Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи

Дронов Алексей Иванович

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

Специальность 05.02.09 – Технологии и машины обработки давлением

Диссертация на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
Паршин Сергей Владимирович, доктор технических наук

Екатеринбург – 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ …… 5

1. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ И УСТРОЙСТВ ДЛЯ НАРУЖНОЙ ВЫСАДКИ КОНЦОВ НАСОСНО-КОМПРЕССОРНЫХ ТРУБ И ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССА

1.1 Технология производства насосно-компрессорных труб с высаженными концами ……... 11

1.2 Оборудование для производства труб нефтяного сортамента с высаженными концами ……..... 23

1.3 Обзор теоретических исследований процесса наружной высадки концов труб …….. 43

1.4 Постановка задач исследования …… 48

ВЫВОДЫ

2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА НАРУЖНОЙ ВЫСАДКИ КОНЦОВ НАСОСНО-КОМПРЕССОРНЫХ ТРУБ

2.1 Выбор метода теоретического исследования ……..... 51

2.2 Обоснование расчетной схемы процесса наружной высадки концов насосно-компрессорных труб …… 54

2.3 Теоретические основы решения тепловой и деформационной задачи наружной высадки концов труб ……. 60

ВЫВОДЫ

3. ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА НАРУЖНОЙ ВЫСАДКИ КОНЦОВ ТРУБ

3.1 Реализация алгоритма решения задачи наружной высадки концов НКТ в программном комплексе DEFORM ……..... 67

3.2 Исходные данные для анализа ……..... 79

3.3 Параметрический анализ процесса стандартной наружной высадки

концов труб

3.3.1 Анализ влияния температуры ……..... 83

3.3.2 Анализ влияния геометрии труб на энергосиловые параметры процесса …….. 86

3.3.3 Анализ влияния условий трения …….. 97

3.3.4 Анализ влияния скорости движения пуансона ……. 100

3.3.5 Анализ влияния параметров технологии на нагруженность инструмента при стандартной наружной высадке ……... 101

3.4 Параметрический анализ процесса удлиненной наружной высадки концов труб

3.4.1 Анализ влияния температуры ……... 106

3.4.2 Анализ влияния геометрии труб …… 108

3.4.3 Анализ влияния условий трения …… 113

3.4.4 Анализ влияния скорости движения пуансона ……. 116

3.4.5 Сравнение усилий прямого хода при стандартной и удлиненной высадках ……... 115

3.4.6 Анализ влияния геометрии инструмента и параметров технологии на нагруженность инструмента ……. 125

ВЫВОДЫ

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАРУЖНОЙ ВЫСАДКИ КОНЦОВ ТРУБ И ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ В ПРОИЗВОДСТВО

4.1 Экспериментальное исследование процесса наружной высадки концов труб

4.1.1 Задачи экспериментального исследования ……... 136

4.1.2 Исследование реологических свойств коррозионностойких марок стали 18ХМФБ, 18Х3МФБ и 15Х5МФБ в зависимости от термодинамических условий деформирования …… 138

4.1.3 Экспериментальное определение усилий при наружной высадке

концов труб на прессе SMS Meer …….. 147

4.2 Разработка технологии и инструмента для наружной высадки концов труб на прессе SMS Meer

4.2.1 Разработка технологии для наружной высадки концов труб ….. 149

4.2.2 Разработка инструмента для наружной высадки концов труб ... 154

ВЫВОДЫ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ……. 159

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Акт об использовании результатов исследования

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Задачи повышения эффективности нефте- и газодобычи являются для России весьма актуальными, поскольку данная отрасль промышленности обеспечивает наибольший вклад в формирование валового внутреннего продукта страны. Основная добыча в России и в мире происходит из нефтяных скважин, представляющих собой узкий глубокий колодец, пробуренный до нефтяного пласта. При любом способе эксплуатации скважин жидкость и газ поднимаются по специальным трубам, спускаемым в скважины перед началом их эксплуатации. Эти трубы называются насосно-компрессорными (НКТ). Насосно-компрессорные трубы применяются также для подачи в скважину жидкости или газа (газлифтная эксплуатация, промывка скважин, гидроразрыв пласта, кислотная и термокислотная обработки забоя, прогрев забоя скважин горячим паром), подвески в скважине погружного скважинного оборудования, проведения исследовательских работ на скважине (спуск и подъем глубинных приборов, специального оборудования как внутри, так и снаружи колонны труб НКТ).

На обоих концах каждой НКТ нарезается резьба для свинчивания трубы со свободным концом другой трубы посредством муфты. Насосно-компрессорные трубы работают в исключительно тяжелых условиях повышенных нагрузок, температур и агрессивных сред. Высокое содержание углекислого газа и сероводорода в скважине приводит в коррозии труб. Для повышения эксплуатационной надежности изделия и поддержания высокого ресурса его работы без создания различных антикоррозионных покрытий в качестве материала изделий выбираются легированные стали с содержанием хрома в пределах 1-5%, которые позволяют в несколько раз увеличить наработку и получить значительный экономический эффект.

Широкое внедрение труб НКТ со стандартной и удлиненной высаженной частью и из коррозионностойких марок сталей сталкивается с проблема-

ми создания достаточно производительных технологических процессов, инструмента и оборудования для производства таких труб, необходимостью проведения теоретических и экспериментальных исследований в направлении 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., Выдрина 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 задания величины сопротивления металла при пластической деформации для сталей 32Г2 и 25ХГМА и коэффициенте трения μ в интервале температур от 1050 ºС до 1175 ºС 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 длин, температуры, неравномерности нагрева концов труб, условий трения, взаимного расположения инструмента и заготовки на процесс формоизменения металла труб в процессе их наружной высадки.

Целью настоящей 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.

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.

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.

Научной новизной работы является:

- создание математической модели процесса наружной высадки концов труб, базирующейся на методе конечных элементов, включающей нагрев заготовки под высадку, ее охлаждение при транспортировке на ось пресса, де-

формацию конца трубы, позволяющей определять энергосиловые параметры процесса и нагруженность инструмента с учетом граничных условий и реологических свойств металла трубы при горячей обработке;

- определение зависимостей энергосиловых параметров процесса наружной высадки концов труб из коррозионностойких марок сталей от технологических режимов обработки, геометрии трубной заготовки и инструмента;

- получение эмпирических зависимостей сопротивления деформации коррозионностойких сталей 15Х5МФБ, 18Х3МФБ 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 по определению энергосиловых параметров при наружной высадке насосно-компрессорных труб, реализованный с помощью создания математической модели процесса с применением метода конечных элементов. Указанный алгоритм внедрен в учебный процесс подготовки бакалавров и магистров ФГАОУ ВО УрФУ, обучающихся по направлению 15.03.02 и 15.04.02 «Технологические машины и оборудование».

2. Разработан алгоритм численной реализации и проведен параметрический анализ созданной математической модели, которые позволили получить зависимости энергосиловых параметров процесса наружной высадки концов труб от режимов обработки, 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, принятых АО «ПНТЗ» (г. Первоуральск, Свердловская обл.), по

созданию технологии и инструмента для наружной высадки концов насосно-компрессорных труб из коррозионностойких сталей.

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.

Методология и методы диссертационного 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 Института машиноведения УрО РАН, оборудованной датчиками измерения усилия и перемещения. Экспериментальные исследования по определению усилий высадки проводили на гидравлическом прессе для наружной высадки концов труб SMS Meer цеха №4 АО «Первоуральский новотрубный завод», имеющем электронный манометр для измерения давления в главном цилиндре.

На защиту выносятся следующие положения:

- 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 металла трубы при высадке;

- 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 зависимо-

сти величины сопротивления пластической деформации для коррозионно-стойких марок сталей 15Х5МФБ, 18Х3МФБ и 18ХМФБ;

- рекомендации по ведению процесса наружной высадке 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.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ И УСТРОЙСТВ ДЛЯ НАРУЖНОЙ ВЫСАДКИ КОНЦОВ НАСОСНО-КОМПРЕССОРНЫХ ТРУБ И ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССА

1.1 Технология производства насосно-компрессорных труб с высаженными концами

При бурении и эксплуатации нефтяных и газовых скважин используются бурильные, обсадные и насосно-компрессорные трубы, соединяемые в колонны при помощи резьбовых соединений. Стальные трубы нефтяного сортамента распределяются по группам прочности, которые влияют на подбор химического состава материала трубы, а также способы термической обработки в процессе изготовления.

Стальные бурильные трубы бывают ведущими, передающими крутящий момент от привода к бурильной колонне, универсальные с высаженными концами и приваренными замками, а также утяжеленные (толстостенные) [1, 2].

Ведущие бурильные трубы имеют квадратное или шестигранное сечение основного тела с высаженными сборными концами с размерами квадрата от 63,5 до 133,3 мм и центральным отверстием Ø31,8-82,6 мм (тип К) или размером шестигранника 72,6-152,4 мм и центральным отверстием Ø31,8-88,9 мм (тип Ш) (рис. 1.1).

Трубы бурильные с навинченными носками изготавливают путем высадки их концов с приваркой соединительных замков. Концы труб могут предварительно высаживаться путем внутренней, наружной или комбинированной высадки

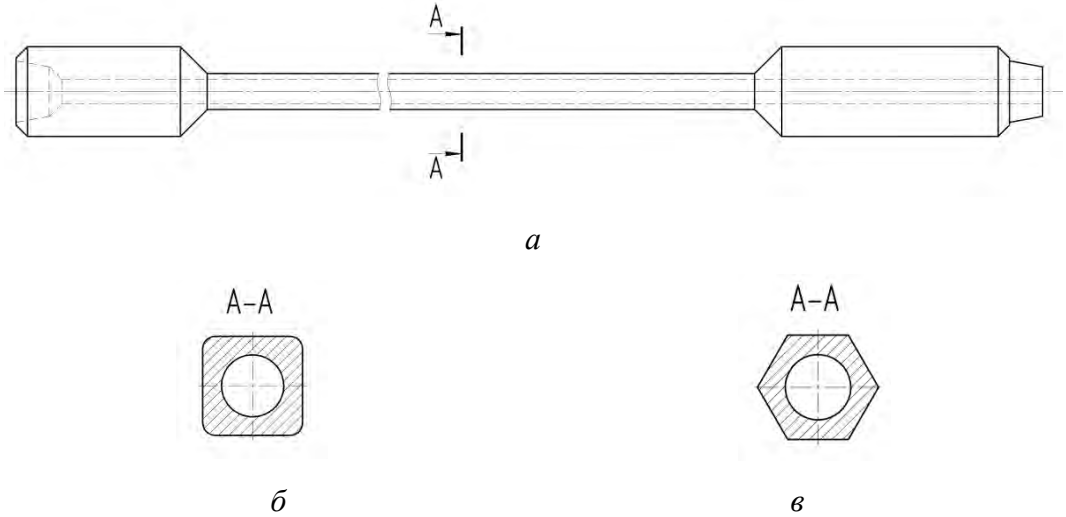


Рисунок 1.1 – Схема компоновки ведущих бурильных труб
(*а* – компоновка тела трубы; *б* – сечение тип К; *в* – сечение тип Ш)

В зависимости от типа высаженного конца поперечные сечения труб имеют следующие размеры: для внутренней высадки – от 73,02х9,19 мм до 114,30х6,88 мм; для наружной – от 60,32х7,11 мм до 114,30х10,92 мм; для комбинированной – от 114,30х8,56 мм до 168,28х9,19 мм [2, 3]. Для повышения прочности и герметичности соединений также в трубе выполняют стабилизирующие пояски, позволяющие перенести действие максимальных изгибающих нагрузок на более прочный высаженный участок (рис. 1.2) [4].

Рисунок 1.2 – Схема компоновки бурильных труб со стабилизирующими поясками

Утяжеленные (толстостенные трубы) применяются для передачи осевой нагрузки на буровой инструмент и создания дополнительной растягивающей нагрузки на колонну для уменьшения ее изгиба (рис. 1.3). Существуют два вида толстостенных бурильных труб: с внутренней резьбой на обоих концах (рис. 1.3, *а*) и с внутренней резьбой на одном конце и наружной на другом (рис. 1.3, *б*). Размеры труб варьируются от 88,90х15,88 мм до 168,27х33,34

мм.

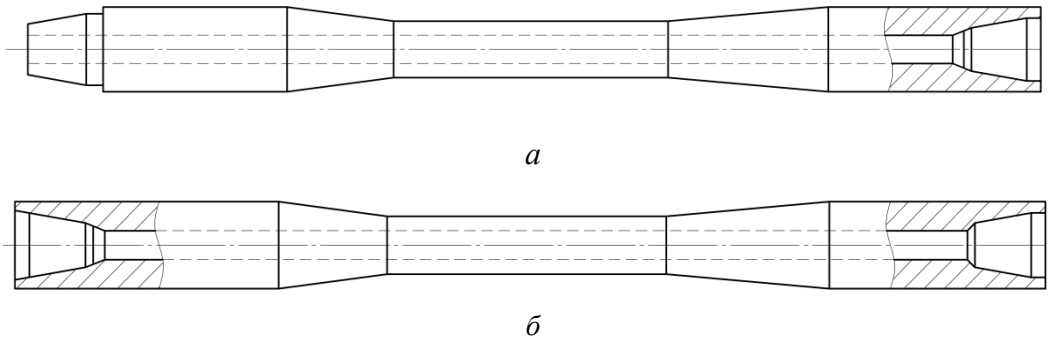


Рисунок 1.3 – Схема компоновки утяжеленных бурильных труб
(*а* – промежуточные; *б* – наддолотные)

Обсадные трубы применяются для крепления стенок буровых нефтяных и газовых скважин при разведке и эксплуатации, отсоса и отвода воды, подачи промывочных жидкостей к отстойникам [5]. В зависимости от назначения и условий работы изготавливаются стальные бесшовные и электросварные трубы с треугольной и трапецеидальной резьбой и различным исполнением высокогерметичных уплотнений при соединении обсадных труб в колонны. Преимущественно обсадные трубы соединяются муфтами, хотя существуют безмуфтовые раструбные трубы с высаженными концами [6, 7]. Создание уплотнительных поверхностей, а также применение безмуфтового способа соединений позволяет повысить прочность соединения обсадных труб, а также равномерность восприятия нагрузки резьбовым участком [4]. Размеры обсадных труб варьируются в пределах 101,6х6,5 мм 508,00х16,13 мм [5].

Насосно-компрессорные трубы (НКТ) размещаются в скважине и служат для транспортировки жидкости и газа из скважины на поверхность при нефте- и газодобыче, а также нагнетания воздуха при продувке или в процессе ремонта и обслуживания скважин [5]. Глубина колонны трубы НКТ определяется прочностью резьбового соединения труб между собой, а также материалом, из которого они изготовлены.

Область применения данного типа труб налагает на них особые требова-

ния по прочности, износо- и коррозионностойкости при значительной проходимости внутреннего сечения трубы и герметичности соединений [4]. Готовые НКТ не должны иметь расслоений, трещин и других механических повреждений, которые могут привести к разгерметизации колонны и ее обрыву. Коррозионный износ труб НКТ вызывается взаимодействием материалов труб с углекислым газом и сероводородом, который также приводит к снижению прочности трубы за счет сероводородного охрупчивания [8]. Таким образом, в ряде случаев приходится использовать специальные коррозионностойкие сплавы вместо НКТ из обычной стали марок 30Г2 (37Г2С), подбор которых зависит от парциального давления сероводорода и углекислого газа в скважине, температуры и давления в системе (в зависимости от места расположения трубы в колонне), а также минеральном составе подтоварной воды и содержания в ней механических примесей. На АО «ПНТЗ» предложено использование легированных хромом марок сталей серий 18ХМФБ (Cr 1 %), 18Х3МФБ (Cr 3 %) и 15Х5МФБ (Cr 5 %), которые отвечают группам прочности металла НКТ – от К55 до С90 [7] или от К до Л [9]. Для данных марок сталей имеется положительный опыт испытаний на Кустовом месторождении ТПП «Когалымнефтегаз», ОАО «Томскнефть» ВНК, Возейского и Усинского месторождений ООО «ЛУКОЙЛ-Коми». Стали с низким содержанием хрома (до 1%) показали наработку на скважине до 2 раз больше, чем при эксплуатации труб из стали марки 30Г2. Стали с содержанием хрома в ряде случаев при обследовании не показали признаков коррозии. Общая наработка труб из данных марок сталей превысила в 4-6 раз аналогичный показатель для труб по [9], что привело к снижению удельных затрат на срок эксплуатации колонны [8]. Использование коррозионностойких сталей 18ХМФБ, 18Х3МФБ и 15Х5МФБ позволяет избежать прочих способов защиты НКТ от агрессивных сред, таких как применение химических реагентов, полимерных покрытий, легированных марок сталей с содержанием хрома от 13% [8].

