевое смещение заготовки составило 35 мм в обе стороны. Радиальное смещение заготовки и отдельно пуансона было осуществлено на максимально возможную величину, равную соответственно 0,76 и 0,1 мм. Максимальный перекося осей инструмента выбирался из условия свободного движения пуансона относительно матриц.



1 – труба с нагретым до заданной температуры концом;
2 – разъемные матрицы; 3 – пуансон

Рисунок 2 – Модель высадочного пресса в программе Deform-3D

В результате решения задач компьютерного моделирования были получены данные о течении металла в очаге деформации, а также об изменении температурного поля в заготовке в зависимости от условий процесса высадки. Были выявлены четыре стадии процесса с характерным полем скоростей частиц металла в каждой из них:

1. раздача трубы пуансоном;
2. потеря устойчивости профиля трубы;
3. формирование локального очага деформации;
4. заполнение штампового пространства металлом и оформление окончательного профиля высаженного конца трубы.

Установлено, что формоизменение заготовки, а также образование внутренних дефектов высаженного конца трубы определяется равномерностью распределения температуры металла в очаге деформации. При этом важную роль играет не только исходное распределение температуры по длине заготовки, но и охлаждение металла в результате контакта с более холодным пуансоном в начальной стадии процесса (рисунок 3). Для количественной оценки неравномерности температурного поля металла в очаге деформации введен показатель, характеризующий относительный перепад температуры на поверхности заготовки в конце стадии раздачи трубы:

$$K_T = \frac{T_{1\max} - T_{1\min}}{T_{1\max}}. \quad (1)$$

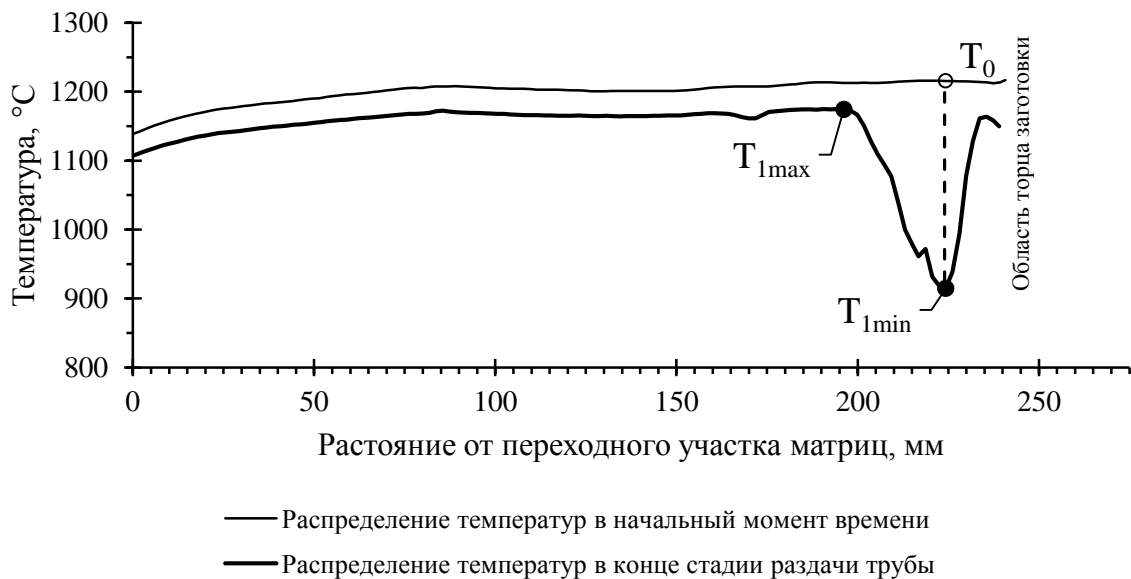


Рисунок 3 – Распределение температур по длине нагретого конца трубы в начале и в конце стадии раздачи заготовки

Результаты моделирования свидетельствуют о том, что к увеличению градиента температуры в очаге деформации приводят понижение температуры торца заготовки при нагреве, увеличение толщины стенки и разностенности заготовки, уменьшение температуры инструмента, а также неточная настройка оборудования пресса, приводящая к тому, что контакт металла трубы с пуансоном наступает раньше. Равномерное увеличение или уменьшение температуры нагрева металла, включая торец заготовки, не приводит к существенному изменению градиента температур в очаге деформации.

При потере устойчивости профиля трубы, сопровождающейся увеличением диаметра заготовки, узкая область металла вблизи торца приобретает искривленную форму по отношению к остальной части высаживаемого изделия. В работе установлена прямая зависимость между размерами искривленного участка трубы и неравномерностью распределения температуры металла в очаге деформации. В момент, когда наружная поверхность нагретого конца трубы повторяет профиль рабочей поверхности матриц, деформация локализуется вблизи торца и начинается постепенное заполнение штампового пространства металлом в радиальном направлении в сторону пуансона. Однако в зависимости от размеров искривленного участка трубы на графике радиальной составляющей скорости перемещения частиц металла, расположенных на внутренней поверхности трубы, наблюдается один или два экстремума (рисунок 4).

