

На правах рукописи

ДРОНОВ Алексей Иванович

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ
И ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ НАРУЖНОЙ ВЫСАДКИ
КОНЦОВ НАСОСНО-КОМПРЕССОРНЫХ ТРУБ
ИЗ КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ**

05.02.09 – Технологии и машины обработки давлением

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2018

Работа выполнена на кафедре «Металлургические и роторные машины» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель доктор технических наук, доцент,
ПАРШИН Сергей Владимирович

Официальные оппоненты: **РААБ Георгий Иосифович,**
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
авиационный технический университет»,
г. Уфа, руководитель лаборатории
«Технологии интенсивной пластической
деформации» научно-исследовательского
института физики перспективных материалов;

КОЗЛОВ Александр Васильевич,
доктор технических наук, доцент,
ФГАОУ ВО «Южно-Уральский
государственный университет (национальный
исследовательский университет)»,
г. Челябинск, профессор кафедры «Технология
машиностроения, станки и инструменты»

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт машиноведения
Уральского отделения Российской академии
наук», г. Екатеринбург

Защита состоится 14 июня 2018 г. в 17:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.285.10 на базе ФГАОУ ВО «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 ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <http://lib.urfu.ru/mod/data/view.php?d=51&rid=277969>

Автореферат разослан «_____» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Раскатов Евгений Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Известно, что более 60% сортамента труб, производимых на российских предприятиях, предназначено для нефтегазового комплекса. Основные производители трубной продукции – предприятия ТМК, Группа ЧТПЗ, ОМК. При любом способе эксплуатации скважин жидкость и газ поднимаются по специальным насосно-компрессорными трубами, опускаемым в скважины перед началом их эксплуатации. Только в Свердловской области ежегодно выпускаются свыше 450 тонн насосно-компрессорных труб.

Подаваемые в колодец насосно-компрессорные трубы соединяются в колонну путем свинчивания труб между собой. Для этого на обоих концах каждой насосно-компрессорной трубы нарезается резьба, к которой предъявляются высокие требования по надежности с точки зрения прочности, коррозионной стойкости и герметичности соединения. Одним из способов обеспечения данных критериев является формирование утолщенной стенки на концах насосно-компрессорных труб путем наружной высадки.

Анализ известных технологий и устройств для наружной высадки концов труб показал, что наиболее эффективным методом получения труб с высаженными концами является высадка на гидравлических прессах. На сегодняшний день освоено производство насосно-компрессорных труб длиной от 6 до 10,5 метров с наиболее часто используемыми типоразмерами 60,32x4,83 мм (60,3x5,0 мм), 73,02x5,51 мм (73,0x5,5 мм) и 89,90x6,45 мм (88,9x6,5 мм) согласно стандартам API-5CT и ГОСТ 633-80.

Насосно-компрессорные трубы работают в исключительно тяжелых условиях повышенных нагрузок, температур и агрессивных сред. Для повышения эксплуатационной надежности изделия и поддержания высокого ресурса его работы без создания дополнительных антикоррозионных покрытий принято решение изготавливать трубы из легированных сталей с содержанием хрома в пределах 1-5%, которые позволяют увеличить наработку колонны до 6 раз и получить значительный экономический эффект.

Широкое внедрение труб НКТ со стандартной и удлиненной высаженной частью и из коррозионностойких марок сталей сталкивается с проблемами создания достаточно производительных технологических процессов, инструмента и оборудования для производства таких труб, необходимостью проведения теоретических и экспериментальных исследований с целью определения технологических нагрузок, режимов обработки, рациональной геометрии инструмента и параметров оборудования.

Степень разработанности темы исследования

Теоретическим исследованиям процесса высадки концов труб посвящены работы Тарновского И.Я., Остренко В.Я., Богатова А.А., Выдрин А.В. и ряда других авторов. Так в работах Остренко В.Я. рассматриваются вопросы определения инженерным методом энергосиловых параметров процесса осадки кольцевой заготовки, расположенной в пространстве между матрицей и пуансоном, параллельными плитами. В работе Тарновского И.Я. решается задача

по определению усилий и формоизменения трубной (кольцевой) заготовки ограниченной снаружи контейнером при ее обжатии пуансоном на некоторую величину.

В работах Выдрина А.В., Баричко Б.В., Зинченко А.В. рассмотрено математическое моделирование процесса высадки концов труб методом линий скольжения. В результате определена зависимость для нахождения нагрузки, действующей на пуансон. Для нахождения величины сопротивления металла пластической деформации для сталей 32Г2 и 25ХГМА и коэффициента трения μ в интервале температур от 1050 °С до 1175 °С использованы выражения, полученные по результатам исследований осадки цилиндрических образцов.

Конечно-элементное моделирование процесса высадки концов труб проведено в работах Богатова А.А., Ерпалова М.В. и др. с целью изучения особенностей формоизменения металла в процессе высадки, установления причин и условий образования дефектов на поверхности готовых труб. Изучено влияние длины, температуры, неравномерности нагрева концов труб, условий трения, взаимного расположения инструмента и заготовки на процесс формоизменения металла труб в процессе их наружной высадки.

Целью работы является создание технологии, оборудования и инструмента для наружной высадки концов труб из коррозионностойких марок сталей; исследование энергосиловых параметров и нагруженности инструмента процесса наружной высадки.

Задачи исследования:

1. Создание математической модели процесса наружной высадки концов труб, включающей нагрев заготовки под высадку, ее охлаждение при транспортировке на ось пресса, деформацию конца трубы, позволяющей определять энергосиловые параметры процесса и нагруженность инструмента с учетом граничных условий и реологических свойств металла трубы при горячей обработке, что необходимо для обоснованного выбора соответствующего оборудования и инструмента.