В настоящее время предприятия трубной промышленности выпускают

НКТ, удовлетворяющие требованиям отечественных [9] и зарубежных стандартов [7]. Трубы изготавливают от размера 26,67х2,87 мм до 114,30х16,00, с учетом, что трубы диаметром меньше 48 мм применяют для эксплуатации нескольких нефтесодержащих пластов через одну скважину, при которой внутри колонн из обсадных труб опускается несколько колонн насосно-компрессорных. Длина труб достигает от 6 до 10,5 метров с наиболее часто используемыми наружными диаметрами 60, 73 и 89 мм при незначительных отклонениях между приведенными стандартами по наружному диаметру, толщине стенки и группам прочности стали.

Среди прочих широко применяется изготовление насосно-компрессорных труб с утолщенными концами (тип НКТВ), которые предназначены для нарезания специальной конической или цилиндрической (в том числе и многоступенчатой) резьбы под соединение со смежными трубами в колонну [4]. Безмуфтовое в этом случае соединение с внутренними уплотнительными поверхностями или уплотнительными прокладками является более эффективным, чем распространенное муфтовое, так как защищает соединительную резьбу от агрессивных сред. Некоторые виды соединения труб НКТВ показаны на рис. 1.4.

В зависимости от вида трубы их производят по различным технологическим схемам [4]: прошитые заготовки прокатывают на непрерывном стане, автоматическом стане или стане пилигримовой прокатки, а затем калибруют в связи с высокими требованиями к точности размеров труб нефтяного сортамента. После калибровки концы труб нагревают в индукционных или щелевых газовых печах и высаживают на горизонтальных ковочных машинах или гидравлических высадочных прессах. В дальнейшем трубы нормализуют в проходных печах с наклонным, роликовым или шагающим подом, что позволяет выровнять механические свойства по телу трубы.

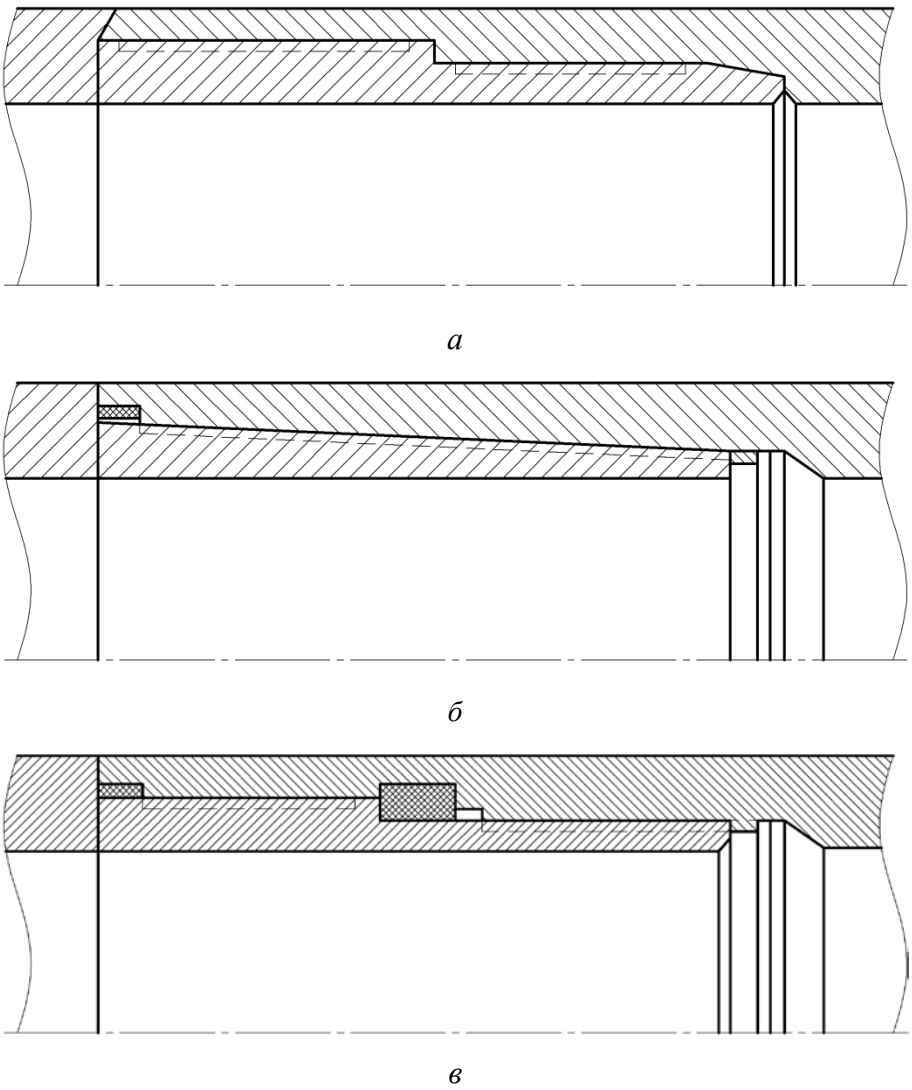


Рисунок 1.4 – Безмуфтовые соединения насосно-компрессорных труб
(*а* – типа Хайдрил-CS; *б* – конусное одноступенчатое;
в – цилиндрическое двухступенчатое)

После нормализации трубы правят в косовалковых клетях или на штемпельных прессах, а затем направляют на трубопроточные станы для черновой обточки поверхности высаженных концов снаружи и на трубонарезные станки для нарезки резьбы.

В случае производства труб с муфтовым соединением с исключением операций высадки, после прокатки у труб производится обрезка концов, снятие фасок, нарезка резьбы, соединение с муфтами. Термообработку труб производят при получении неудовлетворительных механических свойств и

для высоких требований по прочности материала. При включении в технологическую цепь операций нормализации и отпуска труб перед нарезанием резьбы их необходимо править и калибровать. На заключительных этапах производства проводятся операции по контролю резьбы, гидроиспытанию труб, нанесению покрытий, маркировке и упаковке.

Операция получения высаженного конца НКТВ является важным этапом производства в виду повышенных требований к соединению труб между собой. Готовое соединение должно позволять производить многократную сборку и разборку колонн для промывки и прочистки внутренней полости в виду появления отложений на внутренней поверхности труб, а также надзора и обслуживания резьбы. Проведение данных мероприятий значительно повышает срок службы готовой продукции.

Высадка труб - это технологическая операция искусственного утолщения концевых участков труб (характеризуется увеличением наружного диаметра или уменьшением внутреннего диаметра) с целью придания повышенной прочности составным соединениям труб (типа «муфта – ниппель») нефтяного сортамента при эксплуатации в скважинах, сочетающих изгибающие, крутящие, растягивающие нагрузки. В данном случае изделия относятся к полым поковкам IV группы, штампуемых из труб [10]. Сущность процесса заключается в локальной деформации металла трубы в нескольких зонах, перемещающихся по объему изделия с течением времени [11, 12].

В зависимости от окончательной конфигурации высаженного конца процесс высадки труб подразделяют [10] на: наружную высадку, при которой за счет уменьшения длины высаживаемой части происходит увеличение наружного диаметра и толщины стенки трубы (рис. 1.5, а); внутреннюю высадку, при которой происходит уменьшение внутреннего диаметра и увеличение толщины стенки трубы (рис. 1.5, б); комбинированную – с одновременным увеличением наружного и уменьшением внутреннего диаметров (рис. 1.5, в). Высаженная часть должна иметь плавный переход к основному

телу трубы с постепенным выравниванием диаметра и толщины стенки. Схемы данных процессов приведены на рис.

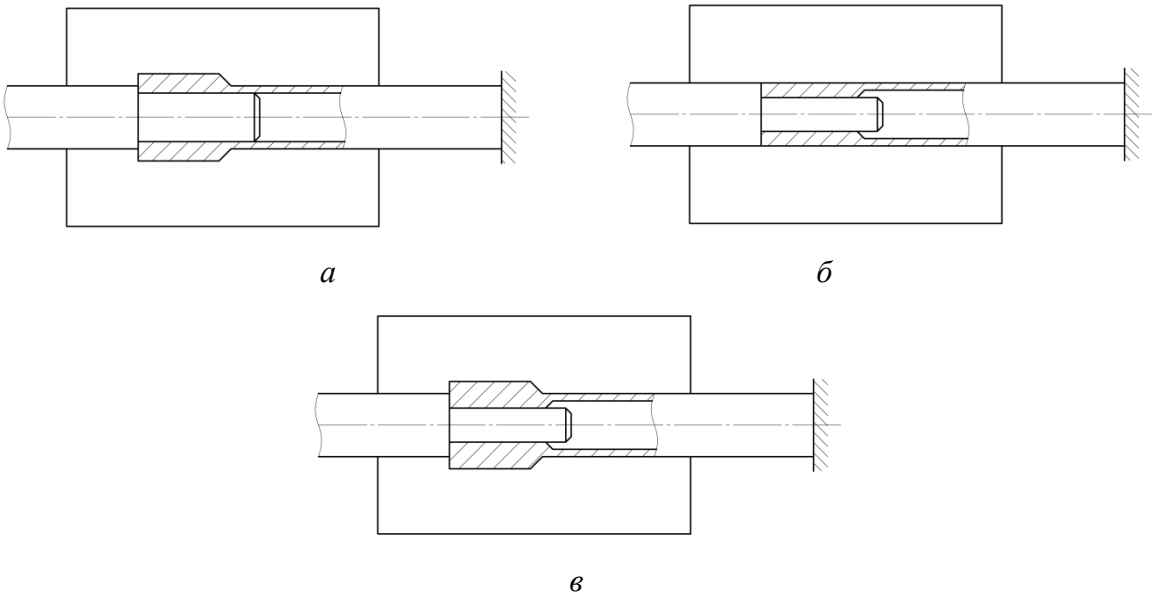


Рисунок 1.5 – Схема получения из трубных заготовок поковок IV группы
(*а* – высадка с увеличением наружного диаметра трубы;
б – высадка с уменьшение внутреннего диаметра трубы;
в – высадка с увеличение наружного и уменьшением
внутреннего диаметров трубы)

Высадку концов труб производят в основном на специализированных горизонтально-ковочных машинах с механическим приводом или горизонтальных гидравлических прессах [13]. Технологический цикл высадки в общем случае представляет последовательность механизированных операций посадки заготовки в нагревательную печь или индуктор с нагревом конца трубы на расчетную длину, вынос заготовки из нагревательной печи (или индуктора) и подача ее к прессу, зажим заготовки и высадка ее конца, удаление поковки от пресса [10]. Стадии производства трубы с высаженной частью показаны на рис. 1.6 [14].

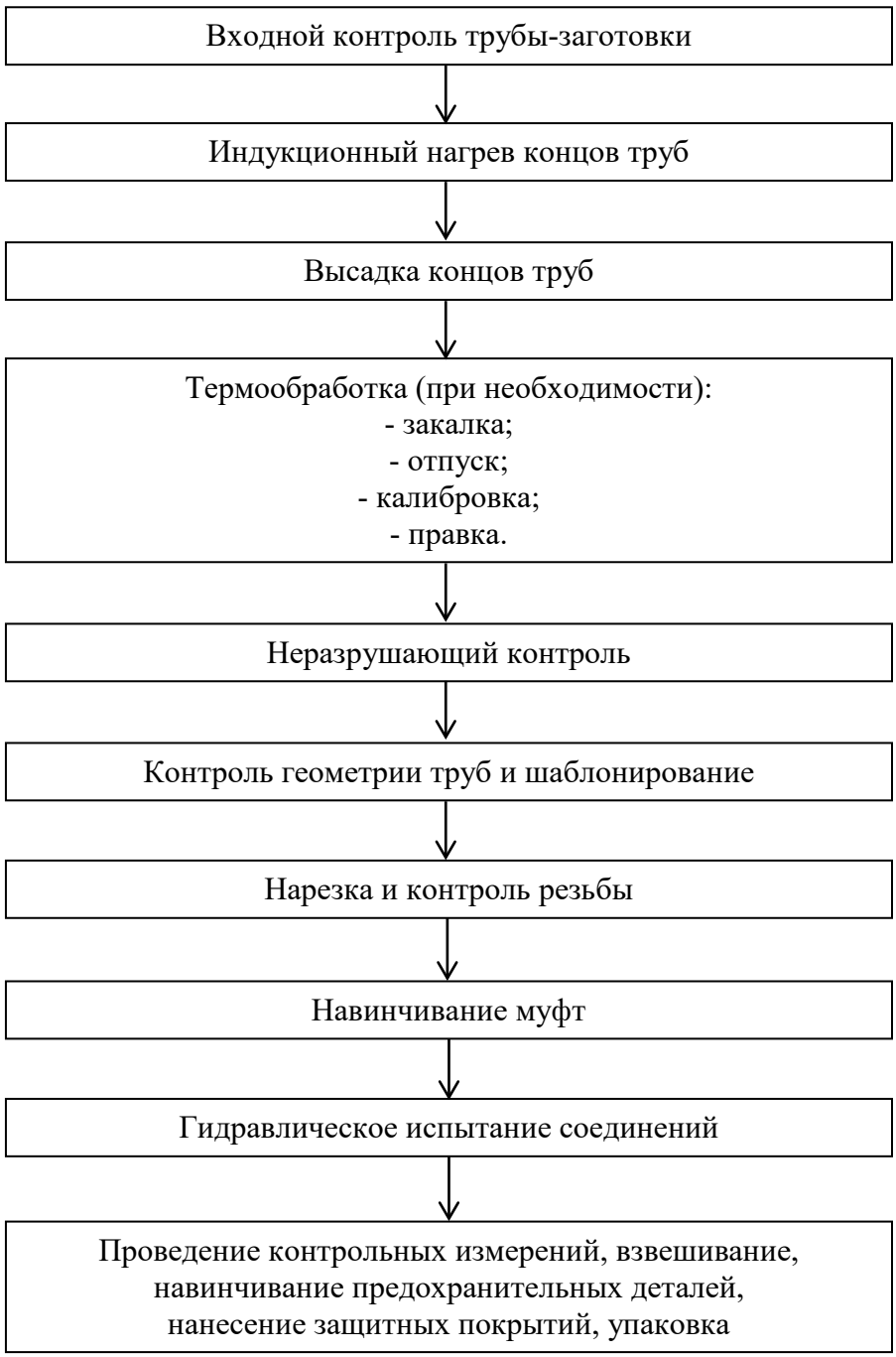


Рисунок 1.6 – Схема последовательности выполнения операций при изготовлении НКТ с высаженной частью

Операция высадки основывается при этом на получении утолщенной стенки во внутренней полости матрицы под действием поступательного движения пуансона (рис. 1.7).

Матрица в общем случае выполняется составной из двух частей. Форма

высаженного конца образуется при смыкании двух половин матрицы с фиксацией заготовки внутри нее и подачи в калибр пуансона. Наружная геометрия высаженного конца формируется контуром полости разъемной матрицы, а контроль толщины стенки трубы и внутреннего диаметра осуществляется контуром пуансона.

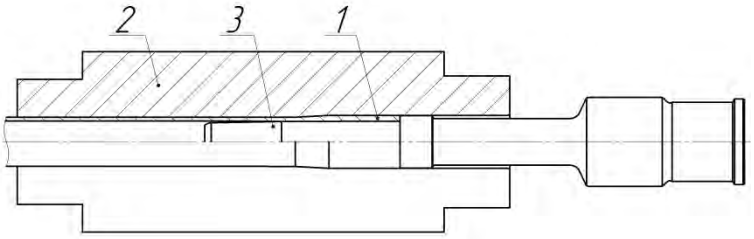
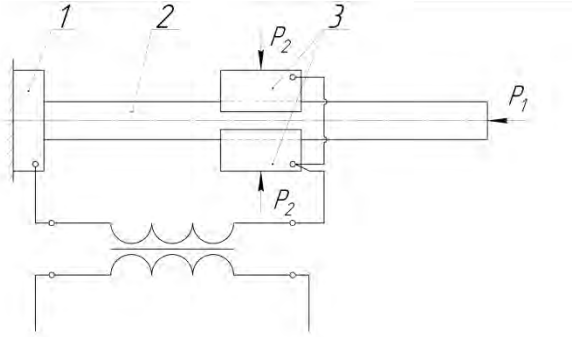


Рис. 1.7 – Схема процесса высадки насосно-компрессорных труб
(*1* – заготовка; *2* – матрица; *3* – пуансон)

Существуют также способы набора металла с концов или в середине заготовки полых и сплошных заготовок путем нагрева после установки в пресс, когда применяется индуктор или используется электронагрев контактным способом на электровысадочных машинах различных конструкций [15]. При этом может осуществляться свободная высадка, высадка в матрице и высадка в матрице трубной заготовки (рис. 1.8). Как видно из рисунка 1.8, нагрев в электровысадочных машинах, оборудованных индуктором осуществляется на малом участке трубы. При этом скорость перемещения трубы соответствует времени прогрева осаживаемой зоны до заданной температуры, а течение металла отличается от описанного при высадке в матрицах, при котором утолщение происходит перманентно на всей требуемой длине заготовки.