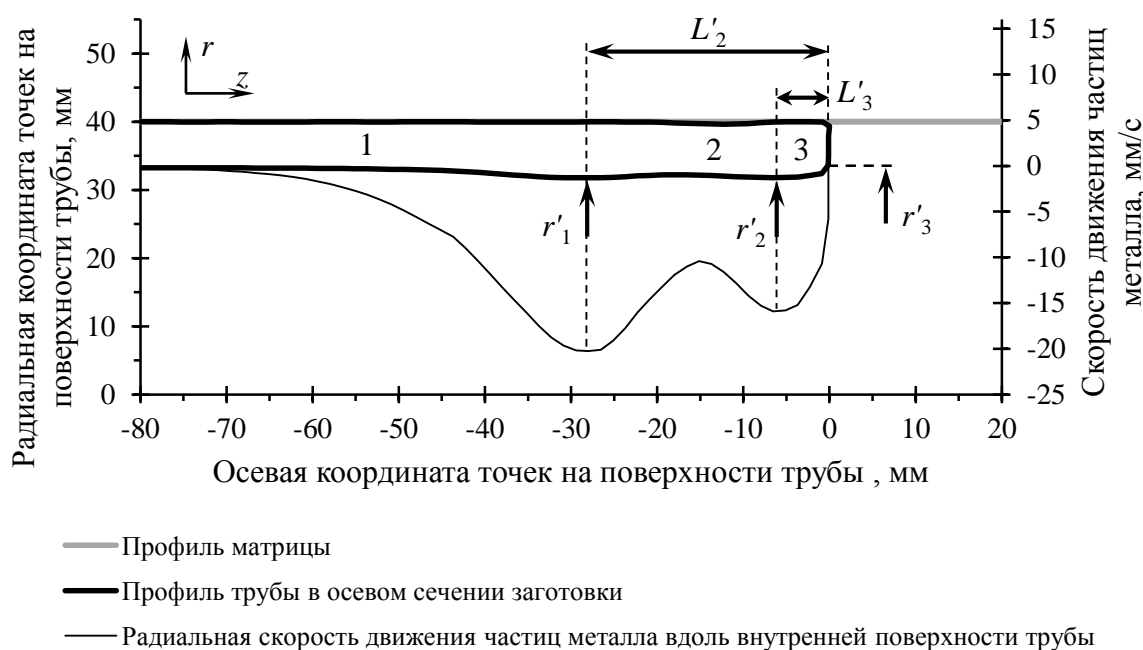


Рисунок 4 – Профиль трубы и поле скорости перемещения частиц металла v_r на стадии образования локального очага деформации

Соотношение радиальных скоростей и расстояний, которые необходимо преодолеть частицам металла на внутренней поверхности трубы до соприкосновения с пуансоном, определяют возможное образование внутренних дефектов. Соотношение скоростей зависит от градиента температур, а расстояние от внутренней поверхности трубы до пуансона характеризуется соотношением:

$$K_K = \frac{2S}{D_M - d_{II}}, \quad (2)$$

где S – толщина стенки трубы, мм;

D_M – диаметр рабочей цилиндрической части матрицы, мм;

d_{II} – диаметр у основания рабочей конической части пуансона, мм.

Для количественной оценки склонности металла трубы к образованию дефектов на внутренней поверхности введен параметр, положительное значение которого соответствует случаю высадки бракованных изделий (рисунок 5):

$$K_{\text{Б1}} = \frac{r'_2 - r'_1}{L'_2 - L'_3}. \quad (3)$$

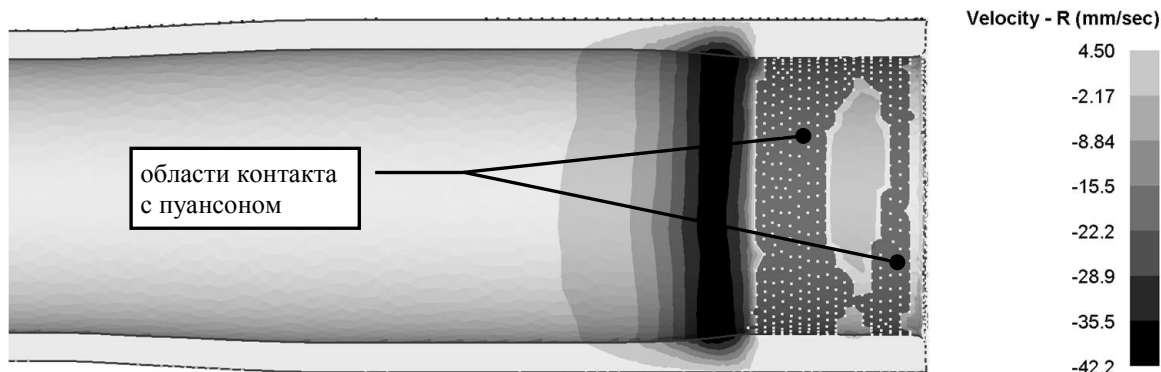


Рисунок 5 – Образование внутреннего дефекта близи торца трубы

Анализ результатов компьютерного моделирования позволил установить, что к образованию дефектов на внутренней поверхности трубы приводят уменьшение температуры торца заготовки по отношению к остальной нагреваемой части трубы, ухудшение условий трения на контактной поверхности и уменьшение температуры инструмента (рисунок 6), увеличение толщины стенки заготовки при неизменной калибровке технологического инструмента (рисунок 7), увеличение разностенности трубы, а также неточная настройка оборудования прессы высадки, при которой имеет место радиальное смещение трубы относительно матриц или перекося оси пуансона. Статистическая обработка данных позволила установить связь между параметрами калибровки инструмента и максимальной толщиной стенки, при которых обеспечивается требуемое качество продукции:

$$S^{\text{max}} = 0,3486 \cdot (D_{\text{м}} - d_{\text{п}}). \quad (4)$$

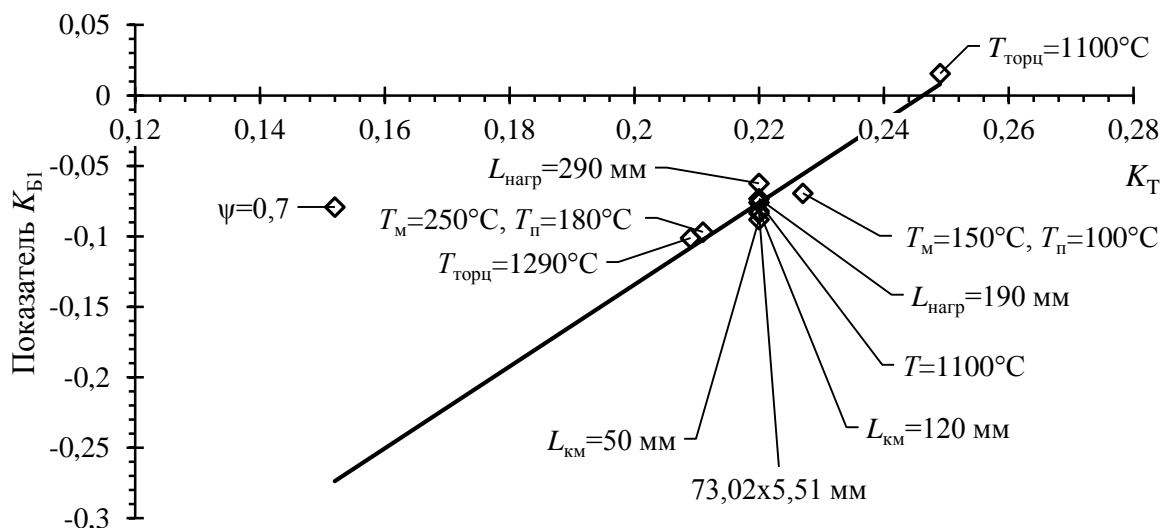


Рисунок 6 – Схема очага деформации

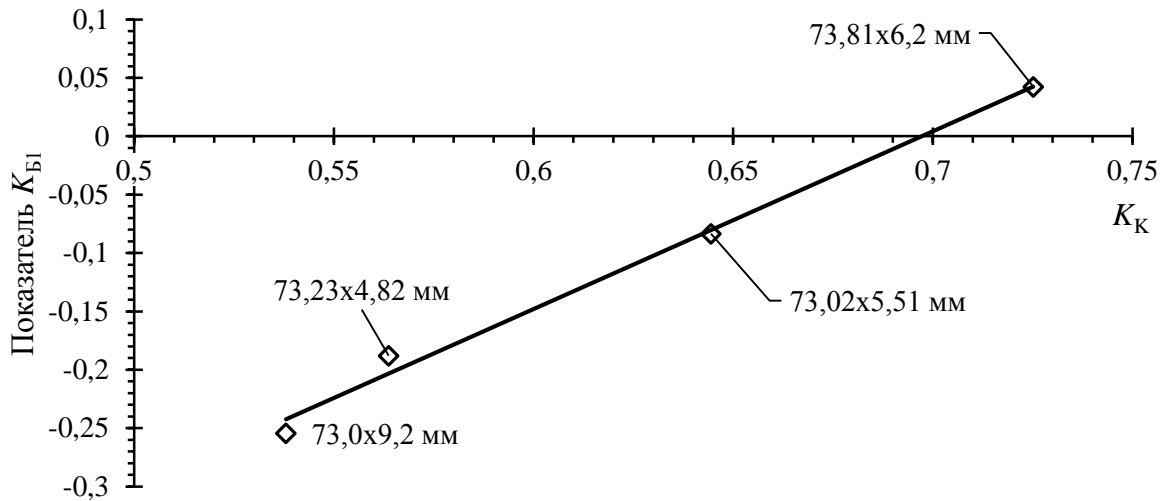


Рисунок 7 – Схема очага деформации

Важным является тот факт, что при высадке концов бурильных труб ПН 73×9 по ГОСТ Р 50278-92 за один проход склонность к образованию внутренних дефектов, расположенных вблизи торца, минимальна.

Заполнение штампового пространства металлом и оформление окончательного профиля высаженного конца трубы сопровождается резким увеличением усилия деформации. Установлено, что в случае осесимметричного течения металла образование внутренних дефектов, расположенных в области конического пояса матриц (см. рисунок 1, б), возможно лишь при недостаточном усилии прессования. При этом наиболее неблагоприятно на качестве продукции сказываются ухудшение условий трения на контактной поверхности с инструментом, уменьшение длины нагрева и температуры торца заготовки, а также увеличение толщины стенки трубы, в том числе за счет наличия утолщенных концов, образующихся при редуцировании заготовок.

Образование внутренних дефектов, расположенных в переходной части высаженного конца трубы, при заполнении штампового пространства металлом наблюдается в случае асимметричного очага деформации, а именно при высадке концов труб, имеющих разностенность, а также при наличии перекоса оси пуансона относительно оси матриц (рисунок 8).

Важным также является тот факт, что при высадке концов бурильных труб ПН 73×9 по ГОСТ Р 50278-92 в один проход расчетное усилие деформации 1166 кН, необходимое для обеспечения качества продукции, меньше максимального усилия 2500 кН, развиваемого прессом.

По результатам конечно-элементного моделирования процесса высадки концов труб сделаны выводы о существенном влиянии на качество внутренней поверхности готовых изделий градиента температуры металла в очаге деформации, минимального коэффициента осадки по толщине стенки, определяемого калибровкой технологического инструмента, а также точностью определения необходимого усилия прессования.

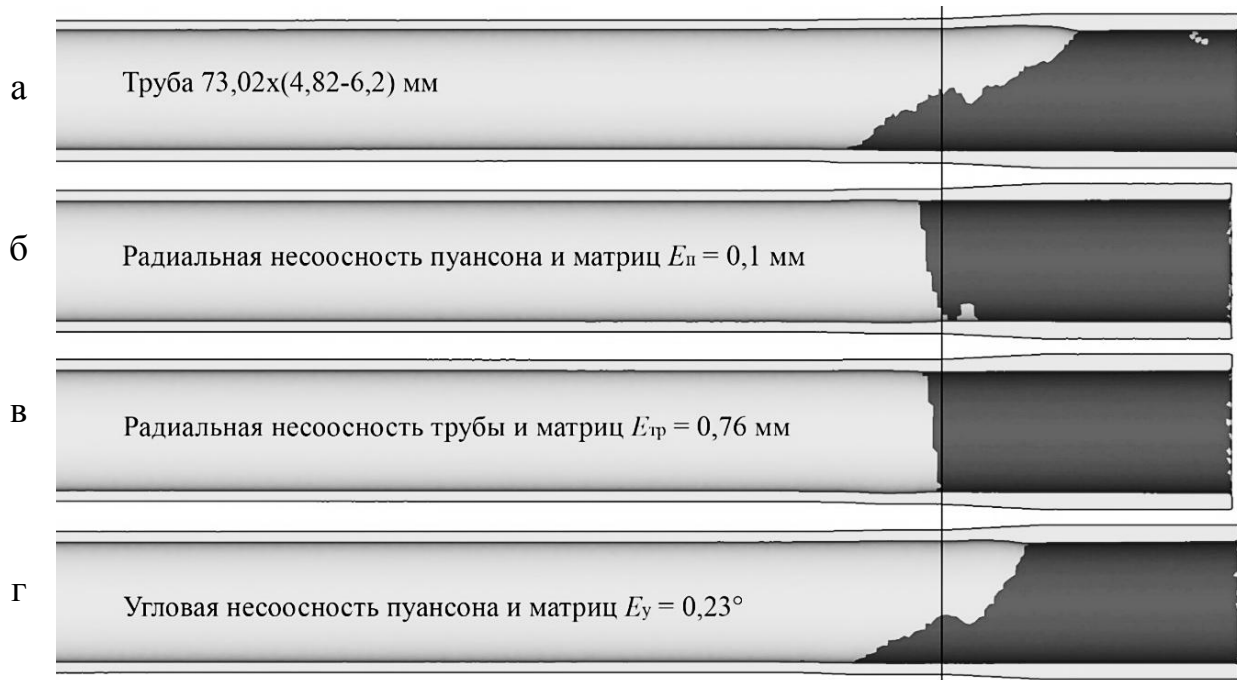


Рисунок 8 – Формы высаженных концов труб
в случае асимметричного очага деформации