2. Проведение параметрического анализа с целью определения зависимостей энергосиловых параметров и нагруженности инструмента процесса наружной высадки концов труб из коррозионностойких марок сталей от технологических режимов обработки, геометрии трубной заготовки и инструмента.

3. Проведение экспериментальных исследований с целью проверки адекватности созданной математической модели и получения новых сведений о процессе наружной высадки.

4. Выдача рекомендаций по ведению процесса наружной высадке концов труб из коррозионностойких марок сталей, составу оборудования и инструмента.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач использовали: общие положения теории обработки металлов давлением, метод конечных элементов, реализованный в программном пакете DEFORM, геометрия моделей заготовки и инструмента, входящих в расчетную схему

процесса наружной высадки концов насосно-компрессорных труб, построена в программном пакете твердотельного моделирования SolidWorks.

Исследования реологических свойств коррозионностойких сталей проводились на автоматизированной пластометрической установке. Для предотвращения тепловых потерь в процессе испытания образец обертывается каолиновой ватой и вместе с бойками помещается в контейнер, в котором контроль температуры образца в процессе нагрева и её изменения внутри контейнера в ходе испытания осуществляется с помощью алюмельхромелевой термопары.

Экспериментальные исследования по определению усилий высадки проводили на гидравлическом прессе для наружной высадки концов труб SMS Meer цеха №4 АО «Первоуральский новотрубный завод». Пресс оборудован электронным манометром для измерения давления в главном цилиндре с выводом диаграммы на монитор оператора прессы.

Научная новизна работы:

1. Создание математической модели процесса наружной высадки концов труб, базирующейся на методе конечных элементов, включающей нагрев заготовки под высадку, ее охлаждение при транспортировке на ось прессы, деформацию конца трубы, позволяющей определять энергосиловые параметры процесса и нагруженность инструмента с учетом граничных условий и реологических свойств металла трубы при горячей обработке.

2. Определение зависимостей энергосиловых параметров процесса наружной высадки концов труб из коррозионностойких марок сталей от технологических режимов обработки, геометрии трубной заготовки и инструмента.

3. Получение эмпирических зависимостей сопротивления деформации коррозионностойких сталей 15X5МФБ, 18X3МФБ и 18ХМФБ, используемых при изготовлении насосно-компрессорных труб, от степени, скорости и температуры деформации.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. С использованием теории обработки металлов давлением, анализа методов решения задач и известных решений других авторов разработан алгоритм решения задачи определения напряженно-деформированного состояния при наружной высадке насосно-компрессорных труб, реализованный с помощью создания математической модели процесса, базирующейся на методе конечных элементов. Указанный алгоритм внедрен в учебный процесс подготовки бакалавров и магистров ФГАОУ ВО УрФУ, обучающихся по направлению 15.03.02, 15.04.02 – Технологические машины и оборудование.

2. Разработан алгоритм численной реализации и проведен параметрический анализ созданной математической модели, которые позволили получить значения энергосиловых параметров процесса наружной высадки концов труб, рациональные длины зон нагрева концов труб под высадку и геометрические параметры высадочного инструмента.

3. Экспериментальные и теоретические исследования процесса наружной высадки концов труб, проведенные в рамках данной работы, позволили определить параметры технологии, оборудования и инструмента для наружной высадки концов труб, которые послужили основой при выдаче рекомендаций по созданию технологии и инструмента для наружной высадки концов насосно-компрессорных труб из коррозионностойких сталей, принятых АО «ПНТЗ» (г. Первоуральск, Свердловская обл.).

4. Проведенные экспериментальные работы по определению реологических свойств рассматриваемых коррозионностойких марок сталей позволяют использовать полученные данные для решения различных задач обработки металлов давлением с их применением.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель процесса наружной высадки концов труб, базирующаяся на методе конечных элементов, позволяющая определять энергосиловые параметры процесса и нагруженность инструмента с учетом граничных условий и реологических свойств материала высаживаемых труб.

2. Результаты теоретических и экспериментальных исследований по определению зависимостей энергосиловых параметров процесса наружной высадки от режимов обработки, геометрии трубной заготовки и инструмента при наружной высадке концов труб, а также экспериментальные зависимости величины сопротивления пластической деформации для коррозионностойких марок сталей 15Х5МФБ, 18Х3МФБ и 18ХМФБ.

3. Рекомендации по ведению процесса наружной высадки концов труб из коррозионностойких марок сталей, составу оборудования и инструмента.

Степень достоверности результатов

Достоверность результатов теоретических и экспериментальных исследований обеспечена применением фундаментальных законов механики сплошной среды, современных численных методов решения, использованием поверенных приборов для выполнения экспериментальных замеров величин, технических средств и современных методик обработки данных, а также количественным согласованием результатов математического моделирования процесса наружной высадки насосно-компрессорных труб с экспериментальными данными, полученными в заводских условиях.

Апробация работы

Основные результаты научно-исследовательской работы опубликованы в ряде научно-технических изданий, доложены и обсуждены на следующих конференциях: XIV Международная научная конференция «Новые технологии и достижения в металлургии и материаловедении», г. Ченстохова, Польша, 2013; Workshop on Computer Science and Information Technologies (CSIT'2014), Sheffield, England; 11 международная научно-техническая конференция «Современные металлические материалы и технологии» (СММТ'2015), г. Санкт-Петербург, 2015; XXII Международная научно-практическая конференция «Инновации и импортозамещение в трубной промышленности (трубы-2016)», г. Челябинск, 2016; International Conference on Research and Innovations in Science,

Engineering & Technology (ICRISET2017), Anand, India, 2017; IX Всероссийская научно-практическая конференция «Актуальные проблемы машиностроения», г. Самара, 2017.