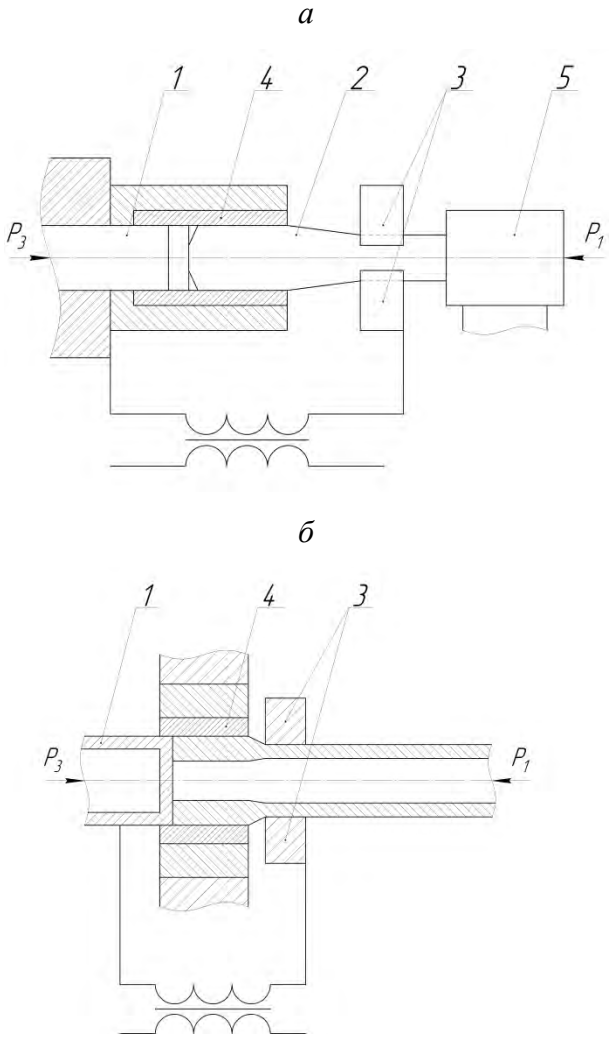


Рис. 1.8 – Схема процесса электровысадки

(*а* – свободная высадка; *б* – высадка в матрице;

в – высадка в матрице трубной заготовки;

1 – упорный контакт; *2* – заготовка;

3 – радиальные контакты; *4* – матрица; *5* – пуансон;

P_1 – усилие высадки; P_2 – усилие зажима; P_3 – усилие подпора)

В описываемом случае имеет место последовательный набор толщины конца трубы. Регулирование толщины осаживаемой части производится путем изменения соотношения скорости нагрева к скорости подачи заготовки [16, 17].

Несмотря на хорошие показатели, связанные с возможностью получения высаженных частей диаметром до 400 мм [18, 19] и длиной, ограниченной

лишь технологическими возможностями оборудования [20], при высоких коэффициентах осадки, достигающих 3,5-4 за одну стадию осадки, предложенный способ не нашел широкого применения в виду низкого качества наружной поверхности высаженной части и низкой производительности.

Близким к предыдущему является способ высадки с электронагревом контактным образом [21], при котором заготовка закрепляется между губками подвижного электрода. Торцом труба упирается в плиту электрода-основания. Электроды питаются токами промышленной частоты. После их подключения зажатая между ними часть трубы за счет сопротивления начинает нагреваться. Нагретый участок трубы осаживается под действием пуансона, прикрепленного к плунжеру гидроцилинра (рис. 1.8, *в*). Электрод-основание имеет возможность продольного перемещения, за счет чего длина предварительного нагрева может быть увеличена так, чтобы минимизировать ограничения, налагаемые конструктивными особенностями оборудования.

Преимуществами способа электровысадки с электронагревом контактным образом могут считаться возможность изготовления головок большого диаметра, отсутствие отдельной операции предварительного нагрева и необходимости в оборудовании для ее проведения, равномерный нагрев заданной длины заготовки без окалины и угара с высокой точностью температуры, малое требуемое усилие деформации, а также низкий расход энергии [21].

В этом качестве высадка с электронагревом контактным образом заготовки после установки в пресс используется как заготовительная операция при производстве полых и сплошных фасонных профилей перед окончательной обработкой давлением (например, штамповкой). При производстве высаженных концов труб таким способом можно обрабатывать трубы диаметром до 200 мм с коэффициентом высадки 2-20 за одну стадию [13].

Несмотря на преимущества процесса высадки с применением электровысадочных машин, высадка в закрытом калибре с предварительным нагревом на специализированных горизонтально-ковочных машинах с механиче-

ским приводом или горизонтальных гидравлических прессах имеет ряд преимуществ в сравнении с электровысадкой, так как позволяет при высокой производительности обрабатывать трубы широкого сортамента. К тому же получение высаженных концов труб на горизонтальных гидравлических прессах, отличает высокое качество поверхности, которое позволяет исключить дополнительную обработку.

1.2 Оборудование для производства труб нефтяного сортамента с высаженными концами

В зависимости от способа высадки, на основе которого базируется та или иная высадочная машина, она будет иметь особенности конструктивного исполнения, технические характеристики и сортамент продукции, подлежащей обработке на выбранном типе оборудования.

Способ электровысадки реализован на специализированных станках, основные электрические характеристики которых перечислены в работах [21]. Также в работах [22, 23] приведены рекомендации по выбору размеров индукторов нагревательной установки и их электрическим характеристикам.

На рис. 1.9, 1.10 показаны конструкции горизонтальной машины с гидравлическим приводом и вертикальной машины с пневмоприводом, применяемых для осадки головок стрежней способом электровысадки.

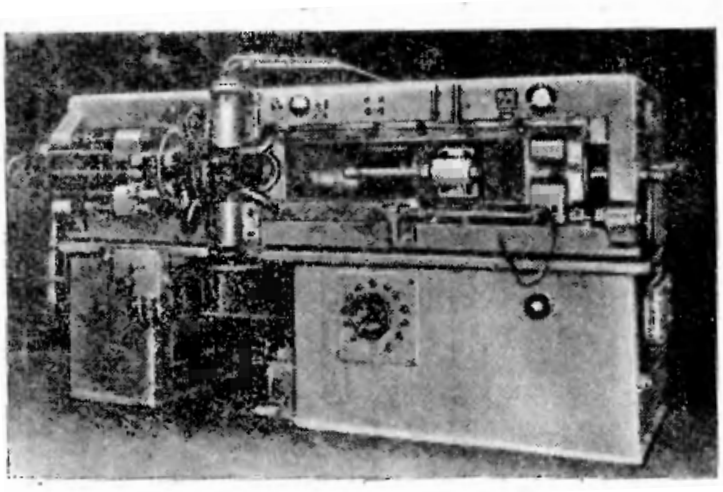


Рис. 1.9 – Горизонтальная ковочная машина для высадки с электронагревом (номинальной мощностью 50 кВА)

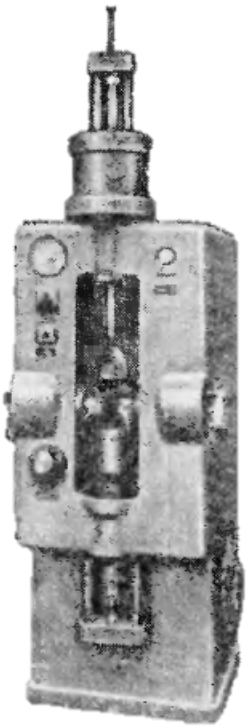


Рис. 1.10 – Вертикальная машина для высадки с электронагревом (номинальной мощностью 15 кВА)

Компанией IMTT выпускает горизонтальные электровысадочные станки RIO 100 SC SPEC и RIO 250 SC SPEC (рис. 1.11), в которых для повышения точности высаженных концов и качества их наружной поверхности применяется способ электровысадки в замкнутой полости матриц [24, 25].

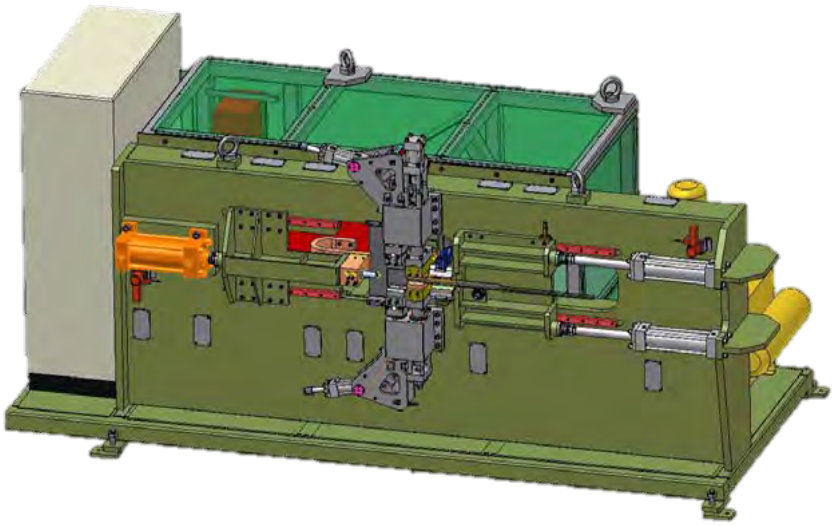


Рисунок 1.11 – Горизонтальный электровысадочный станок RIO 100 SC SPEC

В дополнение к осадке нагреваемого между электродами конца трубной заготовки на наковальне, которая выполняется под действием главного гидроцилиндра перемещения заготовки, над нагретым участком трубы производится сведение полуматриц для получения более качественной наружной поверхности высаженной части. Полуматрицы перемещаются парой вертикальных гидроцилиндров. Максимальное усилие высадки для станков составляет соответственно 100 кН и 250 кН. Максимальные ходы молота и наковальни составляют 300 мм и 200 мм. На станках могут быть высажены концы стальных труб сечением не более 1000 мм^2, максимальным диаметром 89 мм, толщиной стенки 6 мм. Максимальный диаметр высаженной части 96 мм (рис. 1.12).

Станок используется для одностадийной высадки труб нефтяного сортамента. При необходимости высадки труб другого типоразмера, требуется замена комплекта инструмента и электродов. Приблизительное время замены 30 мин. Установка питается токами промышленной частоты, при этом имеется открытый электрический контакт между электродами и участком заготовки, что служит фактором дополнительной опасности.

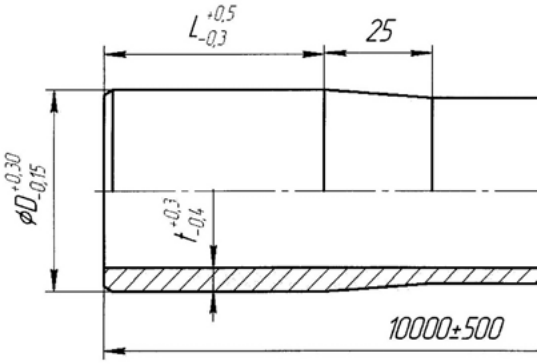


Рисунок 1.12 – Высаженная часть,
полученная на электровысадочном станке RIO 100 SC SPEC

Кроме того электровысадочные станки имеют низкую производительность, что привело к малому распространению данного типа оборудования в отличие от высадки концов труб в матрице под действием пуансона с предварительным нагревом конца трубы на заданную длину.

Основным требованием к материалу высадочного инструмента при электровысадке является высокая электропроводность [26]. Радиальные контакты изготавливают из сплавов на медной основе, а упорный контакт, который помимо прочего воспринимает еще и усилие высадки и контактирует с нагретым металлом трубы, а, следовательно, должен иметь высокую прочность и жаростойкость, выполняется из специальных жаропрочных материалов с высоким содержанием вольфрама, молибдена, кобальта, никеля, алюминия, железа и меди или армированной жаропрочной накладной бронзы. Зачастую в конструкции электровысадочных станков предусматривается принудительное водяное охлаждение инструмента [26].

Высадка концов труб в закрытых калибрах осуществляется в основном на оборудовании двух типов. Характер движения заготовки и высадочного инструмента определяется типом привода, используемого в конструкции машины.

Конструкция горизонтально-ковочной машины (ГКМ) представляет собой пресс, расположенный в горизонтальной плоскости, с кривошипно-

шатунным приводом. Существенное отличие ГКМ от другого кузнечно-прессового оборудования заключается в наличии штампов с двумя плоскостями разъема и возможности получать с их помощью поковки более сложной конфигурации, как из коротких, так и длинных заготовок. На ГКМ осуществляются технологические операции высадки, прошивки, просечки, пережима, отрезки, гибки, выдавливания и др. Их производительность выше, чем у молотов и гидравлических прессов при достаточной высокой точности и чистоте поверхности готового продукта, что может исключить из технологического цикла последующие операции обработки и значительно удешевить производство. В целом в крупносерийном и массовом производстве ГКМ используются для штамповки сплошных и полых поковок, преимущественно в горячем состоянии, для создания утолщенной части, высаживаемой в торец.

В общем случае внутри монолитной станины, снабжается рядом ребер и зачастую закрепленной стяжными болтами для обеспечения требуемой жесткости для возможности штамповки с малыми допусками, закреплены длинные регулируемые салазки, по которым перемещается высадочный инструмент (рис. 1.13).

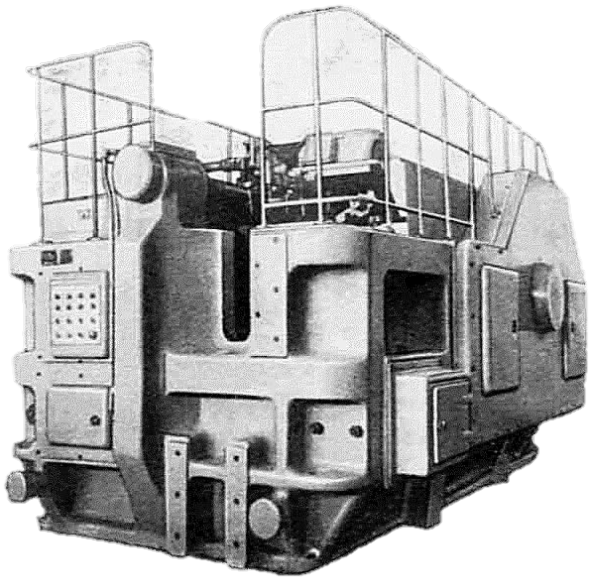


Рисунок 1.13 – Машина горизонтально-ковочная В1143
с вертикальным разъемом матриц

Главный ползун, на котором закреплены высадочные пуансоны, приводится в действие с помощью коленчатого вала. Одна из зажимных полуматриц размещается на вспомогательном ползуне, перемещающемся перпендикулярно движению главного ползуна, а другая жестко установлена на станине, хотя, в случае необходимости облегчения удаления крупногабаритных высаженных деталей – может быть аналогично размещена на еще одном подвижном ползуне. Зажимное усилие можно использовать на малых деформациях в направлении перпендикулярном оси высадки [21].

Машина приводится в действие от электромеханического привода с маховиком (рис. 1.14). В первоначальных конструкциях главный и зажимной ползуны приводились в движение от единого привода с помощью системы «ломающихся» рычагов через пальцевые муфты или муфты с поворотной шпонкой [21]. Это вызывало, помимо сложностей в обслуживании приводов и снижении точности работы машины, возникновение неблагоприятных боковых нагрузок на рычажную систему.

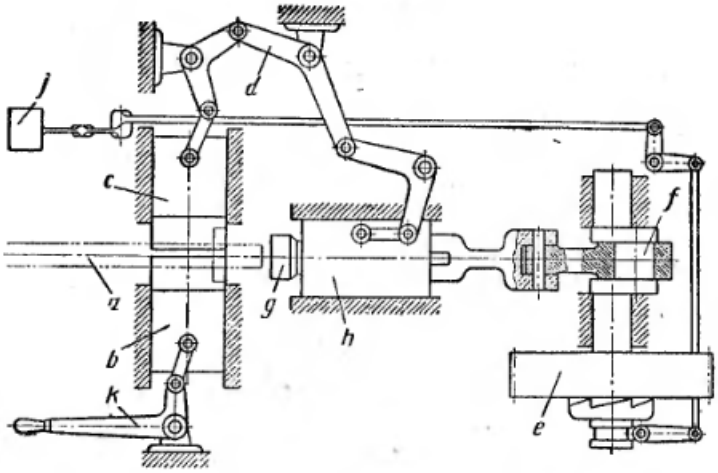


Рисунок 1.14 — Схема горизонтально-ковочной машины

(*a* – исходный материал; *b* – правая зажимная полуматрица (чаще неподвижная для выемки больших деталей, перемещаемая с помощью рычага *k*); *c* – левая подвижная полуматрица; *d* – рычажная система; *e* – маховик с муфтой; *f* – коленчатый вал; *g* - высадочный пуансон; *h* – главный ползун; *i* – педаль для управления муфтой)

В модернизированных конструкциях ГКМ используются раздельные приводы блоков пуансона и подвижной матрицы с приводом через пневматическую фрикционную муфту, предохраняющую от перегрузки (рис. 1.15). В данном случае движение зажимным пуансонам сообщается непосредственно от коленчатого вала, минуя главный ползун, хотя существуют конструкции, при которых зажимные пуансоны имею независимый пневматический или электромеханический привод. При этом зажимные ползуны оснащаются дополнительными направляющими, которые воспринимают распирающие усилия и повышают точность изготовления поковок (рис. 1.16).