Третья глава посвящена математическому моделированию процесса высадки концов труб в один проход с целью определения аналитического выражения, позволяющего оперативно производить оценку максимального значения усилия прессования, необходимого для получения изделий заданной формы и требуемого качества. Моделирование выполнено с применением вариационных методов механики деформируемого тела, а именно методом верхней оценки:

$$P \leq \left(\int_V \tau_s H' dV + \int_{S_s} \psi \tau_s v'_s dS + \int_{S_t} \tau_s |\Delta v'_t| dS \right) / v_0. \quad (5)$$

Согласно выражению (5) действительное усилие прессования P , действующее вдоль оси заготовки, не превышает суммы мощностей внутренних сил, затрачиваемых непосредственно на деформацию металла, мощностей сил трения на контактной поверхности с инструментом и мощностей сил среза, действующих вдоль поверхностей разрыва касательной составляющей скорости перемещения частиц металла, деленной на скорость перемещения пуансона. С целью обеспечения высокой точности оценки усилия прессования схема очага деформации и векторное поле скоростей приняты с учетом результатов конечно-элементного моделирования (рисунок 9). Так весь очаг деформации в момент окончания процесса высадки, разбит на четыре области – цилиндрический участок высаживаемого конца трубы 1; конический участок 2; переходная часть 3, имеющая контакт с матрицами; и переходная часть 4, не имеющая контакта с инструментом. Остальная часть трубы не деформируется и не перемещается в пространстве.

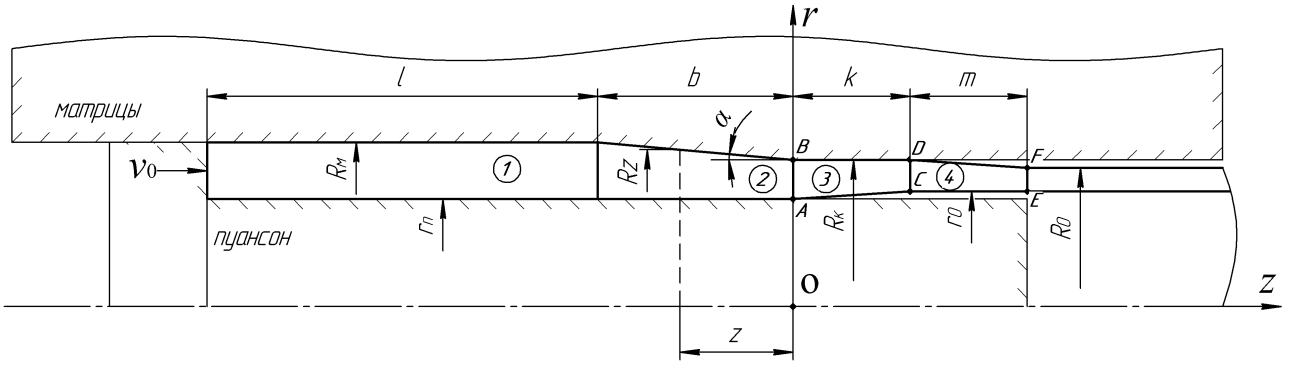


Рисунок 9 – Схема очага деформации

В соответствии с принятой схемой очага деформации верхняя оценка усилия прессования была определена согласно выражению:

$$P_{\text{выс}} = \frac{(N_{\text{вн2}} + N_{\text{вн3}} + N_{\text{вн4}}) + (N_{\text{тр1м}} + N_{\text{тр2м}} + N_{\text{тр2п}}) + (N_{\text{сп1-2}} + N_{\text{сп2-3}})}{v_0}. \quad (6)$$

Компоненты в формуле (6) были определены в соответствии с найденным кинематически возможным полем скоростей. Формулы для их расчета после некоторых допущений приведены ниже:

$$N_{\text{вн2}} = 2\pi v_0 \tau_s \frac{(R_M^2 - r_{\text{п}}^2)(R_M - R_K)}{b} \cdot \ln \frac{R_M^2 - r_{\text{п}}^2}{R_K^2 - r_{\text{п}}^2}; \quad (7)$$

$$N_{\text{вн3}} = 3\pi \tau_s \frac{v_0(R_M^2 - r_{\text{п}}^2) - v_k(R_K^2 - r_{\text{п}}^2)}{64k(R_K^2 - r_{\text{п}}^2)} \cdot (15k(r_0 + r_{\text{п}})(2R_K - r_0) - 15k(R_K^2 + r_{\text{п}}^2) + 4(r_0 + r_{\text{п}})(r_0^2 + r_{\text{п}}^2 - 6R_K^2) + 32R_K^3 + 50kR_K^2 \left(1 + \ln R_K - \frac{r_0 \ln r_0 - r_{\text{п}} \ln r_{\text{п}}}{r_0 - r_{\text{п}}}\right)); \quad (8)$$

$$N_{\text{вн4}} = 0; \quad (9)$$

$$N_{\text{тр1м}} = 2\pi \psi \tau_s v_0 R_M l; \quad (10)$$

$$N_{\text{тр2м}} = \pi \psi \tau_s v_0 \frac{(R_M^2 - r_{\text{п}}^2)(b^2 + (R_M - R_K)^2)}{b(R_M - R_K)} \ln \frac{R_M^2 - r_{\text{п}}^2}{R_K^2 - r_{\text{п}}^2}; \quad (11)$$

$$N_{\text{тр2п}} = \pi \psi \tau_s v_0 \frac{b}{R_M - R_K} \left((R_M^2 - r_{\text{п}}^2) \ln \frac{(R_M - r_{\text{п}})(R_K + r_{\text{п}})}{(R_K - r_{\text{п}})(R_M + r_{\text{п}})} - 2r_{\text{п}}(R_M - R_K) \right); \quad (12)$$

$$N_{\text{сп1-2}} = \frac{2}{3} \pi \tau_s v_0 \frac{R_M(R_M - R_K)(R_M - r_{\text{п}})(R_M + 2r_{\text{п}})}{b(R_M + r_{\text{п}})}; \quad (13)$$

$$N_{\text{сп2-3}} = \frac{2}{3} \pi \tau_s v_0 \frac{R_K(R_M - R_K)(R_M^2 - r_{\text{п}}^2)(R_K + 2r_{\text{п}})}{b(R_K + r_{\text{п}})^2}; \quad (14)$$

где τ_s – сопротивление деформации сдвига для материала трубы, МПа;
 ψ – показатель трения в соответствии с законом Зибеля.