Публикации по теме диссертации. По теме диссертации опубликовано 10 статей, в том числе 5 статей в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ, и 1 статья, входящая в перечень базы данных Scopus.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, 1 приложения. Работа изложена на 174 страницах текста, содержит 93 рисунка, 35 таблиц. Список литературы содержит из 105 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность выбранного направления исследования, обозначена степень изученности тематики исследования; сформулированы его цели и задачи; показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе выполнен обзор существующих видов труб, применяющихся при добыче нефти и газа. Показаны особенности их конструкции, существующие типоразмеры и сортамент буровых, обсадных и насосно-компрессорных труб.

На основании существующих стандартов на насосно-компрессорные трубы рассмотрен сортамент труб с безмуфтовым соединением труб в колонну; описаны условия эксплуатации труб и основные причины выхода продукции из строя. Перечислены существующие способы повышения наработки труб в скважине, связанные с заменой материалов труб на более износо- и коррозионностойкие, а также использованием химических реагентов и созданием защитных полимерных покрытий. Обоснованы преимущества применения низкоуглеродистых легированных хромом (до 1-5%) сталей в качестве материала труб для повышения их долговечности в условиях контакта с агрессивными средами при разработке месторождений за счет сравнения имеющихся данных по опытам промышленных испытаний на месторождениях между марками стали 30Г2 и 18ХМФБ, 15ХМФБ.

Перечислены основные операции, входящие в технологический цикл выпуска труб нефтяного сортамента. Рассмотрены основные типы высадки (наружная, внутренняя и комбинированная), а также технологические процессы получения высаженного конца: электровысадкой и высадкой в закрытом калибре на горизонтально-ковочных машинах с электромеханическим приводом или гидравлических высадочных прессах. На текущий момент способ высадки концов труб в закрытых калибрах является наиболее универсальным, производительным и позволяет получать высаженные концы с более качественной поверхностью, чем при прочих способах.

Для перечисленных способов высадки произведен анализ существующих конструкций оборудования (российского и зарубежного), указаны технологические возможности по высадке на них различных видов продукции, в

том числе и насосно-компрессорных труб. В отдельные группы выделены электровысадочные станки, горизонтально-ковочные машины и гидравлические высадочные прессы. Описаны основные подходы по проектированию калибровок высадочного инструмента, применяемого на данных машинах, а также геометрии получаемых высадкой изделий.

Анализ существующего на сегодня оборудования для производства насосно-компрессорных труб с высаженными наружу концами показывает, что горизонтальные гидравлические прессы обеспечивают широкие возможности по регулированию скорости пуансона и контролю действующих на оборудование нагрузок, имеют высокий уровень автоматизации, хороший доступ к узлам машины для проведения обслуживания и наблюдения за технологическим процессом.

Обзор существующих решений по определению параметров наружной высадки концов труб показал, что отсутствуют теоретические решения по определению энергосиловых параметров процесса, учитывающие нагрев и охлаждение конца трубы до установки на ось прессования; для удлиненной высадки; с использованием кривых упрочнения для коррозионностойких марок сталей (15X5МФБ, 18X3МФБ и 18ХМФБ); рассматривающие нагруженность инструмента, с целью прогнозирования его износа при высадке концов труб, подбора смазок и способов их нанесения; с нахождением рациональных, с точки зрения энергосиловых параметров, длин зоны нагрева и скорости движения пуансона; с изучением влияния температуры, геометрии труб, условий трения на поверхностях контакта инструмента с металлом в широких пределах (в том числе разных на пуансоне и матрице) на усилие высадки и др.

На основе результатов проведенного обзора сформулированы задачи исследования по определению энергосиловых параметров и нагруженности инструмента при наружной высадке концов труб.

Во второй главе на основании анализа известных методов теоретического исследования процессов обработки металлов давлением для решения задачи по определению параметров процесса наружной высадки концов НКТ выбран метод конечных элементов (МКЭ) в связи с тем, что он обладает широкими возможностями по определению напряженно-деформированного состояния металла, конечного формоизменения, энергосиловых параметров, температур. Согласно этому методу область решения дискретизируется на конечные элементы, для которых задаются физико-механические свойства материалов инструмента и заготовки, начальные и граничные условия. Полученная затем система линейных дифференциальных уравнений решается прямым или итерационным методом. Для решения задачи применяется программный комплекс, в котором реализуется МКЭ.

При обосновании расчетной схемы моделирования процесса наружной высадки в нее включаются объекты, выполняющие роль заготовки и инструмента, т.е. разъемной матрицы и пуансона. Процесс рассматривается от момента начала нагрева заготовки в индукторе с охлаждением в процессе передачи от индуктора на ось высадочного прессы и до момента остановки

прямого хода пуансона пресса (с передачей результатов решения от каждой предыдущей операции к последующей). Схема очага деформации металла при высадке концов насосно-компрессорных труб, по мере движения пуансона, представлена на рис. 1.