Оба типа ползунов выполняются вытянутыми по высоте для того, чтобы имелась возможность закрепления инструмента или комплекта инструмента, позволяющего осуществлять многостадийную высадку. Высадочный инструмент может быть позиционирован в пространстве относительно плоскости разъема вертикально и горизонтально.

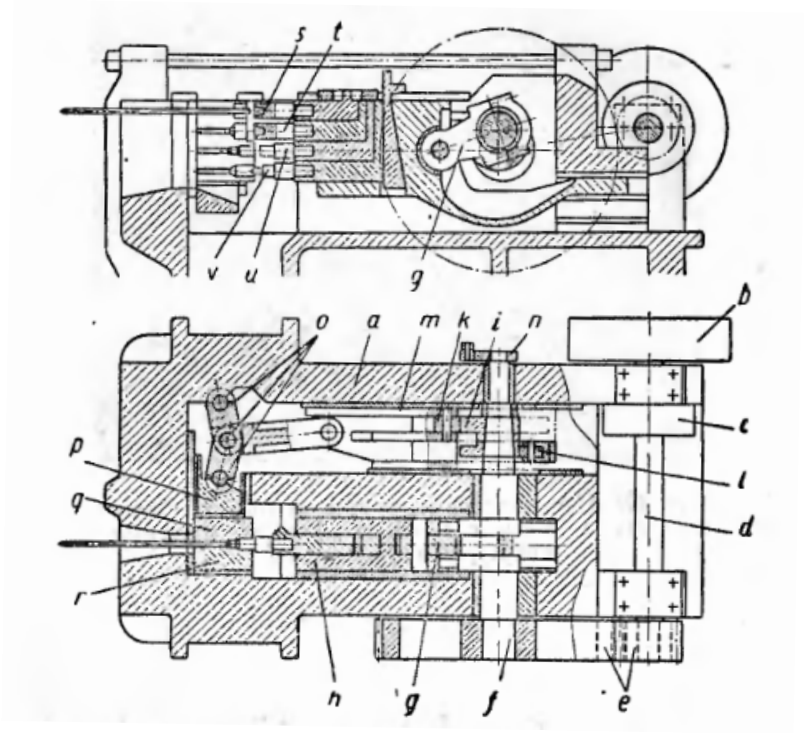


Рисунок 1.15 — Схема горизонтально-ковочной машины

(*a* – станина; *b* – маховик с пневматической фрикционной муфтой; *c* – пневматический ленточный тормоз; *d* – промежуточный вал; *e* – зубчатые колеса; *f* – коленчатый вал; *g* – шатун; *h* – главный ползун; *i* – двойной кулачок; *k* – ролик зажима; *l* – ролик обратного

хода; *m* – боковой ползун с предохранителем; *n* – кулачок управления муфтой и тормозом; *o* – ломающиеся рычаги; *p* – зажимной ползун; *q* – подвижная полуматрица; *r* - неподвижная полуматрица; *s* – первый черновой пуансон; *t* – второй черновой пуансон; *u* - чистовой пуансон; *v* – пробивной шестигранный пуансон)

Горизонтально инструмент располагается при соответствующем конструктивном исполнении станины и приводных узлов машины в случае многопереходной высадки тяжелых заготовок. Тогда исключается трудоемкие для этих весов операции по подъему и опусканию заготовки в калибры с заменой их перекладыванием из ручья в ручей. Заготовка, подаваемая в машину, фиксируется полуматрицей, опускаемой сверху. Еще одной особенности данной конструкции является удобство настройки положения матрицы при монтаже за счет поворота маховичка червячного редуктора вместо использования регулировочных подкладок.

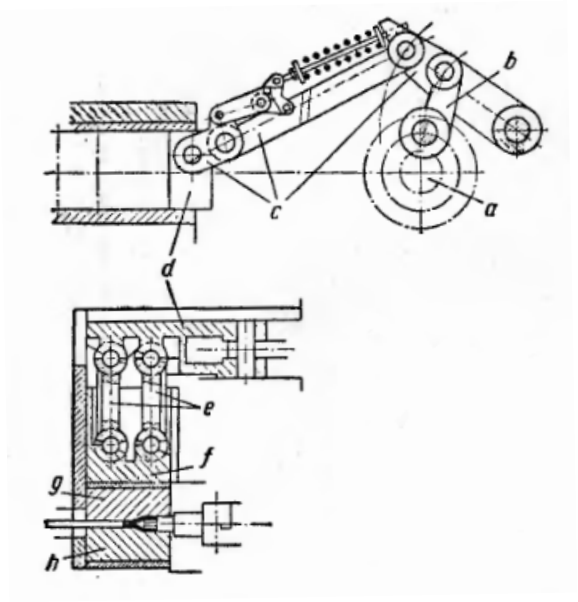


Рисунок 1.16 — Схема механизма зажима полуматриц
горизонтально-ковочной машины
(*вверху* – при открытых полуматрицах; *внизу* – при закрытых полуматрицах;
a – коленчатый вал; *b* – шатун; *c* – рычажная система зажима; *d* – боковой ползун;
e – два зажимных звена; *f* – зажимной ползун;
g – подвижная полуматрица; *h* – неподвижная полуматрица)

В то же время для высадки труб нефтяного сортамента более широко распространены машины с вертикальным разъемом матриц за счет занимаемой ими меньшей площади. Наличие в ГКМ рабочего и бокового ползунов позволяет получать высаженные концы сложной конфигурации [26]. Инструмент, применяемый на ГКМ, состоит из высадочной матрицы, пуансона или упора в зависимости от вида высаживаемой продукции (прутка или трубы) или технологической операции в рамках процесса высадки [10, 11]. В матрице применяются наборные ручьи при заготовительных операциях и формовочные и прошивные – при штамповочных. Калибр внутри составной матрицы набирается за счет вставок, выполненных из высоколегированных износостойких материалов. Вставки с отверстиями, образующими при складывании калибр, устанавливают последовательно вдоль каналов матрицы, таким образом, чтобы каждая несла свою функцию [34-36]: высадочная, прошивная (подъемная, пережимная), зажимная (рис. 1.17). Прошивку в штампах ГКМ применяют в случае получения полой штамповки из прутка. Таким образом, технология предусматривает двухстадийную высадку в двух верхних калибрах и удаление излишков металла с высаженного конца в нижнем.

Пуансоны в данных машинах выполняются цельными или составными, состоящими из рабочей части пуансона, державки и штыря (или винта), скрепляющего их [11].

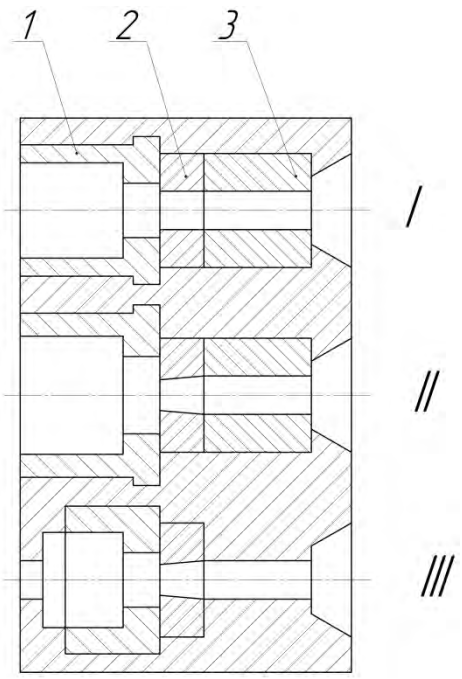


Рисунок 1.17 – Высадочная матрица горизонтальных ковочных машин (*I* – наборный ручей; *II* – формовочный ручей; *III* – просечной или обрезной ручей; *1* – высадочная вставка; *2* - подъемная (пережимная) вставка; *3* – зажимная вставка)

Основные параметры отечественных ГКМ с вертикальным разъемом полуматриц, регламентированные стандартом [29], приведены в табл. 1.1. ОАО «Тяжпрессмаш» изготавливает кузнечно-прессовое оборудование, в частности, ГКМ с вертикальным разъемом матриц, которые соответствуют приведенному стандарту (рис. 1.13).

Таблица 1.1 – Основные параметры ГКМ

Наименование параметров и размеров	Значения										
Номинальное усилие, развиваемое высадочным пуансон, МН	1,6	2,5	4,0	6,3	8,0	10,0	12,5	16,0	20,0	25,0	31,5
Ход подвижной матрицы, мм	80	100	125	160	180	200	220	250	280	310	350
Ход высадочного ползуна, мм	200	220	290	350	380	420	460	510	570	630	700
Ход высадочного ползу-	125	140	190	203	250	280	310	350	390	430	480

на после закрытия матриц, мм											
Обратный ход высадочного ползуна после закрытия матриц, мм	40	60	80	110	130	150	170	190	210	240	270
Частота непрерывных холостых ходов ползуна в минуту, не менее	80	63	53	42	38	36	32	30	28	25	22
Наибольший размер зева для прохода заготовки, мм	50	60	90	110	130	150	170	190	220	250	280

К настоящему времени линейка выпускаемых машин включает агрегаты усилием от 1,6 до 12,5 МН, позволяющие высаживать заготовки диаметром до 35-140 мм на максимальный размер высаженной части 60-180 мм (табл. 1.2).

Для высадки труб нефтяного сортамента применяются специализированные горизонтально-ковочные машины, в том числе, зарубежного производства. Например, американской машиностроительной фирмой «Аякс» [30] предлагается ГКМ для высадки концов труб нефтяного сортамента по стандарту API 5 [7], имеющие технологическую возможность утолщения стенки конца трубы за одну стадию высадки на 50% при наружной и комбинированной видах высадки и до 100% при внутренней высадки. Схема расположения узлов машины близка к отечественным аналогам, описанным выше (рис. 1.18).

Таблица 1.2 – Основные параметры ГКМ производства ОАО «Тяжпрессмаш»

Наименование параметров и размеров	Обозначение					
	ВА1132	ВВ1134	ВВ1136.01	В1138	В1139А	В1141
Номинальное усилие, развиваемое высадочным пуансон, МН	1,6	2,5	4,0	6,3	8,0	12,5
Ход высадочного ползуна, мм	200	220	290	350	380	460
Ход высадочного ползуна после закрытия матриц, мм	125	140	190	230	250	310
Частота непрерывных холостых ходов ползуна в минуту, не менее	80	63	53	42	38	32
Наибольший диаметр обрабатываемой заготовки, мм	35	40	70	90	100	140

Максимальный диаметр высаживаемого фланца, мм	60	70	100	120	140	180
Мощность эл. двигателя, кВт	15	16	28	45	45	75
Габарит машины, мм: длина ширина высота	 2820 2100 1600	 3875 3250 1526	 5047 3534 1877	 4835 3450 2880	 6000 3900 3460	 8035 4800 3575

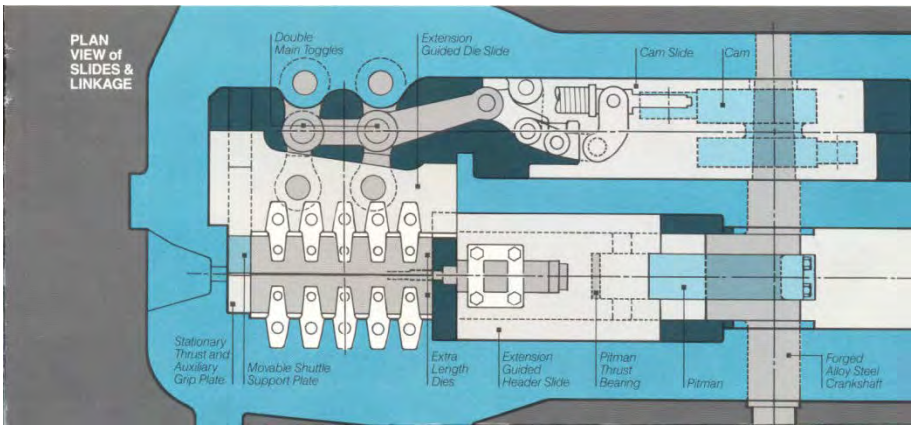


Рисунок 1.18 – Схема ГКМ фирмы «Аякс»

Внутри массивной литой станины располагается составная матрица с вертикальным разъемом, в калибры которой направлены соосные им пуансоны. От электродвигателя, установленного на крышке станины, через ременную передачу крутящий момент приводит во вращение через пневматическую фрикционную муфту быстроходный вал, от которого через открытую зубчатую передачу вращение передается на коленчатый вал. На коленчатом валу располагается главный ползун, обеспечивающий рабочий ход пуансонов вдоль направляющих линеек. На хвостовик коленчатого вала также насажен эксцентрик, находящийся в контакте с толкателем зажимного устройства. Зажимное устройство отвечает за перемещение одной полуматрицы и удержание матрицы в сомкнутом положении во время высадки. Другая полуматрица шарнирно закреплена на противоположной стенке станины.

Два калибра, располагающиеся на матрице, позволяют проводить две стадии высадки с одного нагрева. Производитель предполагает возможность одностадийной высадки, однако рекомендует использовать двухстадийную

программу для обеспечения более благоприятных режимов процесса [30]. В отдельных случаях (высадка бурильных труб с высококачественной резьбой), когда требуется трех- и более стадийная высадка, она производится последовательно по две стадии с одного нагрева с заменой инструмента и промежуточными нагревами.

В отличие от прочих ковочных машин и молотов конструкция высадочного пуансона имеет удлиненный носок, который в момент высадки находится вне нагретой деформационной зоне трубы (рис 1.19).

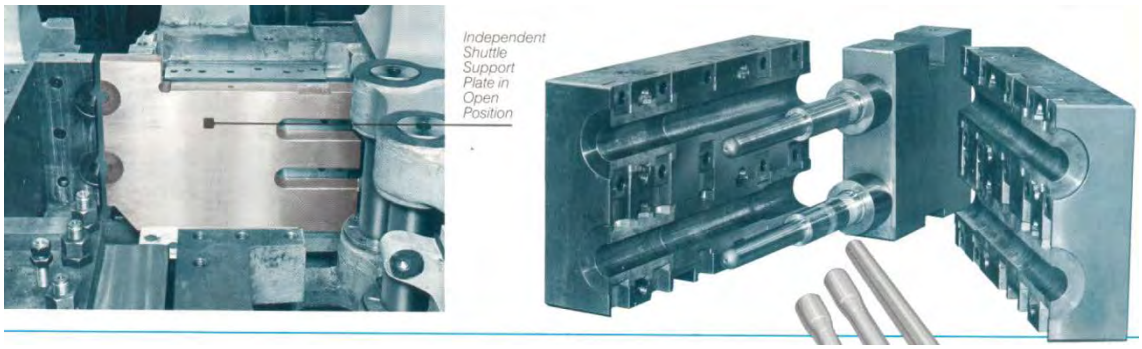


Рисунок 1.19 – Инструмент ГКМ фирмы «Аякс»

За счет этого увеличивается по сравнению с аналогами ход пуансона, что, соответственно, приводит к повышению времени высадки, а также времени возврата пуансона и удержанию трубы в матрице. С другой стороны увеличенная длина инструмента позволяет получить более надежный захват трубы матрицами. Основные параметры линейки ГКМ фирмы «Аякс» приведены в табл.

Таблица 1.3 – Основные параметры ГКМ фирмы «Аякс»

Наименование параметров и размеров	Обозначение					
	3½”	5½” Standart	5½” Heavy Duty	7⅝”	12”	13½”
Номинальное усилие, развиваемое высадочным пуансон, МН	3,56	4,89	6,23	9,79	13,34	17,79
Ход высадочного ползуна, мм	457	533	610	711	762	813

Частота непрерывных холостых ходов ползуна в минуту, не менее	45	35	31	25	21	19
Наибольший диаметр обрабатываемой заготовки, мм	88,90	139,70	139,70	193,68	304,80	342,90
Мощность эл. двигателя, кВт	29,84	55,95	55,95	149,2	186,5	186,5
Габарит машины, мм: длина ширина	 4826 2743	 5563 3353	 6401 3658	 8306 4572	 10287 5182	 10668 5461

На ПАО «Синарский трубный завод» в трубопрокатном цехе Т-2 используются линии получения высаженных концов бурильных труб, в которых установлены иностранные ГКМ WSR-630, работающих в связке с проточными парами RT-180, которые должны исправлять дефекты наружной поверхности концов, получаемых при высадке. Технические характеристики данных ГКМ представлены в табл. 1.4.