Анализ формулы (6) с учетом выражений (7)-(14) в сравнении с результатами компьютерного моделирования, а также в сравнении с промышленными данными свидетельствует о высокой точности оценки усилия прессования конца трубы за один проход. Кроме того, полученные выражения позволяют учесть не только фактические размеры и свойства металла заготовки, параметры калибровки технологического инструмента, но и косвенно оценить влияние длины нагрева на необходимое усилие прессования. Указанная модель учитывает особенности формоизменения металла трубы и может быть использована в алгоритмах систем автоматического управления процессом высадки.

В четвертой главе представлены результаты промышленных исследований процесса высадки концов труб, которые были проведены на горизонтальном гидравлическом прессе SMS Meer с максимальным усилием 2500 кН, установленном в Финишном центре ОАО «Первоуральский новотрубный завод». Отдельно представлены результаты исследований температурных условий нагрева и высадки концов труб, а также исследований формоизменения металла в процессе деформации.

Для проведения исследований температурных условий нагрева заготовок и высадки концов труб использованы тепловизор ThermaCAM P640, хромель-алюмелевая термопара и специализированное программное обеспечение для обработки снятых термограмм. Исследование проводилось в несколько этапов, на первом из которых с помощью термопары была произведена тарировка тепловизора, необходимая для обеспечения точности при обработке полученных данных с учетом изменения теплофизических свойств стали в процессе нагрева и охлаждения. На втором этапе была произведена оценка точности показаний стационарных пирометров, установленных непосредственно на втором и третьем индукторах и используемых в системе автоматического управления процессом нагрева. Анализ полученных данных свидетельствует о хорошей сходимости показаний пирометров, работающих в паре с третьим индуктором, тепловизора и термопары, что свидетельствует о правильной настройке соответствующих пирометров. Однако показания пирометров, установленных на втором индукторе, являются завышенными, в связи с чем в работе дана рекомендация по увеличению соответствующего коэффициента черноты материала, используемого в программе управления нагревательной установкой. Тем не менее точность окончательного нагрева заготовок обеспечивается адаптивностью системы управления прессом и корректной настройкой третьей пары индукторов.

На третьем этапе исследований были определены температурные поля в металле заготовок в процессе нагрева концов труб, непосредственно перед высадкой и сразу после окончания деформации металла. Наибольший интерес представляют данные о распределении температур вдоль нагретого конца заго-

товок после нагрева в первом, втором и третьем индукторах (рисунок 10). Анализ полученных данных позволил установить отклонение фактической длины нагрева от задаваемой в системе управления прессом в среднем на 80 мм в меньшую сторону, что объясняется потерей тепла от нагретой части заготовки путем теплопроводности в холодную. При этом длина участка трубы с переходной температурой составляет не менее 200 мм.

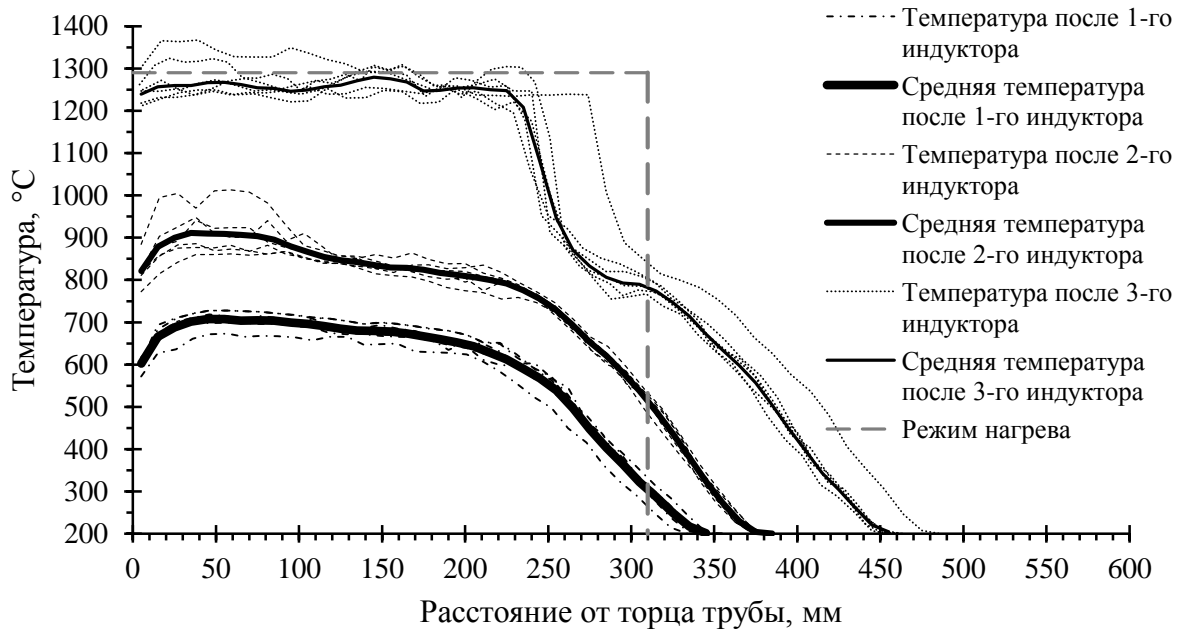


Рисунок 10 – Распределение температур вдоль оси заготовок при нагреве

Данные о распределении температуры металла трубы непосредственно перед высадкой и после деформации, полученные в работе, позволяют повысить точность расчета калибровки технологического инструмента с учетом температурного расширения стали.