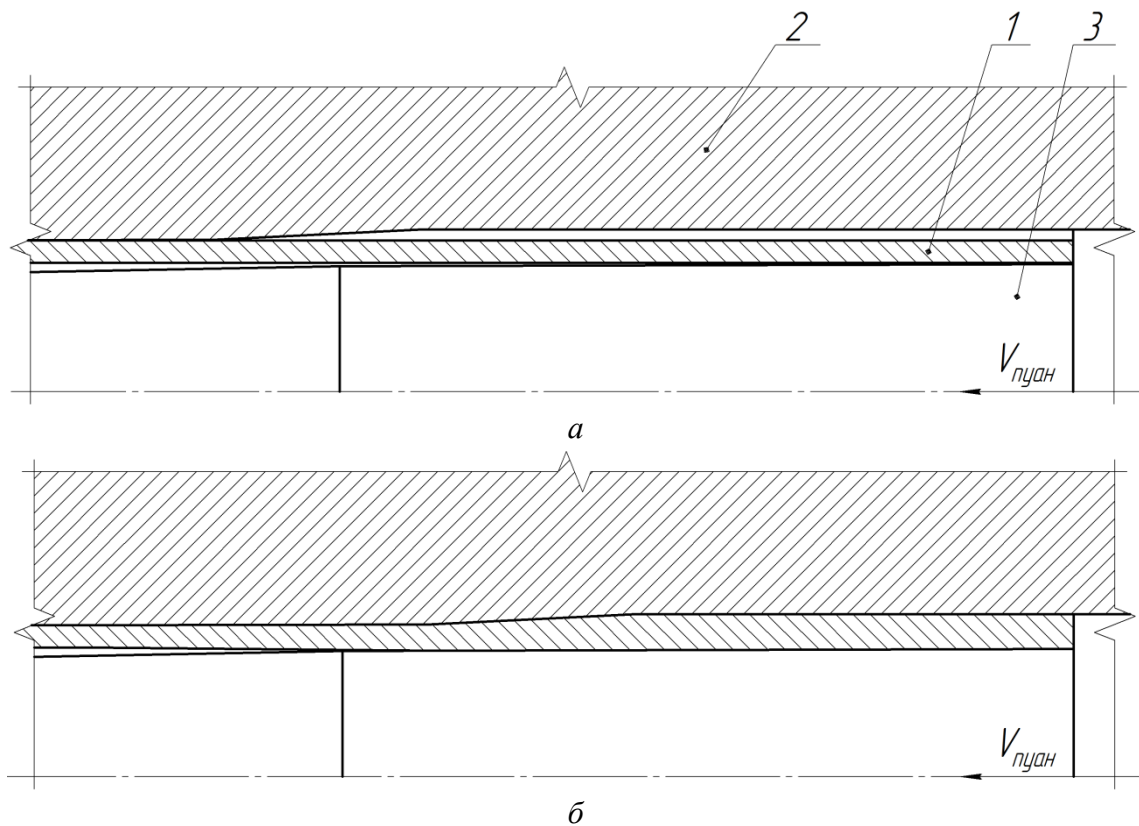


Рисунок 1 – Последовательность процесса наружной высадки концов НКТ
(*а* – начальное положение пуансона; *б* – окончательное положение пуансона;
1 – заготовка; 2 – разъемная матрица; 3 – пуансон)

Заготовка принимается абсолютно пластичным объектом, матрица – абсолютно жестким, пуансон в зависимости от постановки задачи может быть или абсолютно жестким или абсолютно упругим объектом.

Поле скоростей точек в деформируемом металле при наружной высадке концов труб может быть описано выражением в векторной форме вида

$$\mathbf{u} = \mathbf{N}^T \mathbf{v},$$

где \mathbf{v} – вектор узловых значений скоростей;

\mathbf{N} – матрица функций формы элемента, определяемые согласно выражениям

$$\mathbf{N}^T = [q_1, q_2, \dots, q_n]$$

$$\mathbf{v}^T = \{v_1, v_2, \dots, v_n\},$$

где T – индекс, обозначающий транспонирование;

n – произведение общего числа узлов на число степеней свободы, приходящееся на один узел.

Основное уравнение для решения задач методом конечных элементов с использованием вариационных принципов может быть представлено в виде

$$\int_V \sigma_i \delta \dot{\varepsilon}_i dV - \int_{S_F} F_i \delta u_i dS = 0, \quad (1)$$

где σ_i – интенсивность напряжений;

F_i – усилия, действующие на поверхности контакта металла с инструментом;

V – объем рассматриваемой области;

S_F – поверхность области, на которой действуют усилия;

δu_i – вариация скоростей точек поверхности;

$\delta \dot{\varepsilon}_i$ – вариация интенсивности скоростей деформации.

Закон действия сил внешнего трения на поверхности контакта инструмента с металлом согласно уравнению Э. Зибеля:

$$\tau = \psi \tau_s$$

где τ – касательное напряжение;

τ_s – предел текучести материала при сдвиге;

ψ – показатель трения.

Сопротивление деформации металла в случае горячей обработки металла может быть задано выражением вида

$$\sigma_s = \sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T),$$

где ε – степень деформации;

$\dot{\varepsilon}$ – скорость деформации;

T – температура.

Матричная запись выражения (1) в конечно-элементной постановке имеет вид

$$\mathbf{Kv} = \mathbf{f}$$

где \mathbf{K} – матрица жесткости элемента;

\mathbf{f} – усилия, действующие на конечный элемент.

Поле температур в деформируемом металле при наружной высадке концов труб может быть описано выражением в векторной форме вида

$$\mathbf{T} = \mathbf{N}^T \mathbf{T}_\alpha,$$

где \mathbf{T}_α – вектор узловых значений температур;

\mathbf{N} – матрица функций формы элемента, определяемых согласно выражениям:

$$\mathbf{N}^T = [q_1, q_2, \dots, q_n],$$

$$\mathbf{T}_\alpha = \{T_1, T_2, \dots, T_n\}.$$

Основное уравнение для решения тепловой задачи при обработке металлов давлением методом конечных элементов в вариационной постановке может быть записано в виде

$$\int_V k_1 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \delta T dV + \int_V \rho c \frac{dT}{dt} \delta T dV - \int_V k \sigma_i \dot{\varepsilon}_i \delta T dV - \int_S k_1 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \delta T dS = 0 \quad (2)$$

где k_1 – коэффициент теплопередачи;

ρ – плотность материала;

c – теплоемкость материала;

k – доля работы пластической деформации переходящая в тепло;

T – температура в точках рассматриваемой области;
 δT – вариация температуры в точках рассматриваемой области;
 S – поверхность рассматриваемой области;
 t – время.