На ГКМ, выпускаемых фирмой Hasenclever (Германия) [13], используются раздельные независимые приводы для главного и зажимного ползунов, которые призваны обеспечить равенство между объемом металла, подаваемого в калибр, и внутреннего объема полости калибра, что также снизит вероятность возникновения дефектов на поверхности изделия. Помимо этого, в конструкции машины предусмотрены гидропневматические системы, установленные на главном высадочном ползуне и неподвижной полуматрице. При такой конструкции привода деформация металла осуществляется на всем рабочем ходе пуансона с одновременной компенсацией отклонений заготовки от номинальных размеров.

Таблица 1.4 – Технические характеристики горизонтально-ковочной машины ГКМ WSR-630

№ п/п	Наименование	Технические данные
1	Диаметр высаживаемых труб, мм	от 33 до 140
2	Длина высаживаемых труб, мм	от 6000 до 12500
3	Температура высадки, °С (по торцу трубы)	от 1100 до 1280
4	Максимальное усилие зажима, кН	25493
5	Максимальное усилие высадки, кН	6424

6	Ход высадочного ползуна, мм	750
7	Число ходов высадочного ползуна при непрерывной работе, мин$^{-1}$	около 20
8	Ход подвижных высадочных и зажимных салазок, мм	260
9	Пережим неподвижных высадочных зажимных салазок, мм	не более 4
10	Давление масла в гидросистеме, МПа	15
11	Ход гидравлического поршня, мм	56
12	Давление воздуха в системе, МПа	от 0,43 до 0,55

Другим типом оборудования, использующим принцип получения высаженного конца трубы в закрытом калибре составной матрицы, являются гидравлические прессы, инструмент в которых перемещается под действие гидроприводов высокого давления. Гидравлические высадочные прессы зарубежного производства широко представлены на российских предприятиях. Компания Ateliers et Chantiers de Bretagne (Франция) разработала однопозиционные прессы, имеющего одинарный комплект высадочного инструмента. Высадочный пуансон закреплен на горизонтальном рабочем гидроцилиндре, обеспечивающий прямолинейное перемещение пуансона для деформации трубы. Полуматрицы, осуществляющие зажим и удержание трубы, а также отвечающие за наружное формоизменение заготовки, закреплены на паре вертикальных гидроцилиндров. Данная машина не в состоянии обеспечить многооперационную высадку с одного нагрева. В случае необходимости производится замена высадочного инструмента и повторных нагрев или формировании линии последовательно установленных гидравлических прессов, соответствующих числу стадий высадки.

Двухпозиционный пресс фирмы Mannesman Demag (Германия) [31] отличается наличием подвижной в горизонтальной плоскости траверсы, в которых закреплена составная полуматрица, а также револьверной головкой держателя пуансонов, размещающая в себе одновременно три пуансона.

Многопозиционные прессы, выпускаемые немецким производителем Laies, помимо возможности осуществлять на них калибровку труб и формирование днищ у газо- и гидробаллонов, позволяют производить высадку за

три этапа с двумя предварительными нагревами [13]. На первом этапе после нагрева осуществляется наружная высадка. Затем специальным кольцом с внутренним диаметром, равным диаметру тела трубы, производится редуцирование наружного утолщения во внутреннее. На завершающем третьем этапе после дополнительного нагрева выполняется окончательная высадка конца трубы. Преимущество разбивки технологического процесса на три стадии, реализованного в данной машине, заключается в удобстве контроля размеров внутренней переходной части между высаженным концом и основным телом трубы.

Оригинальным техническим решением, примененным в данной конструкции, является закрепление матрицы и пуансона на едином узле пуансонодержателя с возможностью перемещения пуансона относительно матрицы. При этом матрица выполняется цельной, а не разъемной как в прочих конструкциях.

В целом, для труб нефтяного сортамента многооперационная, а именно трехэтапная высадка с предварительным подогревом перед каждой стадией, высадка наиболее характерна при производстве бурильных труб за счет большей относительно других труб нефтяного сортамента толщины стенки [32, 33]. При этом на первой операции производят комбинированную высадку, на второй операции – только внутреннюю, на третьей – комбинированную. Высадка с утолщением стенки без изменения наружного диаметра, производимая во время второй операции, позволяет улучшить качество конца высаживаемой трубы. Для сортамента труб типа НКТВ с целью обеспечения высокой производительности агрегата высадка осуществляется за одну стадию, впрочем, конструкция высадочных агрегатов зачастую предусматривает высадку за две или несколько стадий, чтобы расширить диапазон обрабатываемых труб.

На АО «Первоуральский новотрубный завод» и ПАО «Синарский трубный завод» успешно функционируют линии высадки концов труб нефтяного

сортамента на основе машин SMS Meer (Германия) [34-36]. Применение этих машин позволяет получать высаженные концы труб НКТВ высокого качества в одну стадию без дополнительной обработки. Установка включает в себя сам высадочный пресс и три последовательно расположенных индуктора (рис. 1.20).

Трубы поштучно подаются в индукторы на требуемую длину нагрева, в первом и втором до 850 °С, в третьем до 1300 °С. После отвода из третьего индуктора труба попадает в высадочный пресс, представленный на рис. 1.21. Станина пресса, воспринимающая технологические усилия при высадке, установлена на раме *1* и состоит из двух траверс *2*, соединенных между собой колоннами *8*. Труба подается вдоль оси высадки и фиксируется зажимными кулачками механизма *7*. Над нагретым до рабочей температуры концом трубы сводятся полуматрицы 6, на которые надвигается матрицедержатель 5, предохраняющий матрицу от раскрытия в процессе высадки. Рабочий пуансон *4*, перемещающийся на каретке *9* по направляющим, расположенным на раме *1*, приводится в движение от рабочего цилиндра *3* и вводится в отверстие матрицы.

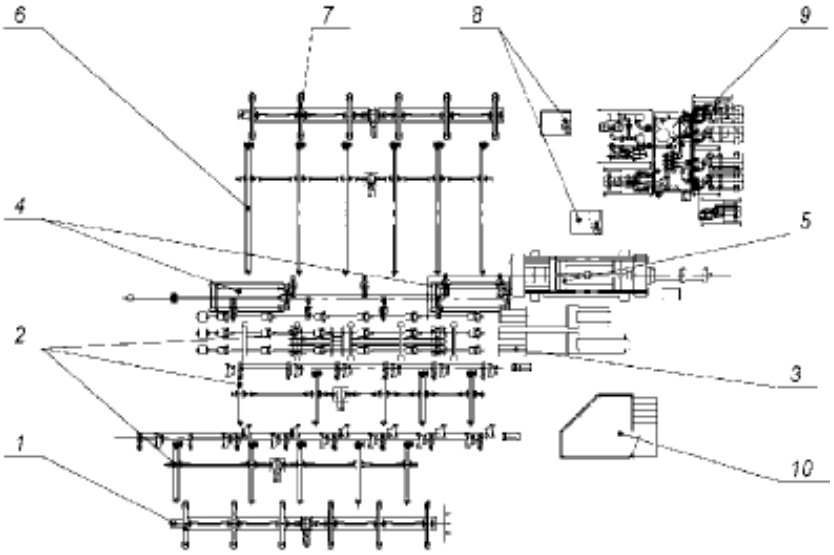


Рисунок 1.20 – План расположения оборудования
на участке высадочного пресса SMS Meer
(*1* – загрузочный карман; *2* – входная сторона пресса; *3* – индукторы;
4 – клещевой манипулятор; *5* – гидропресс; *6* – выходная сторона пресса;

7 – карман для высаженных труб; *8* – баки для приготовления смазки; *9* – маслостанция; *10* – пульт управления)

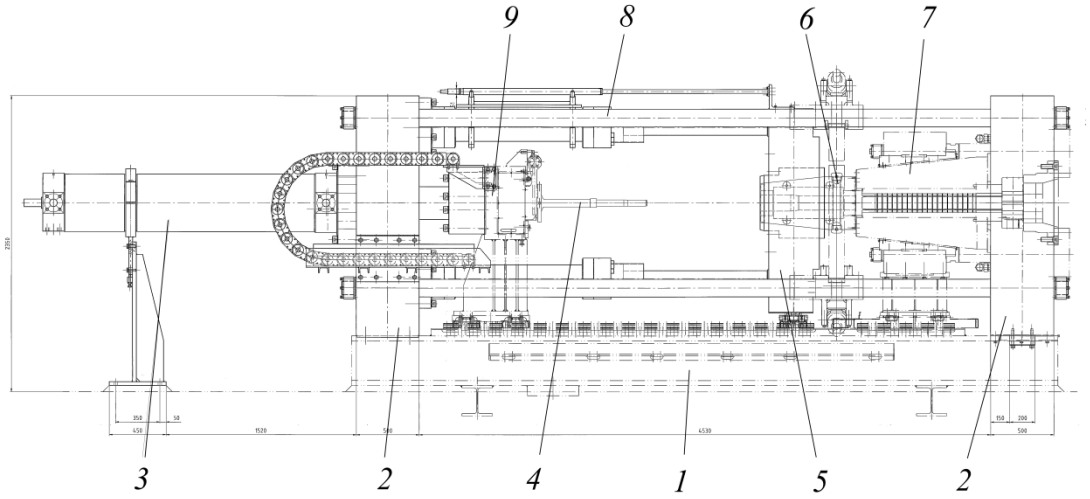


Рисунок 1.21 – Высадочный пресс SMS Meer

(*1* – рама; *2* – траверсы; *3* – рабочий гидроцилиндр; *4* – рабочий пуансон; *5* – узел матрицедержателя; *6* – матричный узел; *7* – механизм зажима труб; *8* – колонны; *9* – каретка перемещения рабочего пуансона)

По окончании рабочего хода пуансон выдерживается внутри трубы при сохранении давления в рабочем цилиндре в течение 1,5-2,5 с, после чего подвижные элементы пресса возвращаются в первоначальные положения в порядке, обратном указанному выше.

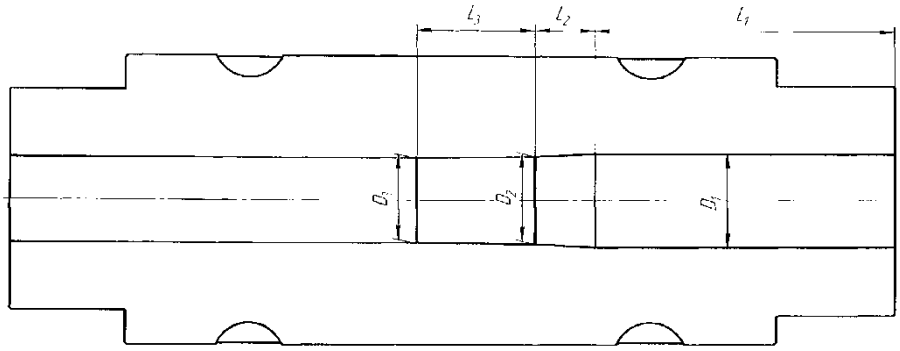
При получении утолщенных концов НКВТ для высадочного инструмента (пуансона и матрицы), изготавливаемого цельным без вставок, используется следующая компоновка рабочих участков (рис. 1.22) [37]. Калибровка высадочного пуансона, формирующая внутреннюю поверхность высаженного конца трубы, состоит из следующих участков (рис. 1.22, а),: участка длиной (l_1) с диаметрами (d_1 и d_2) – рабочая часть высадочного пуансона, предназначенная для формирования внутренней поверхности высаженного конца; диаметры d_1 и d_2 на 0,6-1,5 мм превышают номинальный внутренний диаметр гладкой части трубы; участка длиной (l_2) с диаметрами (d_2 и d_3), обеспечива-

ющего свободное прохождение пики пуансона в холодный участок трубы без перекоса относительно оси трубы; участка длиной (l_3) с диаметрами (d_3 и d_4), обеспечивающего в начальный период распрессовки устойчивость трубы, предотвращающее образование складок и ужимов.

Калибровка высадочной матрицы (рис. 1.22, б), формирующая наружную поверхность высаженного конца трубы, состоит из 3-х участков: цилиндрического (L_1) и конического (L_2), формирующих высаженную часть трубы; и конического (L_3), формирующего зону за высаженной частью трубы и исключающего попадание металла трубы между матрицами и появление на участке трубы за высаженной частью локальных участков раздачи тела трубы за счет увеличения наружного диаметра.

Техническая характеристика высадочного пресса SMS Meer и индукционной установки ELOTHERM приведены в табл. 1.5-1.7.

а



б

Рисунок 1.22 – Компоновка высадочного инструмента

(*а* – пуансон; *б* – матрица)

Таблица 1.5 – Размеры индукторов установки

предварительного нагрева перед высадкой ELOTHERM

Тип индукто-ра	Маркировка	Размеры, мм		Размеры труб D×S, мм	Количество индук-торов, шт.	
		диаметр, D	длина, L		1 контур	2 контур
ETH 1000 402.2489	88,9	135	1000	60,3×4,8 – 88,9×11,4	2	1
ETH 1000 402.2489	127,0	180	1000	101,6×6,5 – 127,0×12,7	2	1

Таблица 1.6 – Электротехнические характеристики
установки предварительного нагрева перед высадкой ELOTHERM

Характеристики	Общий преобразователь, индукторы 1-2	Преобразователь, индуктор 3
Номинальная мощность	800кВА	600кВА
Номинальная частота	2кГц	2кГц
Номинальное напряжение	1000В	1000В
Входное напряжение	765В	765В

Таблица 1.7 – Техническая характеристика
гидравлического высадочного пресса SMS Meer

Наименование параметра	Технические данные
Усилие высадки вперед	около 2500 кН
Усилие высадки назад	около 1250 кН
Ход высадочного цилиндра	1700 мм
Длина высадочной полусферы	750 мм
Осевой ход зажимного устройства	180 мм
Макс. давление зажимного устройства	280 бар
Радиальный ход зажимного устройства	37 мм
Минимальный диаметр высадки	42,2 мм
Максимальный диаметр высадки	146,1 мм
Максимальная скорость передвижения высадочного цилиндра (высадки) – вперед	максимум 500 мм/с
назад – на полную силу	максимум 500 мм/с максимум 95 мм/с
Максимальное рабочее давление	280 бар
Характеристики труб, подлежащих высадке:	
Диаметр высаживаемых труб	60,3 - 127,0мм
Толщина стенки	4,8 - 12,7 мм
Длина труб	7,0 - 12,0м
Разнодлинность труб в одной партии	±500 мм

Анализ существующего на сегодня оборудования для производства насосно-компрессорных труб с высаженными наружу концами показывает, что электровысадочные станки, несмотря на отсутствие дополнительных нагревательных устройств в линии, малой энергоемкости процесса, имеют недостатки, связанные с низкой стойкостью инструмента, необходимостью применения дорогих материалов для его изготовления и наличием принудительного охлаждения.

Среди недостатков горизонтально-ковочных машин следует отметить большую массу и габарит, сложность конструкции, затрудненный доступ к штампам, повышенные динамические нагрузки, действующие на узлы машины, малый ход высадочного ползуна и ряд других.

Наилучшим образом всем требованиям, предъявляемым к машинам для высадки концов труб, отвечают горизонтальные гидравлические прессы. Они 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.

1.3 Обзор теоретических исследований процесса наружной высадки концов труб

Теоретическим исследованиям процесса высадки концов труб посвящены работы Тарновского И.Я., Остренко В.Я., Богатова А.А., Выдрина А.В. и ряда других авторов [38-45]. 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 [38]. В работе Тарновского И.Я. [39] решается задача по определению усилий и формоизменения трубной (кольцевой) заготовки ограниченной снаружи контейнером при ее обжа-

тии пуансоном на некоторую величину (рис. 1.23).