Исследование формоизменения заготовок в промышленных условиях выполнено с целью изучения влияния на размеры и качество продукции следующих факторов: исходных размеров заготовок, включая разностенность и наличие утолщенных концов, условий трения на контактной поверхности с инструментом, а также точности настройки оборудования пресса. Для исследований выбраны заготовки для производства труб с высаженными концами наиболее востребованного размера $73,02 \times 5,51$ мм в соответствии с API 5CT. Отбор 13 труб одной прокатной партии и металлургической плавки производился из 96 штук в соответствии с критерием, характеризующим количество металла, задаваемого на операцию высадки, и относительной разностенностью заготовки:

$$F = \pi(D_1 D_2 - (D_1 - S_1 - S_3) \cdot (D_2 - S_2 - S_4)); \quad (15)$$

$$\frac{\Delta S}{S_{\text{НОМ}}} = \frac{S_{\text{max}} - S_{\text{min}}}{S_{\text{НОМ}}}, \quad (16)$$

где $S_{\text{max}} = \max\{S_1, S_2, S_3, S_4\}$, $S_{\text{min}} = \min\{S_1, S_2, S_3, S_4\}$.

Анализ фактических размеров заготовок до проведения операции высадки позволил установить, что максимальная площадь поперечного сечения у четырех труб обусловлена наличием утолщенных концов, возникающих при прокатке заготовок на редуционном стане. Относительная разностенность заготовок находилась в узком диапазоне значений, что в некоторой степени снизило эффективность изучения влияния этого фактора на качество продукции.

Высадка концов труб производилась в соответствии с режимами, установленными в технологических инструкциях предприятия. При этом на 10 трубах, размеры которых отличались наиболее существенным образом, изучалось влияние объема металла и разностенности заготовки на качество и размеры продукции, а на трех трубах, размеры которых были практически одинаковы, было определено влияние осевого положения трубы относительно матриц и условий трения на контактной поверхности с инструментом. Изменение условий трения осуществлялось в последнюю очередь путем отключения системы подачи смазки на инструмент. Высаженные в соответствии с планом промышленного эксперимента концы труб были отрезаны для проведения более детального изучения качества и измерений в 8 продольных сечениях с переднего и заднего конца, а также вдоль минимальной и максимальной толщины стенки заготовки.

В результате анализа полученных данных было установлено, что диаметр высаженной части на расстоянии $(20 \div 30)$ мм от торца трубы увеличивается в среднем на 0,2 мм. Это объясняется влиянием более интенсивного охлаждения торца заготовки за счет более продолжительного контакта с холодным инструментом и должно быть учтено в системе управления качеством продукции. Кроме того, как показали результаты измерений, уменьшение точности наружного диаметра высаженного конца трубы вызвано взаимным смещением матриц в плоскости их разъема в направлении, перпендикулярном оси пресса.

Для используемой в ходе промышленного эксперимента калибровки технологического инструмента по формуле (4) было рассчитано значение толщины стенки заготовки 5,96 мм, превышение которого будет приводить к появлению дефектов на внутренней поверхности трубы. Среди отобранных для исследования заготовок лишь у одной из них среднее значение толщины стенки 6,09 мм превышало указанное значение. В результате высадки этой заготовки на внутренней поверхности изделия обнаружен дефект в виде незаполнения штампового пространства металлом (рисунок 11). Дефект расположен на расстоянии от 7 до 22 мм от торца патрубка, что соответствует результатам компьютерного моделирования. Использование заготовок, среднее значение толщины стенки которых 5,87 мм и менее, не привело к появлению внутренних дефектов, что также подтверждает справедливость выводов теоретического исследования.

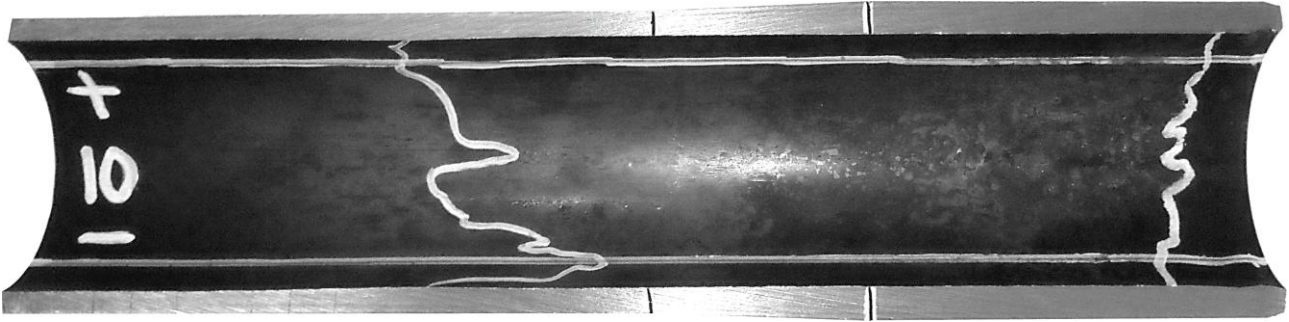


Рисунок 11 – Вид дефекта на внутренней поверхности патрубка

По результатам компьютерного моделирования было найдено также максимальное значение разностенности заготовки 0,0969, определяемой по формуле (16), превышение которого приводит к появлению внутренних дефектов. Однако ввиду более узкого диапазона значений фактической разностенности заготовок и близости максимального из них 0,1053 к критическому напрямую подтвердить этот вывод не удалось. Тем не менее, имеется косвенное подтверждение справедливости вывода о влиянии разностенности заготовки на качество продукции, связанное с изменением цвета окалины на внутренней поверхности соответствующих патрубков на расстоянии (20÷30) мм от торца.

Между длиной цилиндрической части высаженного конца трубы и средней толщиной стенки заготовки выявлена функциональная связь вида:

$$L_{\text{выс}} = 18,81 \cdot S_{\text{ср}} - 6,72 \text{ мм.} \quad (17)$$

Однако наличие утолщенных концов труб приводит к занижению фактической длины высадки по отношению к расчетной, что снижает точность продукции и, как показано выше, может приводить к образованию внутренних дефектов.

Длина внутренней поверхности контакта металла трубы с пуансоном определяется соответствующим значением толщины стенки в рассматриваемом продольном сечении заготовки. Таким образом, наличие разностенности трубы приводит к искривлению формы контактной поверхности в соответствии с рисунком 8, а. Это также означает, что в процессе высадки концов труб деформация металла развивается преимущественно в продольном направлении, а в тангенциальном затруднена. Результаты промышленного эксперимента полностью подтвердили результаты компьютерного моделирования.