Матричная запись выражения (2) в конечно-элементной постановке имеет вид

$$CT + K_C T = Q$$

где C – матрица теплоемкости;

K_C – матрица теплопередачи;

Q – вектор тепловых нагрузок в узлах конечного элемента.

Уравнения деформационной и тепловой задач могут быть решены с помощью метода итераций Ньютона-Рафсона, в котором $(n + 1)$ -ое приближение определяется по формуле

$$x_{n+1} = x_n - \frac{F(x_n)}{F'(x_n)}$$

Процесс нахождения решения считается завершенным, если

$$\left| \frac{x_{n+1} - x_n}{x_n} \right| \leq \Delta$$

где Δ – заданная точность решения.

В третьей главе рассмотрен алгоритм задания математической модели в программном комплексе DEFORM, базирующемся на применении МКЭ, описаны принципы компоновки расчетной схемы процесса, условия разбиения области решения КЭ с учетом свойств объектов схемы и особенностей их геометрии (рис. 2).

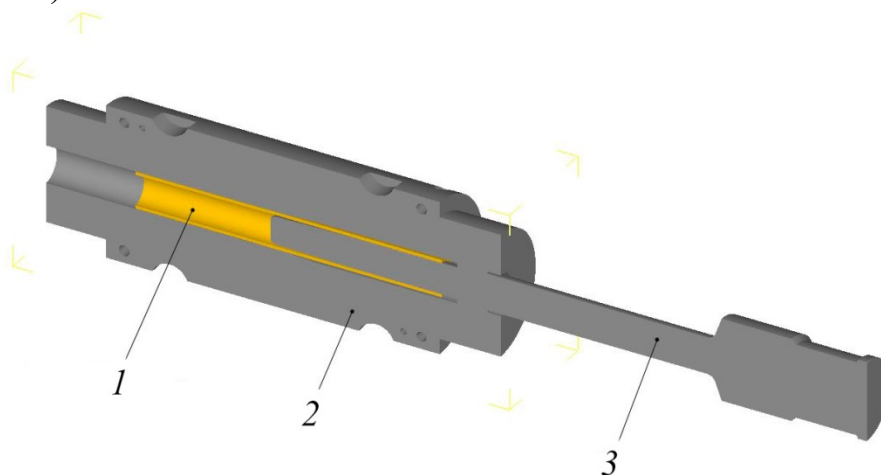


Рисунок 2 – Расчетная схема процесса наружной высадки концов НКТ в программном комплексе (1 – заготовка; 2 – составная матрица; 3 – пуансон)

Для проведения параметрического анализа выбраны НКТ 4 типоразмеров (табл. 1) и соответствующий им инструмент, геометрические параметры которого выбирались для стандартной и удлиненной наружной высадки концов труб.

Таблица 1 – Геометрические размеры НКТ с высаженными наружу концами

Диаметр трубы, мм	Толщина стенки, мм	Наружный диаметр высаженной части, мм	Длина высаженной части при стандартной высадке, мм	Длина высаженной части при удлиненной высадке, мм
60,32	4,83	65,89	101,6	203,2
73,02	5,51	78,59	107,95	196,6
73,0	7,0	78,60	95	195
88,90	6,45	95,25	114,3	215,9

В качестве переменных параметров при исследовании принимались: толщина стенки трубы $h = 4,83 \dots 7,00$ мм; марка стали: 15Х5МФБ, 18Х3МФБ и 18ХМФБ; показатель трения заготовки с матрицей и пуансоном по Зибелю $\psi = 0,1 \dots 1,0$; температура заготовки (после выхода из третьего индуктора): $T = 1100 \dots 1300$ °С; конусность пуансона: 1:100; 1:200; 1:250; 1:310 и 1:360; длина нагреваемой части трубы: $l = 240 \dots 505$ мм; скорость перемещения пуансона: $v = 30 \dots 500$ мм/с; поперечная разнотолщинность заготовки $\Delta h = 0 \dots 1,2$ мм; величина отклонения оси инструмента от оси заготовки: $\delta = 0 \dots 0,5$ мм. Поперечная разнотолщинность заготовки оценивалась абсолютной величиной Δh (в мм) и характеризовала разницу между наибольшим и наименьшим значением толщины стенки в сечении трубной заготовки. Величина отклонения оси пуансона от оси заготовки в диапазоне $\delta = 0 \dots 0,5$ мм принималась при исследовании симметричного сечения заготовки.

При моделировании процессов стандартной и удлиненной наружной высадки концов труб была поставлена задача по определению рациональных параметров с точки зрения возможных значений температуры предварительного нагрева, геометрических размеров заготовки, условий трения в контакте заготовки с инструментом, скорости перемещения высадочного инструмента. Также для обоих видов наружной высадки выявлено влияния параметров технологии на нагруженность инструмента.

В результате параметрического анализа построены зависимости усилия высадки для стандартной и удлиненной процессов наружной высадки концов НКТ от температуры предварительного нагрева заготовки, а также длины нагретого под высадку участка трубы; при различных толщинах стенки первоначальной заготовки и наличии разнотолщинности стенки заготовки; от различных условий трения между заготовкой и высадочными матрицей и пуансоном; для различной скорости перемещения пуансона. Рассчитаны рациональные длины зоны нагрева заготовки под высадку, обеспечивающие минимальные значения усилия высадки, которые можно рекомендовать к внедрению на практике. Были определены значения усилий высадки при различных сочетаниях условий трения на границах металла с матрицей и металла с пуансоном для рассматриваемых типоразмеров труб. Рассмотрено влияния скорости перемещения пуансона на усилие высадки концов труб. Построены

зависимости влияния скорости перемещения пуансона на усилие высадки при прямом ходе инструмента.