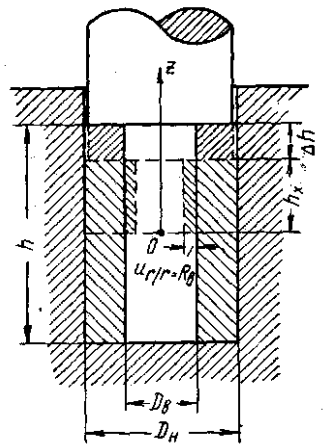


Рисунок 1.23 – Схема бесконечно малой осадки трубной заготовки (высадки внутрь) (h – высота заготовки; Δh – бесконечно малая высота заготовки; h_x – высота очага пластической деформацией; $u_{r/r=rв}$ – граничное условие; $D_в$ – внутренний диаметр заготовки; $D_н$ – наружный диаметр заготовки)

При этом записываются компоненты деформаций в виде

$$\varepsilon_z = -\varepsilon = -\frac{\Delta h}{h_x}$$

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{2}\left(1 + \frac{R_н^2}{r^2}\right)$$

$$\varepsilon_\varphi = \frac{\varepsilon}{2}\left(1 - \frac{R_н^4}{r^4}\right)$$

$$\gamma_{rz} = 0$$

составляются выражения для работы внутренних сил, работы сил трения металла по стенке контейнера, работы сил среза в плоскости $z = 0$ и находится выражение для полной работы деформации. Затем, учитывая, что

$$A = P\Delta h = p\pi(R_н^2 - R_в^2)\Delta h$$

$$\Delta h = \varepsilon \cdot h_x$$

где A – полная работа деформации;

P – полное усилие деформирования;

p – среднее удельное давление, отнесенное к площади поперечного сечения стенки трубы, путем использования условия минимума полной энергии

деформации для жестко-пластической среды получены значения h_x, p, P в рассматриваемом процессе.

В работах [40-43] рассмотрено математическое моделирование процесса высадки концов труб методом линий скольжения. В результате определена зависимость для нахождения нагрузки, действующей на пуансон, вида

$$T_{\text{в}} = 2\tau_S\pi\left[\frac{1}{2}+\frac{\pi}{4}+\sin^{-1}\frac{R_{\text{м}}-R_{\text{п}}-S_0-W}{\frac{S_0}{\sqrt{2}}}\right]\times$$

$$\times\left[S_0R_{\text{п}}\cos\left(\frac{1}{2}\cos^{-1}\mu\right)+\frac{S_0^2}{\sqrt{2}}\cos^2\left(\frac{1}{2}\cos^{-1}\mu\right)\right]+2\pi\mu_{\text{к}}\sigma_S L(R_{\text{м}}+R_{\text{п}})$$

где L – длина цилиндрического участка высаженного конца трубы;

S_0 – толщина стенки трубы;

$\mu_{\text{к}}$ – коэффициент трения на контакте со стенкой матрицы;

μ – коэффициент трения на контакте с пуансоном;

$R_{\text{п}}$ – усредненная величина радиуса пуансона;

$R_{\text{м}}$ – радиус полости матрицы;

τ_s – сопротивление металла пластической деформации сдвига;

σ_s – сопротивление металла пластической деформации.

При этом длина цилиндрического участка высаженного конца трубы определяется согласно уравнению

$$L=\left(\frac{L_0}{\Delta L}-1\right)\sqrt{2S_0^2\cos^2\left(\frac{1}{2}[\pi-\cos^{-1}(-\mu)]\right)-(d-S_0)^2}$$

где L_0 – длина высаживаемого участка трубы;

ΔL – длина усадки;

d – зазор между пуансоном и матрицей.

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

$$\sigma_{S\text{к}} = 2347U_{\text{с}}^{0,1314}\varepsilon_1^{0,1244}e^{-0,00313t}$$

$$\sigma_{S\text{к}} = 2186U_{\text{с}}^{0,1196}\varepsilon_1^{0,1558}e^{-0,00299t}$$

$$\mu = 0{,}0013e^{0{,}0046t}$$

полученные по результатам исследований по осадке цилиндрических образцов.

Стоит отметить, что решение задачи методом линий скольжения не позволяет получить полные данные о формоизменении конца трубы и учесть возможность образования дефектов при высадке.

Конечно-элементное моделирование процесса высадки концов труб проведено в работах [44, 45], с целью изучения особенностей формоизменения металла в процессе высадки, установления причин и условий образования дефектов на поверхности готовых труб. Для этого созданы твердотельные модели инструмента и трубной заготовки, проведен их импорт в программный продукт DEFORM-3D, создана сетка конечных элементов, назначены свойства материала заготовки и инструмента, с использованием библиотеки DEFORM-3D, заданы граничные условия, проведены решение и анализ полученных результатов. При анализе полученных результатов выделено несколько стадий процесса с характерными условиями течения металла:

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.

Было 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 согласно рис. 1.24-1.26.

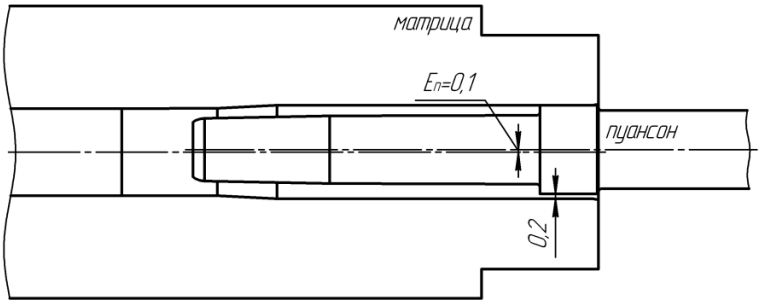


Рисунок 1.24 – Радиальное смещение пуансона относительно матриц

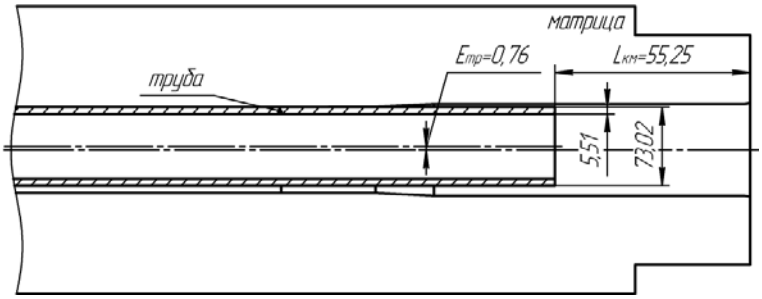


Рисунок 1.25 – Радиальное смещение трубы относительно матриц

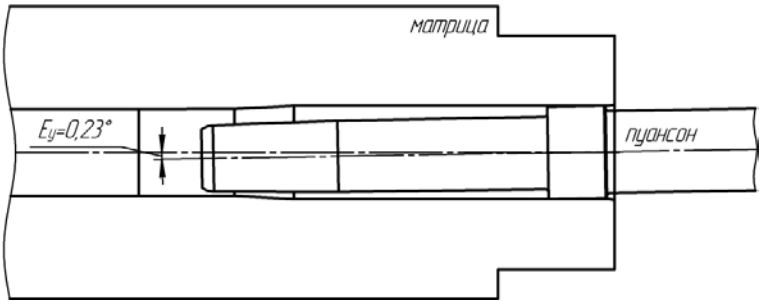


Рисунок 1.26 – Угловое смещение пуансона относительно матриц

В тоже время не было учтено влияние условий процесса на энергосиловые параметры при высадке, свойства материала, принятые из библиотеки программного пакета не в достаточной мере отражают реальное поведение кривых сопротивления деформации при различных температурах. При моделировании не бралась в расчет последовательность технологических операций (неравномерность предварительного нагрева и охлаждение заготовки при транспортировке от индукторов к высадочному прессу).

Таким образом, обзор существующих решений по определению параметров наружной высадки концов труб показал, что отсутствуют теоретические решения по определению энергосиловых параметров процесса, учиты-

вающие нагрев и охлаждение конца трубы до установки на ось прессования; для удлиненной высадки; с использованием кривых упрочнения для коррозионностойких марок сталей (15Х5МФБ, 18Х3МФБ 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. Всё это вызывает необходимость в постановке и решении новой задачи по определению энергосиловых параметров и нагруженности инструмента при наружной высадке концов труб.

1.4 Постановка задач исследования

Анализ существующих технологий, устройств для наружной высадки концов насосно-компрессорных труб и теоретических исследований данного процесса позволил сформулировать основные задачи настоящей работы.

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 инстру-

мента.

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.

ВЫВОДЫ

1. Технология производства насосно-компрессорных труб с высаженными концами в закрытом калибре с предварительным нагревом на специализированных горизонтально-ковочных машинах с механическим приводом или горизонтальных гидравлических прессах является наиболее целесообразным способом получения труб с высаженными концами, позволяет при высокой производительности обрабатывать трубы широкого сортамента. При этом концы труб имеют высокое качество поверхности, которое позволяет исключить дополнительную обработку.

2. Наилучшим образом всем требованиям, предъявляемым к машинам для высадки концов труб отвечают горизонтальные гидравлические прессы, обеспечивающие широкие возможности по регулированию скорости пуансона и контролю действующих на оборудование нагрузок, имеющие высокий уровень автоматизации, хороший доступ к узлам машины для проведения обслуживания и наблюдения за технологическим процессом.

3. Отсутствие необходимых теоретических исследований процесса наружной высадки концов труб, учитывающих нагрев и охлаждение конца трубы до установки на ось прессования; удлиненной высадки; с использованием кривых упрочнения для коррозионностойких марок сталей (15Х5МФБ, 18Х3МФБ и 18ХМФБ); рассматривающих 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. вызывает необходимость в постановке и решении новой задачи по определению энергосиловых параметров и нагруженности инструмента при наружной высадке концов труб.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА НАРУЖНОЙ ВЫСАДКИ КОНЦОВ НАСОСНО-КОМПРЕССОРНЫХ ТРУБ

Согласно анализу, проведенному в главе 1, наилучшим образом всем требованиям, предъявляемым к машинам для высадки концов труб, отвечают горизонтальные гидравлические высадочные прессы, обеспечивающие широкие возможности по управлению процессом высадки. Разработка математической модели наружной высадки концов труб позволит получить зависимости для энергосиловых параметров процесса высадки, необходимые для совершенствования технологии, разработки инструмента и снижения энергетических затрат.

2.1 Выбор метода теоретического исследования

Прямое решение полной системы дифференциальных уравнений теории пластичности, включающей уравнения связи напряженного и деформированного состояния, уравнения движения, уравнение неразрывности, уравнение теплопроводности и т.д. затруднено из-за большого количества уравнений в частных производных. Поэтому были разработаны и используются на практике методы, основанные на допущениях, позволяющих уменьшить число уравнений при рассмотрении состояния деформированного тела. К этим методам можно отнести:

1. Инженерный метод
2. Метод линий скольжения
3. Метод сопротивления материалов пластическим деформациям
4. Метод баланса работ
5. Вариационные методы
6. Метод конечных элементов и др.

Инженерный метод (или метод совместного решения приближенных уравнений равновесия и пластичности) получил широкое распространение благодаря работам Е.П. Унксова [46, 47], А.И. Целикова [48, 49], С.И. Губкина [50], Л.Е. Альшевского [51] и др. для конкретных процессов ОМД. Метод позволяет получать выражения для распределения напряжений на контактной поверхности, уравнения зависимости усилий от различных параметров. Вместе с тем применение данного метода ограничено рассмотрением осесимметричных и плоских задач, а также он не пригоден для решения задач формоизменения.

Метод линий скольжения был разработан А.Д. Томленовым [52, 53], В.В. Соколовским [54], Р. Хиллом [55] и др. В основе метода лежит построение сетки линий скольжения и использование их свойств, которые позволяют упростить дифференциальные уравнения равновесия. Метод линий скольжения прост в применении, позволяет определять распределение напряжений в объеме тела. Однако данному методу свойственны те же недостатки, которые присущи инженерному методу решения задач ОМД.

Объединение ряда способов аналитического и экспериментального исследований Г.А. Смирновым-Аляевым и его сотрудниками [56] позволило получить метод сопротивления материалов пластическим деформациям. Метод позволяет анализировать достаточно сложные процессы ОМД. В основу метода положено совместное решение системы дифференциальных уравнений движения и уравнений связи напряжений и деформаций. Область применения метода ограничивается решением задач на конечное формоизменение.

Метод баланса работ достаточно удобен для определения энергосиловых параметров в процессах ОМД и наиболее эффективен в сочетании с экстремальными принципами. В этом случае становится возможным и описание формоизменения. Метод применялся в исследованиях А.Ф. Головина, М.В. Сторожева [57], И.Л. Перлина [58], В.Н. Выдрина [59, 60] и др. В основе метода баланса работ лежит положение о том, что в процессе пластической де-

формации работа внешних сил на соответствующих им перемещениях равна сумме работ внутренних сопротивлений (закон сохранения энергии).

Вариационные методы использовали в своих исследованиях И.Я. Тарновский [39], В.Л. Колмогоров [61, 62], Г.Я. Гун [63, 64] и др. Методы базируются на составлении и решении вариационного уравнения принципа виртуальных скоростей и напряжений. Вариационные методы позволяют решать задачи по определению параметров формоизменения, распределения напряжений в объеме рассматриваемого тела для трехмерных задач. Среди недостатков методов можно отметить зависимость решения от удачного выбора подходящих функций описывающих поля деформаций и напряжений, а также сложности численной реализации при большом количестве варьируемых параметров.

Метод конечных элементов, в развитие которого внесли свой вклад О. Зенкевич [65, 66], С. Кобаяши [67], Р. Галлагер [68] и др., на сегодняшний день получил самое широкое распространение в связи с развитием вычислительной техники, а также широкими возможностями по определению напряженно-деформированного состояния металла, конечного формоизменения, энергосиловых параметров, температур и т.д. при рассмотрении различных задач теории пластичности. Согласно этому методу [69, 70] созданная непрерывная модель дискредитируется согласно выбранному пространству конечных элементов, затем задаются физико-механические свойства материалов инструмента и заготовки, граничные условия. Полученная затем система линейных дифференциальных уравнений решается прямым или итерационным методом.

2.2 Обоснование расчетной схемы процесса наружной высадки концов насосно-компрессорных труб

На сегодняшний день численная реализация математической модели в программном пакете, базирующемся на принципах конечно-элементного моделирования [71-75], представляет собой в общем случае алгоритм по выполнению последовательных операций, результат которых, должен быть передан в расчетный модуль программного пакета для решения задачи по шагам моделирования.

Как известно [65], при использовании МКЭ производится процесс дискретизации, в результате чего область решения разбивается на конечные элементы (КЭ) с целью нахождения величин скоростей, перемещений и усилий в узлах каждого из КЭ и последующего сведения данной информации в систему для всей области решения. Для осуществления этой задачи необходимо определить параметры сетки разбиения области решения задачи, задать начальные и граничные условия, после чего можно приступить к выбору уравнений взаимосвязи величин в узлах КЭ (используются полиномиальные уравнения n-ой степени). При решении уравнения сводятся в систему для всей области разбиения и решаются с последующей оценкой точности решения. Критерий точности назначается при постановке задачи.

При обосновании расчетной схемы моделирования процесса наружной высадки в нее включаются объекты, выполняющие роль заготовки и инструмента, т.е. разъемной матрицы и пуансона. Остальными элементами реального процесса пренебрегаем в виду требований по минимуму входящих в расчетную схему объектов [67]. Принципиальными параметрами при этом являются параметры геометрии заготовки и деформирующих поверхностей инструмента, которые будут контактировать с заготовкой в процессе высадки.

Стоит также учитывать, что при моделировании процесса наружной высадки задачу требуется решать путем последовательного рассмотрения трех

трёх этапов: «нагрев-охлаждение-деформация», с передачей результатов решения от каждой предыдущей операции к последующей. Таким образом, процесс рассматривается от момента начала нагрева заготовки в индукторе с охлаждением в процессе передачи от индуктора на ось высадочного пресса и до момента остановки прямого хода пуансона пресса. Схема очага деформации металла при высадке концов насосно-компрессорных труб, по мере движения пуансона, представлена на рис. 2.1. В рассматриваемой схеме очаг деформации ограничен внутренней поверхностью калибра матрицы и наружной поверхностью рабочей части пуансона и его упорного пояска.

Размеры калибра матрицы и рабочих конусов пуансона выбираются согласно типоразмеру обрабатываемых труб и соответствующим данным размерам инструмента по требованиям стандартов и технической документации на высадочный пресс. Схема высаженного конца насосно-компрессорной трубы представлена на рис. 2.2.

При построении модели процесса наружной высадки концов НКТ принимаются допущения:

- составная матрица и пуансон принимаются абсолютно жесткими или упругими телами, а заготовка – идеально пластичным телом со степенным законом упрочнения;

- теплообмен нагретой заготовки с окружающей средой принимается по наружной, внутренней и торцевой поверхности заготовки в процессе нагрева и охлаждения трубы;

- при рассмотрении этапа пластической деформации заготовка закрепляется на дальнем торце путем запрета на перемещения в узлах КЭ.