Отклонение положения трубы относительно матриц в осевом направлении, а также ухудшение условий трения на контактной поверхности с инструментом приводят к преждевременному завершению процесса высадки предположительно за счет увеличения требуемого усилия прессования, что соответствует выводам теоретических исследований.

По результатам промышленного исследования процесса высадки концов труб сделаны выводы о существенном влиянии на размеры и качество внутренней поверхности готовых изделий толщины стенки и разностенности заготовки, наличия утолщенных концов труб, точности настройки оборудования пресса и условий трения на контактной поверхности с инструментом. Подтверждена сходимость результатов промышленного эксперимента с результатами конечно-элементного моделирования, в том числе методами математической статистики.

Пятая глава посвящена повышению эффективности технологии высадки концов труб нефтяного сортамента на гидравлических прессах. Благодаря разработке новой калибровки технологического инструмента, успеху освоения которой способствовали результаты исследования формоизменения труб в процессе высадки, а также ограничению максимальной толщины стенки заготовки на уровне +10% удалось стабилизировать размеры высаженных концов труб в сравнении с периодом гарантийно-сдаточных испытаний пресса в 2009 г. Проблемы, связанные с возникновением внутренних незаполнений в области переходного участка высаженного конца трубы, решались в основном за счет повышения рабочего давления в главном гидроцилиндре пресса. Однако по результатам исследований температурных условий процесса высадки концов труб были скорректированы режимы нагрева заготовок в сторону увеличения длины нагрева и повышения температуры около торца. Эти мероприятия позволили сократить количество внутренних дефектов и увеличить выход годной продукции до (97-99)%.

Рассмотрены также пути повышения эффективности процесса высадки, основанные, направленные на улучшение условий трения на контактной поверхности с инструментом и повышение его износостойкости.

По данным фирмы SMS Meer рекомендуемой к применению смазкой является Rhenus Thermosyn SGV, которая представляет собой водную эмульсию, содержащую мелкодисперсный графит, антифрикционные и диспергирующие присадки. Однако использование этой смазки характеризуется большим расходом более 4,5 кг на тонну продукции, низкой степенью разбавления водой не более 1:10, а также неудовлетворительным разделяющим эффектом. В результате проведенных в ОАО «Первоуральский новотрубный завод» опытных работ по подбору эффективной технологической смазки для операции высадки концов труб удалось рекомендовать более эффективные продукты как с технологической, так и с экономической точки зрения (таблица 1). Расход смазки был уменьшен более чем в 2,5 раза при одновременном повышении качества выпускаемой продукции.

Таблица 1 – Показатели эффективности технологических смазок

Название продукта	Deltaforge F-578	Fenella Fluid F 3625 G	Berulit 906 HP
Фирма-производитель	Henkel	Shell	Bechem
Степень разбавления водой	до 1:35	до 1:40	до 1:37
Удельный расход смазки, кг на тонну продукции	не более 2,5	не боле 2,0	не более 2,5

Стойкость инструмента для высадки концов труб является одним из наиболее важных показателей эффективности технологии, который влияет не только на простои оборудования, но и на условия трения на контактной поверхности, и на качество выпускаемой продукции. Пуансоны и матрицы работают в тяжелых условиях термоциклического нагружения и основной причиной выхода их из строя является образование сетки разгара и поверхностных трещин (рисунок 12).



Рисунок 12 – Сетка разгара и поперечная трещина на поверхности пуансона

В работе предложена технология изготовления технологического инструмента с применением операции ионно-плазменного азотирования, способной повысить твердость поверхностного слоя в среднем до 60 HRC. В результате проведения опытных работ в ОАО «Первоуральский новотрубный завод» подтверждена высокая эффективность новой технологии изготовления инструмента. Стойкость пуансонов была увеличена более чем в 3,5 раза при удорожании изготовления на 18,5%.

В ходе компьютерного моделирования высадки концов труб были изучены особенности формоизменения металла, позволяющие утверждать о возможности промышленной реализации процесса высадки концов бурильных труб ПН 73х9 в соответствии с ГОСТ Р 50278-92 за один проход. При этом было показано, что схема, при которой штамповое пространство, образованное матрицами и пуансоном, существенно больше фактической толщины стенки заготовки, реализуется с меньшей склонностью металла трубы к образованию внутренних дефектов. Математическое моделирование процесса высадки также подтвердило возможность реализации этой технологии с точки зрения расчетного значения усилия прессования 1370 кН. Для проверки справедливости выводов теоретического исследования разработан новый технологический про-

цесс высадки концов бурильных труб ПН 73х9 по ГОСТ Р 50278-92 за один проход.

В ходе проведения опытных работ наблюдалось образование торцевого облоя, вызванного затеканием металла в зазор между рабочей цилиндрической поверхностью матриц и пуансоном, а также в ряде случаев образование «неполого» перехода от внутренней конусной части высадки к телу трубы. После увеличения длины нагрева концов заготовок, что соответствует результатам исследования температурных условий процесса, «непологий» переход был устранен и окончательный выход годной продукции составил 100%. Результаты первичного осмотра высаженных концов труб представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты первичного осмотра труб

Предъявлено		Годные		Брак вида «непологий переход»	
шт.	тонн	шт.	тонн	шт.	тонн
210	30,55	195	28,37	15	2,18

Наиболее важный вывод, который был сделан по результатам промышленного опробования новой технологии, связан с тем, что дефектов на внутренней поверхности труб в виде незаполнений штампового пространства металлом обнаружено не было. Качество внутренней поверхности высаженных концов находилось на высоком уровне (рисунок 13). Этот факт подтверждает результаты компьютерного моделирования и свидетельствует о верности выводов, сделанных относительно особенностей формоизменения металла при высадке концов труб. Кроме того, подтверждены результаты математического моделирования. Так усилие высадки, рассчитанное по формуле (6) при подстановке фактических размеров высаженных концов бурильных труб, находится на уровне в 1450 кН, что соответствует давлению в главном гидроцилиндре прессы 140 бар.