Анализ значений усилия высадки, с точки зрения максимального усилия, развиваемого прессом SMS Meer (2500 кН) для исследуемых марок сталей позволяет определить диапазоны толщины стенки исходной заготовки при полном заполнении рабочего пространства инструмента.

Используя результаты расчета, с достаточной степенью точности можно определить максимально возможную длину высаженной части для марок сталей 15X5МФБ, 18X3МФБ и 18ХМФБ с учетом максимального усилия, развиваемого прессом SMS Meer в 2500 кН для труб типоразмера 73,02x5,51 мм диапазонов толщин стенок от номинальной и ниже (4,83...6,19 мм):

$$l_{max} = \frac{2500 - P_{ст}}{P_{удл} - P_{ст}} (l_{удл} - l_{ст}) + l_{ст}$$

где $P_{ст}$ и $P_{удл}$ – усилия, действующие на пуансон при высадке стандартного и удлиненного участка соответственно;

$l_{ст}$ и $l_{удл}$ – длина высаженного участка трубы при полном заполнении рабочего пространства инструмента при высадке стандартного и удлиненного участка. При этом $l_{max} \leq l_{удл}$.

Изучение нагруженности пуансона производилось с целью определения влияния параметров технологического процесса высадки на стойкость инструмента. Проведенные исследования позволили определить максимальные значения эквивалентных напряжений $\sigma_{эКВ}$, компоненты тензоров деформаций и напряжений, действующих в теле пуансона, определяющие степень нагруженности пуансона и, как следствие, его износ.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований процесса наружной высадки концов насосно-компрессорных труб и внедрения результатов исследований.

Исследование реологических свойств коррозионностойких марок стали 18ХМФБ, 18X3МФБ и 15X5МФБ в зависимости от термодинамических условий деформирования проводились на автоматизированной пластометрической установке, обеспечивающей максимальную силу деформирования 30 кН и изменение скорости деформации в диапазоне 0,005-10 с⁻¹. Для проведения исследований были подготовлены цилиндрические образцы из стали 15X5МФБ, 18X3МФБ и 18ХМФБ высотой $h_0 = 9 \pm 0,1$ мм и диаметром $d_0 = 6 \pm 0,1$ мм. В экспериментах имел место диапазон скоростей *I*, в котором скорость деформации $\dot{\epsilon}$ изменялась в пределах 0,02-0,065 с⁻¹; диапазон скоростей *II*, в котором скорость деформации $\dot{\epsilon}$ изменялась в пределах 0,2-0,6 с⁻¹ и диапазон скоростей *III*, в котором скорость деформации $\dot{\epsilon}$ изменялась в пределах 2,0-6,5 с⁻¹. Эксперименты на сжатие образцов провели для трех температур испытания 750 °С, 1000 °С и 1150 °С. Для повышения значимости результатов испытывали от 3 до 5 образцов для каждого набора параметров эксперимента. Для построения по полученным опытным данным функции сопротивления деформации $\sigma_s = \sigma_s(\epsilon, \dot{\epsilon})$ для каждой температуры испытания применили методику идентификации модели сопротивления деформации.

Примеры кривых $\sigma_s = \sigma_s(\epsilon)$ полученных для рассмотренных трех марок сталей при температуре испытаний 1150 °С и скорости деформации $\dot{\epsilon} = 0,05 \text{ с}^{-1}$ приведены на рис. 3.

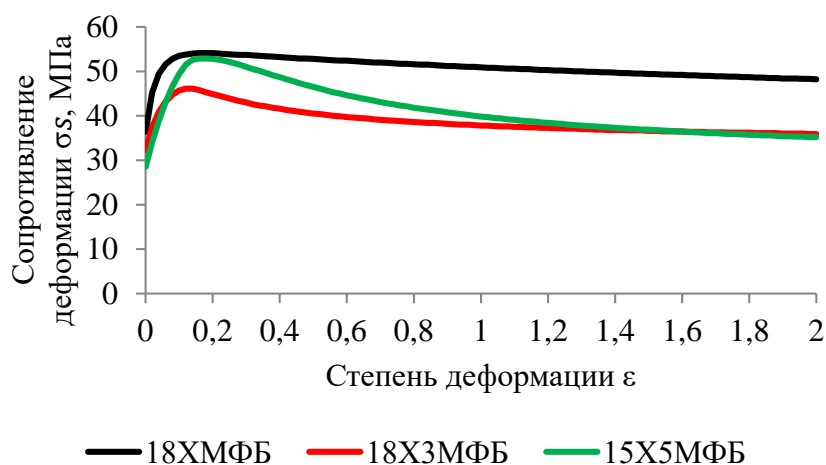


Рисунок 3 – Зависимость сопротивления деформации образцов от степени деформации ($T = 1150 \text{ °C}$; $\dot{\epsilon} = 0,05$)

С целью проверки адекватности созданной математической модели выполнены исследования по определению усилий при наружной высадке концов труб на прессе SMS Meer цеха №4 АО «Первоуральский новотрубный завод». В качестве заготовки служили трубы сортамента 73,02x5,51 мм из стали 15Х5МФБ. Производились замеры давления рабочей жидкости в главном цилиндре высадочного пресса SMS Meer. Путем перемножения давления на площадь рабочей поверхности поршня главного цилиндра получали значения усилий. Согласно полученным статистическим данным (среднеарифметическое значение усилия высадки 1770 кН) расчетное значение усилия высадки, равное 1750 кН, находится в доверительном интервале экспериментальных величин. Отклонение расчетной величины от экспериментальной составляет 1,1%.