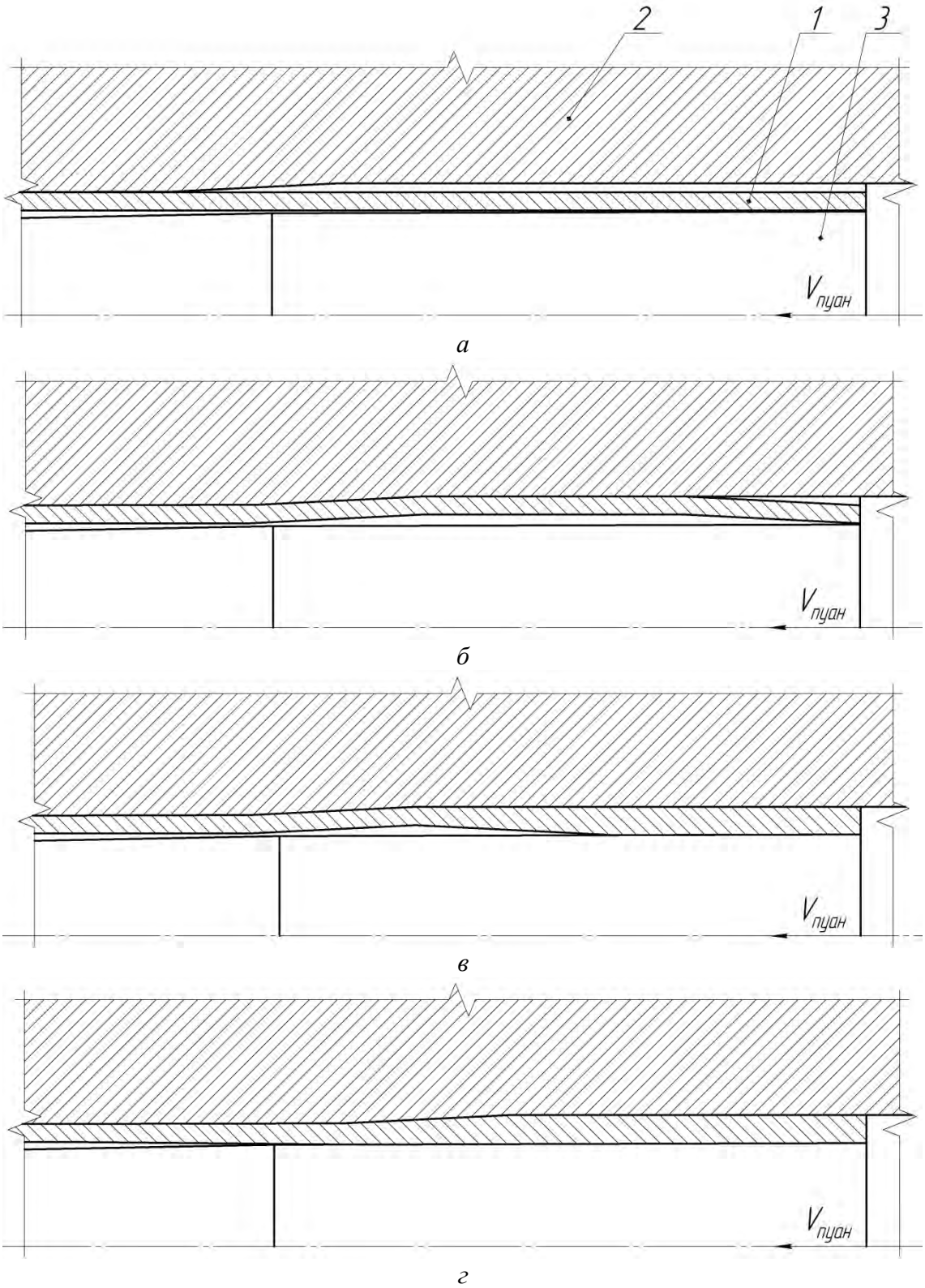


Рисунок 2.1 – Последовательность процесса наружной высадки концов НКТ
(*1* – заготовка; *2* – разъемная матрица; *3* – пуансон;
а – начальное положение пуансона; *б*, *в* – промежуточные положения;
г – окончательное положение пуансона)

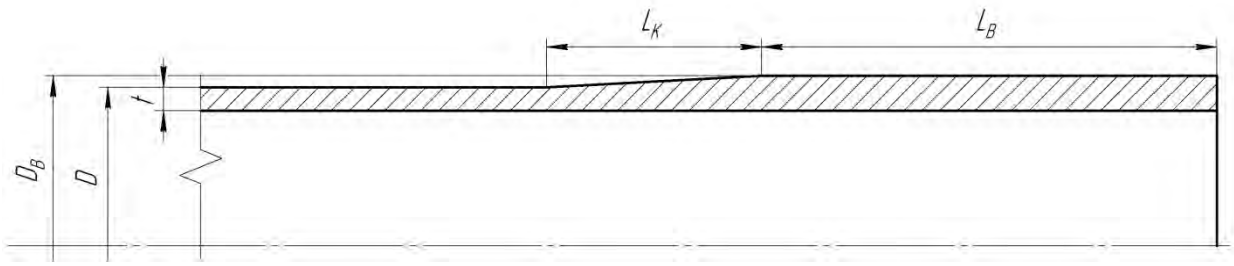


Рисунок 2.2 – Высаженный конец насосно-компрессорной трубы
(D_B – наружный диаметр высаженного конца трубы; D – наружный диаметр трубы; t – толщина стенки трубы; L_B – длина высаженной части (расстояние от торца трубы до начала переходного участка); L_K – длина конической части трубы (переходного участка)

Решение тепловой и деформационной задачи для сплошной среды в конечно-элементной формулировке производится с использованием моделей сеток Эйлера и Лагранжа, разница между которыми заключается в том, что сетка Лагранжа искажается вместе со средой, а сетка Эйлера остается жесткой на протяжении всего процесса с переносом значений от сплошной среды к КЭ [66].

Процессы обработки металлов давлением сопряжены со значительными величинами деформации при сложном их характере, что приводит к трудностям в согласовании деформирующих поверхностей и сетки КЭ деформируемой среды. При таких условиях применение сетки Лагранжа является более выгодным, так как на ее основе проще реализовать граничные условия для заготовки и инструмента (особенно на их контактных поверхностях), а также осуществлять процесс переноса данных по скоростям и усилиям между шагами моделирования.

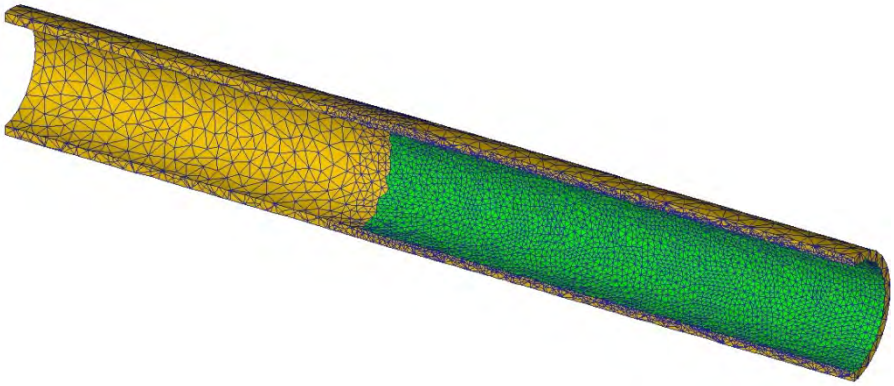
Для объемной постановки задачи при решении с помощью МКЭ используются различные типы КЭ, наиболее распространенными из которых за счет простоты вычислений и универсальности являются КЭ в виде прямоугольного параллелепипеда и тетраэдра (пространственного четырехугольника). Для предполагаемых условий моделирования, а также в виду особенностей реше-

ния задачи в конечно-элементной постановки используется разбиение области решения КЭ в виде тетраэдра.

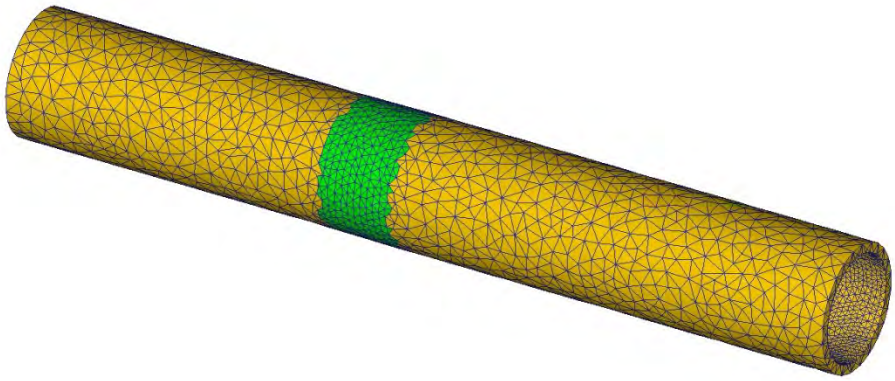
Постановка задачи при использовании МКЭ в ряде случаев подразумевает не однородное разбиение области решения КЭ, а сгущение сетки КЭ в отдельных районах для получения наиболее точных данных о формоизменении заготовки и энергосиловых параметрах процесса. Мероприятия по изменению плотности распределения КЭ в определенных районах области решения позволяют также более рационально использовать ресурсы расчетных станций и снизить вычислительные мощности, требуемые для решения пространственной задачи.

При моделировании процесса наружной высадки концов насосно-компрессорных труб операция сгущения сетки КЭ производится на внутренней поверхности части трубы нагреваемой до рабочей температуры с целью наблюдения за течением металла вдоль контактной поверхности с пуансоном. Еще одно поле со сгущенной сеткой формируется в зоне перехода от нагретого участка к основному телу трубы. Районы более плотного распредления КЭ заготовки показаны на рис. 2.3.

В задачах, в которых пуансон принимается как абсолютно упругое тело, требуется также проводить его разбиение на КЭ. Для того, чтобы получить более корректное описание рабочей части пуансона также выполняется сгущение боковой поверхности в области передней конической части и упорного пояска. Сетка КЭ со сгущением в передней части для пуансона представлена на рис. 2.4.



а



б

Рисунок 2.3 – Области сгущения сетки КЭ трубной заготовки
(*а* – на внутренней поверхности нагретого конца трубы; *б* – на участке между нагретым участком трубы под высадку и основным телом трубы)

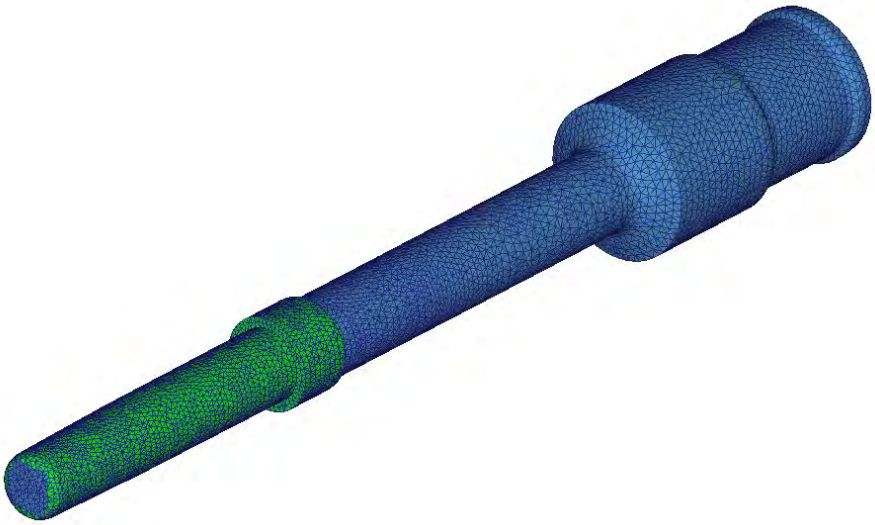


Рисунок 2.4 – Области сгущения сетки КЭ пуансона

В конечно-элементной формулировке решения задачи также обязательно должно быть указано условие, при котором будет проведена операция по адаптивному переразбиению сетки. Данная операция может производиться при нарушении пропорций КЭ и граничных условий задачи. В обоих случаях операция переразбиения реализуется путем создания новой отвечающей критериям расчета сетки КЭ и последующей интерполяцией данных от старой сетки КЭ на новую.

2.3 Теоретические основы решения тепловой и деформационной задачи наружной высадки концов труб

Поле скоростей точек в деформируемом металле при наружной высадке концов труб может быть описано выражением [67] в векторной форме вида

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

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

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

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

$$\mathbf{v}^{\mathrm{T}} = \{\vartheta_1, \vartheta_2, \dots, \vartheta_n\}$$

где Т – 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 [62, 67] может быть представлено в виде

$$\int_V \sigma_i \delta\dot{\varepsilon}_i dV - \int_{S_F} F_i \delta u_i dS = 0 \qquad (2.1)$$

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 [39]:

$$\tau = \psi\tau_s$$

где τ – касательное напряжение;

τ_s – предел текучести материала при сдвиге;

ψ – показатель трения.

Сопротивление деформации металла в случае горячей обработки металла [56] 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 (2.1) в конечно-элементной постановке [67] имеет вид

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

где $\mathbf{K}$ – матрица жесткости элемента;

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

Компоненты матрицы жесткости находятся из уравнения [67]:

$$\mathbf{K} = \mathbf{B}^{\mathrm{T}}\mathbf{DB}V_e$$

где V_e – объем элемента;

$\mathbf{D}$ – матрица свойств материала;

$\mathbf{B}$ – матрица, определяемая согласно выражению

$$\mathbf{B} = \mathbf{SN}$$

где **S** – матрица дифференцирования;

N – функции формы КЭ, выраженные в матричной форме.

Для КЭ в виде тетраэдра [67]:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{\partial q_i}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial q_i}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial q_i}{\partial z} \\ \frac{\partial q_i}{\partial y} & \frac{\partial q_i}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial q_i}{\partial z} & \frac{\partial q_i}{\partial y} \\ \frac{\partial q_i}{\partial z} & 0 & \frac{\partial q_i}{\partial x} \end{bmatrix} \tag{2.2}$$

Матрица свойств материала **D** для материалов с изотропными свойствами при рассмотрении упругой деформации (матрица упругих модулей) [66] принимает вид

$$\mathbf{D} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} (1-\nu) & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & (1-\nu) & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & (1-\nu) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix}$$

где E – модуль упругости материала КЭ;

ν – коэффициент Пуансона.

Для случая пластической деформации рассматриваемого объема:

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3}G' & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2}{3}G' & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2}{3}G' & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{3}G' & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{3}G' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{3}G' \end{bmatrix}$$

где G' – касательный модуль кривой упрочнения.

Усилия, действующие на КЭ, находятся по формуле [67]:

$$\mathbf{f} = \mathbf{B}^{\mathrm{T}}\mathbf{D}\varepsilon V_e$$

где ε – величина степени деформации.

Уравнение (2.2) может быть решено с помощью метода итераций Ньютона-Рафсона [65, 68]. Суть метода состоит в том, что $(n+1)$-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.

Метод Ньютона-Рафсона обеспечивает хорошую сходимость решения при малом числе итераций. В отдельных случаях, когда трудно обеспечить сходимость решения, применяют метод простой итерации (метод последовательных приближений), суть которого состоит в приведении уравнения вида $F(x) = 0$ к эквивалентному уравнению $x = F(x)$. При этом поиск решения на каждом шаге расчета осуществляют согласно выражению $x_{n+1} = F(x_n)$. Процесс нахождения решения считается завершенным если

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

Поле температур в деформируемом металле при наружной высадке концов труб может быть описано выражением в векторной форме [67] вида

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

где $\mathbf{T}_{\alpha}$ – вектор узловых значений температур;

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

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

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

Основное уравнение для решения тепловой задачи при обработке металлов давлением методом конечных элементов в вариационной постановке [62, 67] может быть записано в виде

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

$$- \int_S k_1 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) \delta T dS = 0 \qquad (2.3)$$

где k_1 – коэффициент теплопередачи;

ρ – плотность материала;

c – теплоемкость материала;

σ_i – интенсивность напряжений;

$\dot{\varepsilon}_i$ – интенсивность скоростей деформаций;

k – доля работы пластической деформации переходящая в тепло;

T – температура в точках рассматриваемой области;

δT – вариация температуры в точках рассматриваемой области;

V – объем рассматриваемой области;

S – поверхность рассматриваемой области;

t – время.

В случае решения тепловой задачи по нагреву и охлаждению рассматриваемой области без деформации объема последнее слагаемое уравнения (2.3) отсутствует.

Матричная запись выражения (2.3) в конечно-элементной постановке [67] имеет вид

$$\mathbf{C}\dot{\mathbf{T}}+\mathbf{K_C}\mathbf{T} = \mathbf{Q}$$

где $\mathbf{C}$ – матрица теплоемкости;

$\mathbf{K_C}$ – матрица теплопередачи;

$\mathbf{Q}$ – вектор тепловых нагрузок в узлах конечного элемента.