Рисунок 13 – Высаженный конец бурильной трубы ПН 73х9 в соответствии с ГОСТ Р 50278-92

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненной диссертационной работы достигнута цель и получены следующие результаты:

- теоретически с применением метода конечных элементов изучено формоизменение металла в процессе высадки концов труб в зависимости от фактических размеров заготовок в пределах допусков на диаметр и толщину стенки, в том числе от их разностенности, длины, температуры и равномерности нагрева концов труб перед высадкой, условий трения на контактной поверхности с инструментом, параметров настройки оборудования прессы, включая точность взаимного расположения трубы, пуансона и матриц;
- установлены причины и условия образования дефектов на внутренней поверхности высаженных концов труб в виде незаполнений штампового пространства металлом, в результате чего сформулированы научно-обоснованные требования к размерам заготовки и к калибровке технологического инструмента;
- разработана математическая модель процесса высадки концов труб, позволяющая с высокой точностью производить расчет усилия прессования, которое необходимо для получения качественного изделия;
- в ходе промышленного исследования процесса высадки концов труб подтверждены закономерности формоизменения металла, установленные по результатам теоретических исследований;
- изучено фактическое распределение температур в металле заготовки в процессе нагрева и последующей высадки;
- предложены пути повышения эффективности технологии высадки, включающие увеличение длины нагрева концов труб перед высадкой, ужесточение требований к размерам заготовок, улучшение условий трения на контактной поверхности с инструментом, а также повышение износостойкости технологического инструмента;
- на основе результатов теоретического исследования процесса высадки концов труб, включая расчет необходимого усилия прессования, разработана новая технология высадки концов бурильных труб ПН 73х9 по ГОСТ Р 50278-92 за один проход;
- новая технология высадки концов бурильных труб ПН 73х9 успешно опробована в промышленных условиях и показала возможность интенсификации процессов высадки;

- в работе представлена научно-обоснованная технология высадки концов труб, имеющая существенное значение для развития производства насосно-компрессорных и бурильных труб благодаря уменьшению числа проходов, уменьшению материало- и энергозатрат, повышению производительности оборудования, качества продукции и уменьшению брака.

Перспективы дальнейшей разработки выбранной темы исследований заключаются в создании методики и написании программы для автоматического расчета калибровки технологического инструмента, режимов нагрева и деформации концов труб, которые позволят минимизировать количество проходов операции высадки исходя из технических возможностей оборудования и требуемого качества продукции.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

Статьи в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК:

1. Ерпалов, М.В. Проблемы и достижения в производстве насосно-компрессорных труб с высаженными концами на ОАО «ПНТЗ» / М.В. Ерпалов, А.А. Богатов, С.В. Сыстеров, Ю.Б. Кулемин // Черные металлы. – 2015. – №2. – С. 28-33. (0,60 п.л./0,30 п.л.)
2. Ерпалов, М.В. Исследование формоизменения металла при высадке концов труб / М.В. Ерпалов, А.А. Богатов, С.В. Сыстеров, Ю.Б. Кулемин // Сталь. – 2015. – №3. – С. 60-63. (0,59 п.л./0,30 п.л.)
Erpalov, M.V. Shaping of metal in upsetting the ends of a pipe / M.V. Erpalov, A.A. Bogatov, S.V. Systerov, Yu.B. Kulemin // Steel in Translation. – 2015. – Vol. 45. – P. 212-215. (0,39 п.л./0,20 п.л.)
3. Ерпалов, М.В. Исследование температурных полей при высадке концов труб / М.В. Ерпалов, А.А. Богатов, С.В. Сыстеров, Ю.Б. Кулемин // Сталь. – 2015. – №9. – С. 42-46. (0,43 п.л./0,21 п.л.)

Другие публикации:

4. Ерпалов, М.В. Проблемы и достижения в производстве насосно-компрессорных труб с высаженными концами на ОАО «ПНТЗ» / А.И. Дронов, В.В. Головин, Г.Н. Кондратьева и др. // IX Конгресс прокатчиков: Материалы Международной конференции. – Череповец, 2013. – С. 170-176. (0,70 п.л./0,35 п.л.)
5. Ерпалов, М.В. Экспериментальное исследование температурных полей при индукционном нагреве концов труб перед высадкой / М.В. Ерпалов, И.Е. Осипов, Ю.Б. Кулемин и др. // Пластическая деформация металлов: Материалы Международной конференции. – Украина, Днепрпетровск, 2014. – С. 131-137. (0,69 п.л./0,35 п.л.)

6. Ерпалов, М.В. Экспериментальное исследование температурных полей при индукционном нагреве концов труб перед высадкой / М.В. Ерпалов, И.Е. Осипов, А.А. Богатов // Труды междунар. конф. «Трубы-2014». – Челябинск: РосНИТИ, 2014. – Ч. 2 – С. 52-56. (0,72 п.л./0,36 п.л.)
7. Ерпалов М.В. Исследование и совершенствование технологии производства насосно-компрессорных труб с высаженными концами / М.В. Ерпалов, А.А. Богатов, А.С. Кунина // Инновации в материаловедении и металлургии: Материалы III Международной интерактивной научно-практической конференции. – Екатеринбург, 2013. – С. 96-97. (0,18 п.л./0,09 п.л.)
8. Ерпалов, М.В. Модернизация технологии высадки концов труб с целью повышения эффективности гидравлического пресса фирмы SMS Meer / М.В. Ерпалов, Г.Н. Кондратьева, А.А. Богатов // Инновационные технологии в металлургии и машиностроении: Материалы Международной конференции. – Екатеринбург, 2014. – С. 581-592. (1,26 п.л./1,63 п.л.)
9. Ерпалов, М.В. Проблемы и достижения в производстве насосно-компрессорных труб с высаженными концами на ОАО «ПНТЗ» / А.И. Дронов, В.В. Головин, Г.Н. Кондратьева и др. // Новые технологии и достижения в металлургии и материаловедении: Материалы XIV Международной научной конференции. – Польша, Ченстохова, 2013. – С. 123-131. (0,60 п.л./0,30 п.л.)
10. Ерпалов М.В. Освоение технологии высадки концов труб нефтяного сортамента на ОАО «ПНТЗ» / М.В. Ерпалов, Г.Н. Кондратьева, В.И. Тазетдинов и др. // ОМД 2014. Фундаментальные проблемы. Инновационные материалы и технологии: Сборник докладов международного научно-технического конгресса. – М.: ООО «Белый ветер», 2014. – Ч.2. – С. 64-69. (0,35 п.л./0,17 п.л.)