Итогом выполненных в работе исследований явились рекомендации, связанные с разработкой технологии и инструмента для наружной высадки концов труб на прессе SMS Meer. При исследовании обнаружено значительное увеличение усилия высадки и нагрузок, действующих на инструмент, при наличии разнотолщинности и увеличении толщины стенки трубы. В связи с этим рекомендуется снижение данных величин на стадии прокатки исходной трубной заготовки и проведение необходимого контроля перед задачей труб на линию пресса.

Рассматриваемые в работе марки сталей обладают повышенными значениями сопротивления деформации, поэтому требуется производить нагрев концов труб перед высадкой до максимальных температур и максимально быстро доставлять трубы на ось прессования. Применение значений рациональных длин зоны нагрева концов труб позволит снизить нагрузки на инструмент и оборудование пресса и увеличить срок их службы.

Используемые на сегодня смазки поверхности прессового инструмента и система ее нанесения не обеспечивают снижение показателей трения до

минимально возможных значений, что приводит к повышенным значениям усилия высадки и, как следствие, ограничению по сортаменту высаживаемых труб и максимально возможным длинам высаженных участков. При наружной высадке концов труб на прессовом оборудовании рекомендуется пересмотреть систему подачи технологической смазки на штамповый инструмент, в частности наносить смазку предварительно нагретой поверхности инструмента до 100...150 °С. При высадке концов труб из сталей 15Х5МФБ, 18Х3МФБ и 18ХМФБ обратить внимание на смазки, содержащие дисульфид молибдена.

Отдельно в работе рассмотрена технология получения удлиненных высаженных концов насосно-компрессорных труб. Результаты моделирования, выполненного в рамках представленной работы, позволяют рекомендовать проведение однооперационной высадки удлиненных концов труб на прессе SMS Meer с соблюдением режимов нагрева и длин участков нагрева, соответствующих сортаменту с использованием предлагаемого в данной работе прессового инструмента.

Для комплекта инструмента, применяющегося на высадочном прессе SMS Meer, предложены рекомендации по выбору калибровок составной матрицы и пуансона. Для условий эксплуатации инструмента в процессе высадки высказан ряд предложений, которые позволяют снизить влияние факторов, приводящих к преждевременному тепловому износу рабочих поверхностей инструмента. В частности, для поддержания нормального теплового режима эксплуатации пуансонов и матриц при наружной высадке концов труб рекомендуется предварительный нагрев инструмента до температуры 150-200 °С с последующим охлаждением поверхности штампов после каждой прессовки (с помощью охлажденного сжатого воздуха). Комплект данных мероприятий позволит осуществлять наружную высадку концов труб без снижения производительности процесса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненной работы заключаются в результатах исследования, направленного на совершенствование технологии и выбора рациональных параметров рабочего инструмента для наружной высадки концов насосно-компрессорных труб, а также на формулировании рекомендаций по ведению процесса, разработке и эксплуатации инструмента, обеспечивающего для данного процесса наибольшую эффективность.

По итогам выполненной диссертационной работы можно сформулировать следующие **выводы и рекомендации**:

1. Технология производства насосно-компрессорных труб с высаженными концами в закрытом калибре с предварительным нагревом на специализированных горизонтальных гидравлических прессах является наиболее целесообразным способом получения труб с высаженными концами, позволяет при высокой производительности обрабатывать трубы широкого сортамента с высоким качеством поверхности, не требующим дополнительную обработку. Использование гидравлических прессов обеспечивает широкие

возможности по регулированию скорости пуансона и контролю действующих на оборудование нагрузок, имеющие высокий уровень автоматизации.

2. С использованием МКЭ разработана модель процесса наружной высадки концов труб, учитывающая нагрев и охлаждение конца трубы до установки на ось прессования; высадку концов труб с удлиненной высаженной частью; с использованием кривых упрочнения для коррозионностойких марок сталей (15Х5МФБ, 18Х3МФБ и 18ХМФБ); позволяющая рассчитывать нагруженность инструмента, с целью прогнозирования его износа при высадке концов труб, подбора смазок и способов их нанесения.

3. В результате численной реализации созданной модели процесса наружной высадки концов труб определены рациональные параметры технологического процесса, а также технологические возможности прессового оборудования с точки зрения сортамента высаживаемых труб из коррозионностойких марок сталей 15Х5МФБ, 18Х3МФБ и 18ХМФБ, обладающих высокими значениями сопротивления металла деформации. Полученные в результате параметрического анализа данные позволяют сформулировать конкретные рекомендации по построению технологического процесса наружной высадки концов труб из коррозионностойких марок сталей, вести работы по созданию инструмента и оборудования для данного процесса.

4. Проведенные исследования реологических свойств коррозионностойких марок сталей 18ХМФБ, 18Х3МФБ и 15Х5МФБ в зависимости от термодинамических условий деформирования позволяют получить исходные данные для проведения теоретического исследований с использованием данных материалов в различных процессах ОМД. Экспериментальные исследования по определению усилий процесса наружной высадки концов труб позволяют сделать вывод об адекватности созданной математической модели реальному прототипу.

5. Анализ технологических и технических решений, а также проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволяют определить рациональные параметры технологического процесса наружной высадки концов труб. Исследования процесса удлиненной наружной высадки концов труб позволяют определить геометрию прессового инструмента для данного процесса, а также условия его эксплуатации.

6. Комплекс проведенных работ по созданию технологии, оборудования и прессового инструмента для наружной высадки концов труб из коррозионностойких марок сталей стали основой при выдаче рекомендаций, переданных для внедрения на АО «ПНТЗ».

Алгоритм решения задачи по определению параметров процесса наружной высадки концов насосно-компрессорных труб в программном комплексе DEFORM внедрен в учебный процесс подготовки бакалавров и магистров, обучающихся в УрФУ по направлению 15.03.02, 15.04.02 – Технологические машины и оборудование.

Перспективы дальнейшей разработки темы заключаются в следующем:

- разработка рациональной калибровки высадочного инструмента для получения наибольшей длины высаженной части трубы, соответствующей технологическим возможностям высадочного оборудования;
- использование кривых сопротивления деформации, полученных для коррозионностойких сталей 18ХМФБ, 18ХЗМФБ и 15Х5МФБ, для оценки технологической возможности производства изделий из данных сталей прочими способами обработки металлов давлением;
- применение разработанного алгоритма задания математической модели наружной высадки концов насосно-компрессорных труб для расчета высадки других типоразмеров труб нефтяного сортамента, производимых на аналогичном оборудовании;
- возможность оценки усилий при наружной высадке концов насосно-компрессорных труб для других применяемых для производства сталей.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

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

1. Дронов, А.И. Исследование сопротивления деформации сталей 18ХМФБ и 18ХЗМФБ при горячей деформации / А.В. Коновалов, А.С. Смирнов, В.С. Паршин, **А.И. Дронов**, А.П. Карамышев, И.И. Некрасов, А.А. Федулов, А.В. Серебряков // Металлург. – 2015. – №11. – С. 110-112. (0,15 п.л. / 0,12 п.л.)
2. Дронов, А.И. Исследование влияния условий трения на энергосиловые параметры процесса наружной высадки концов труб / И.И. Некрасов, А.П. Карамышев, В.С. Паршин, А.А. Федулов, **А.И. Дронов**, В.А. Хорев // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2016. – Т.14, №4. – С. 57-60. (0,2 п.л. / 0,16 п.л.)
3. Дронов, А.И. Конечно-элементное моделирование процесса высадки концов насосно-компрессорных труб с удлиненной высаженной частью / А.П. Карамышев, И.И. Некрасов, В.С. Паршин, А.А. Федулов, **А.И. Дронов** // Заготовительные производства в машиностроении (кузнечно-прессовое, литейное и другие производства). – 2016. – №9. – С. 22-24. (0,15 п.л. / 0,12 п.л.)
4. Дронов, А.И. Определение параметров процесса наружной высадки концов труб / И.И. Некрасов, А.П. Карамышев, В.С. Паршин, А.А. Федулов, **А.И. Дронов**, В.А. Хорев // Научно-технический вестник Поволжья. – 2017. – №2. – С. 25-27. (0,15 п.л. / 0,12 п.л.)
5. Дронов, А.И. Влияние температуры и длины зоны нагрева на процесс наружной высадки концов насосно-компрессорных труб / И.И. Некрасов, А.П. Карамышев, В.С. Паршин, **А.И. Дронов**, В.А. Хорев, А.А. Федулов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2017. – №1(2). – С. 265-269. (0,2 п.л. / 0,16 п.л.)

Статьи и тезисы, опубликованные в сборниках материалов конференций:

6. Дронов, А.И. Проблемы и достижения в производстве насосно-компрессорных труб с высаженными концами на ОАО «ПНТЗ» / **А.И. Дронов** [и др.] // Новые технологии и достижения в металлургии и материаловедении: Материалы XIV Международной научной конференции. – Польша, Ченстохова, 2013. – С. 123-131. (0,46 п.л. / 0,34 п.л.)

7. Dronov, A.I. Mathematical modelling of nonsteady metal-forming processes to develop efficient production technologies / A.P. Karamyshev, V.S. Parshin, A.A. Fedulov, I.I. Nekrasov, A.I. Pugin, **A.I. Dronov** // Proceedings of the Workshop on Computer Science and Information Technologies (CSIT'2014). V. 2 – Ufa State Aviation Technical University. – 2014. – P. 206-209. (0,2 п.л. / 0,12 п.л.)

8. Дронов, А.И. Определение оптимальной скорости движения пуансона в процессе наружной высадки насосно-компрессорных труб / А.П. Карамышев, И.И. Некрасов, В.С. Паршин, А.И. Пугин, А.А. Федулов, **А.И. Дронов**, В.А. Хорев // Современные металлические материалы и технологии (СММТ'2015): Труды международной научно-технической конференции. В 3-х томах. Т. 3. – Санкт-Петербург: Издание Политехнического университета, 2015. – С. 75-82. (0,42 п.л. / 0,32 п.л.)

9. Дронов, А.И. Определение величины сопротивления деформации металла при наружной высадке концов насосно-компрессорных труб / И.И. Некрасов, А.П. Карамышев, А.А. Федулов, В.С. Паршин, **А.И. Дронов**, В.А. Хорев, В.А. Моргунов // Труды XXII Международной научно-практической конференции «Инновации и импортозамещение в трубной промышленности (трубы-2016)»: сборник трудов. В 2 ч. Часть II. – Челябинск: ОАО «Роснिति», 2016. – С. 120-122. (0,15 п.л. / 0,12 п.л.)

10. Dronov, A.I. Study of the resistance of steels 18KHMFb and 18KH3MFb to hot deformation / A.V. Konovalov, A.S. Smirnov, V.S. Parshin, **A.I. Dronov**, A.P. Karamyshev, I.I. Nekrasov, A.A. Fedulov, A.V. Serebryakov // Metallurgist. V. 59 – 2016 – №11-12. – P. 1118-1121. (0,2 п.л. / 0,12 п.л.)

11. Dronov, A. The Features of Metal-Forming Processes Modeling / I. Nekrasov, A. Fedulov, A. Karamyshev, V. Parshin, **A. Dronov**, V. Khorev // ICRISSET2017. International Conference on Research and Innovations in Science, Engineering&Technology. Selected Papers in Engineering. V. 1 – Kalpa Publications in Engineering. – 2017. – P. 499-506. (0,4 п.л. / 0,24 п.л.)