Компоненты матриц теплоемкости $\mathbf{C}$ и теплопередачи $\mathbf{K_C}$ находятся по выражениям [67]

$$\mathbf{C} = \boldsymbol{\rho}\mathbf{c}\mathbf{N}\mathbf{N}^{\mathrm{T}}$$

$$\mathbf{K_c} = \mathbf{k_1}\mathbf{M}\mathbf{M}^{\mathrm{T}}$$

где $\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \frac{dq_1}{dx} & \frac{dq_1}{dy} & \frac{dq_1}{dz} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \frac{dq_n}{dx} & \frac{dq_n}{dy} & \frac{dq_n}{dz} \end{bmatrix}$

Вектор тепловых нагрузок, действующих на конечный элемент [67]:

$$\mathbf{Q} = k\sigma_i\dot{\varepsilon}_i N V_{\mathrm{e}} + q_t N S_{\mathrm{e}}$$

где q_t – величина теплового потока через поверхность КЭ;

S_e – поверхность КЭ.

Уравнение тепловой задачи может решаться методом Ньютона-Рафсона или методом секущих (модификация метода Ньютона) [67, 68]. Согласно методу секущих $(n+1)$-ое приближение определяется по формуле

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

Процесс нахождения решения считается завершенным если

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

ВЫВОДЫ

1. Среди известных методов решения задач обработки металлов давлением для описания процесса наружной высадки концов труб наиболее подходящим является метод конечных элементов, позволяющий определять энергосиловые параметры процесса, формоизменение заготовки при деформации, температурные поля и т.п.

2. При составлении расчетной схемы процесса наружной высадки концов труб физико-механические свойства материала инструмента и заготовки возможно учесть путем рассмотрения составной матрицы и пуансона как абсолютно жестких или упругих тел, а заготовки – как идеально пластичного тела со степенным законом упрочнения.

3. При решении тепловой и деформационной задач наружной высадки концов труб удобно использовать 4-х узловые конечные элементы в виде тетраэдров, позволяющих достаточно точно описать рассматриваемые объемы при дискретизации и сократить время вычислительных операций.

4. Применение переразбиения пространства конечных элементов при проведении решения с применением окон плотности позволяет повысить корректность описания и точность проводимых решений.

5. Решения тепловой и деформационной задачи наружной высадки концов труб могут быть проведены с применением вариационных принципов путем составления основного уравнения и нахождения данных с использованием итерационных методов.

ГЛАВА 3. ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА НАРУЖНОЙ ВЫСАДКИ КОНЦОВ ТРУБ

Проведение параметрического анализа созданной математической модели позволяет получить зависимости для энергосиловых параметров процесса высадки, необходимые для совершенствования технологии, разработки инструмента, снижения энергетических затрат. В качестве примера для рассмотрения выбран ряд типоразмеров высаживаемых труб. Рассмотрены стандартная и удлиненная высадка концов труб из марок сталей 15Х5МФБ, 18Х3МФБ и 18ХМФБ.

3.1 Реализация алгоритма решения задачи наружной высадки концов НКТ в программном комплексе DEFORM

Программный комплекс DEFORM является универсальным и многофункциональным инструментом для осуществления моделирования процесса наружной высадки концов труб с целью определения окончательного формоизменения конца трубы и напряженно-деформированного состояния в очаге деформации [74].

За реализацию модели в программном комплексе конечно-элементного моделирования DEFORM отвечают три подпрограммных модуля PreProcessor (постановка задачи), Simulator (решение системы уравнений) и PostProcessor (отображение полученных расчетных данных) [74].

Для решения тепловой задачи нагрева заготовки на указанную длину в индукторе и затем охлаждения заготовки в момент передачи от индуктора на ось высадочного пресса проводятся два этапа решения, последовательно связанные между собой таким образом, что результаты первого этапа тепловой задачи передаются в качестве исходных данных для решения на втором этапе [76].

Первоначально в подпрограммном модуле PreProcessor создается объект «Заготовка», геометрия для которого импортируется из сторонней програм-

мы САПР. Геометрия заготовки соответствует высаживаемому типоразмеру труб по ГОСТ или API.

По технологической инструкции нагрев, осуществляемый на установке индукционного нагрева «ELOTHERM», производится в двух индукторах 1 и 2 предварительного нагрева и индукторе 3 окончательного нагрева. Размеры индукторов приведены в табл. 3.1, а их электротехнические характеристики в табл. 3.2.

Таблица 3.1 – Размеры индукторов

Тип индуктора	Маркировка	Размеры, мм		Размеры труб $D \times S$, мм	Количество индукторов, шт.	
		диаметр, D	длина, L		1 контур	2 контур
ETH 1000 402.2489	88,9	135	1000	60,3×4,8 – 88,9×11,4	2	1
ETH 1000 402.2489	127,0	180	1000	101,6×6,5 – 127,0×12,7	2	1

Таблица 3.2 – Электротехнические характеристики

Характеристики	Общий преобразователь, индукторы 1-2	Преобразователь, индуктор 3
Номинальная мощность	800кВА	600кВА
Номинальная частота	2кГц	2кГц
Номинальное напряжение	1000В	1000В
Входное напряжение	765В	765В

При постановке тепловой задачи нагрев моделируется в одну стадию. Заготовке присваиваются упругие свойства материала, которые позволяют учитывать термическое расширение материала [74].

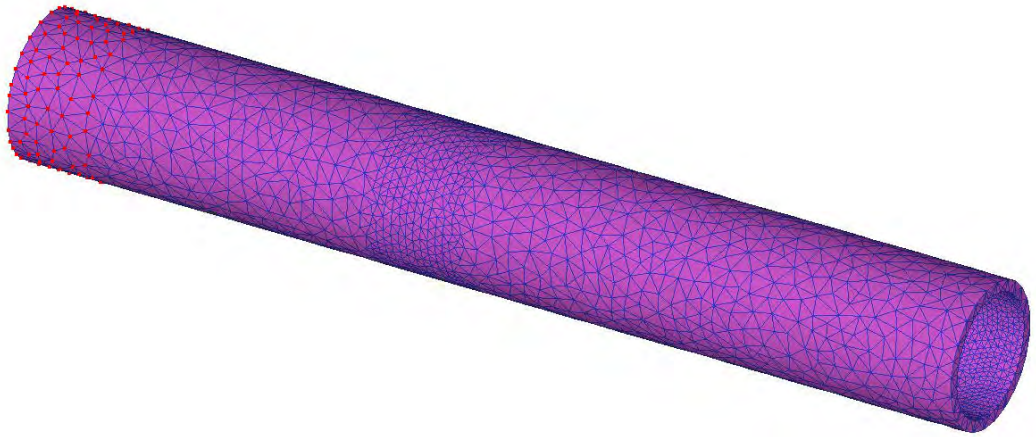
В дальнейшем геометрия заготовки разбивается на КЭ в виде тетраэдров с учетом областей сгущения, описанных в разделе 2.2 настоящей работы. Критичный в данном случае является соблюдение условия точности описания геометрии трубы при минимальном количестве КЭ, необходимых корректного расчета. Для выполнения данного условия принято, что при минимальном количестве элементов вдоль продольного сечения стенки трубы

должно помещаться не менее двух КЭ. Кроме этого при построении сетки КЭ устанавливается безразмерный параметр, отвечающий за механизм переразбиения сетки. Он выражается величиной, на которую может совершаться перекрытие сетки КЭ с другими объектами расчетной схемы относительно размера КЭ. Примеры сформированных сеток КЭ для заготовок некоторых типоразмеров труб приведены в табл. 3.3.

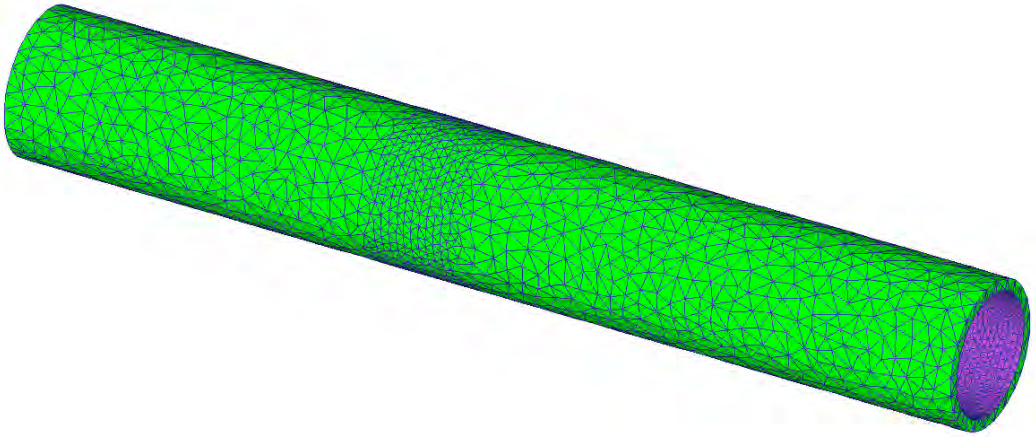
Таблица 3.3 – Примеры сформированных сеток КЭ для заготовок некоторых типоразмеров труб

№	Типоразмер	Вид высадки	Среднее количество КЭ	Средний размер КЭ, мм	
				на внутренней поверхности трубы	между нагретой и холодной частями
1.	60,32x4,83	стандартная	127 000	2,5	3,5
2.		удлиненная	120 000	2,5	3,5
3.	73,02x5,51	стандартная	82 000	3	5
4.		удлиненная	86 000	3	5
5.	73,0x7,0	стандартная	121 000	2,5	3,5
6.		удлиненная	154 000	2,5	3,5
7.	88,90x6,45	стандартная	110 000	3	4,5
8.		удлиненная	203 000	2,5	4,5

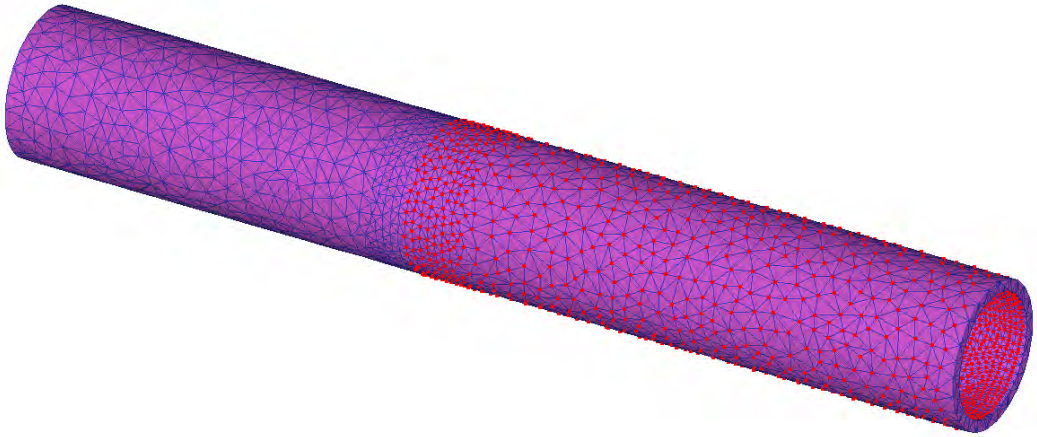
В дальнейшем назначаются граничные условия решения тепловой задачи (рис. 3.1): заготовка закрепляется в пространстве, выбираются поверхности теплообмена заготовки с окружающей средой, назначаются узлы поверхности заготовки, которые на заданной длине будут воспринимать и путем теплообмена внутри заготовки передавать индукционный нагрев.



а



б



в

Рисунок 3.1 – Назначение граничных условия заготовке при решении тепловой задачи (*а* – выбор узлов для закрепления заготовки в пространстве; *б* – выбор поверхностей теплообмена с окружающей средой; *в* – выбор узлов для сообщения температуры нагрева заготовке)

Аналогично моделируется процесс охлаждения с той разницей, что результаты решения предыдущей задачи нагрева являются начальными условиями для задачи охлаждения, а узлы поверхности, но которых осуществляется нагрев, освобождаются от этой временной зависимости. Таким образом, заготовка может осуществлять только отдачу тепла в окружающую среду. Последним этапом работы в модуле PreProcessor является обобщение условий задачи, геометрической схемы, начальных и граничных условий в единую базу данных, которая в дальнейшем передается для расчета в модуль Simulator.

На рис. 3.2 показан процесс решения тепловой задачи средствами программного модуля Simulator.

```
STEP NUMBER      =    337

CONVENTIONAL NEWTON RAPHSON METHOD

ITERATION    VELOCITY     RELATIVE VELOCITY   RELATIVE FORCE    SOLVING TIME
 NUMBER       NORM         ERROR NORM          ERROR NORM        (SEC)

  1   0.2637965480E+01   0.2453768081E-02   0.1592279048E+00        1.638
  2   0.2631533086E+01   0.5744119852E-04   0.1532886167E-01        1.638
Info: Preparing eq. indices in  4  sections

TEMPERATURE CALCULATION FOR STEP :   337

TEMPERATURE ITERATION

ITERATION    TEMPERATURE    RELATIVE TEMPERATURE
 NUMBER       NORM           ERROR NORM

  1   0.1169724658E+03   0.3104103760E-02

OLD AVE. STRAIN RATE=        0.996995
OLD LIMITING STR. R.=        0.009970
NEW AVE. STRAIN RATE=        0.996995
NEW LIMITING STR. R.=        0.009970

UPDATED TIME     =     33.700000
TIME INCREMENT   =      0.100000
```

Рисунок 3.2 – Отображение процесса решения тепловой задачи в программном пакете

Как видно, на начальном этапе расчета шага моделирования применяется метод итераций Ньютона-Рафсона, с помощью которого вычисляется ис-

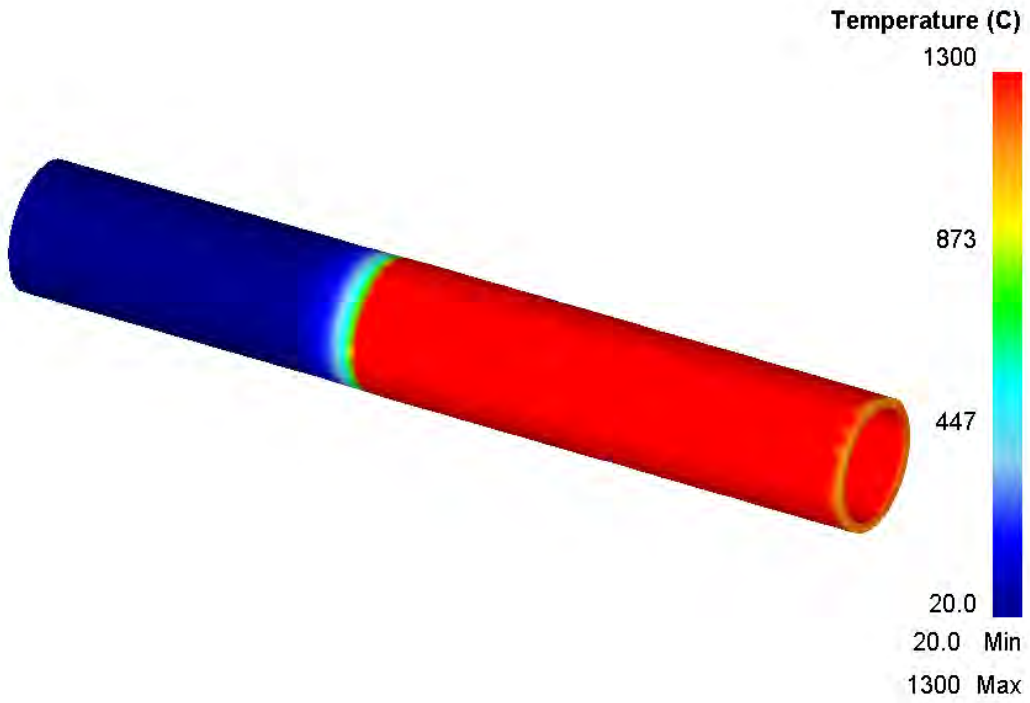
ходная величина скорости для данного шага расчета, а затем происходит вычисление погрешности по приращению скорости и усилия, а также регистрируется время каждой итерации. После чего программный модуль переходит к вычислению температуры для шага расчета и погрешности приращения температуры за рассматриваемый шаг. Если погрешность превышает допустимое значение, то решение повторяется на новом шаге до получения требуемой сходимости. Результаты расчета дополняют сгенерированную базу данных с учетом установленной периодичности сохранения. Максимальное количество итераций за шаг расчета равно 200 [74].

Пример распределения температурных полей, полученных в результате решения тепловых задач нагрева и охлаждения заготовки перед наружной высадкой конца НКТ приведен на рис. 3.3

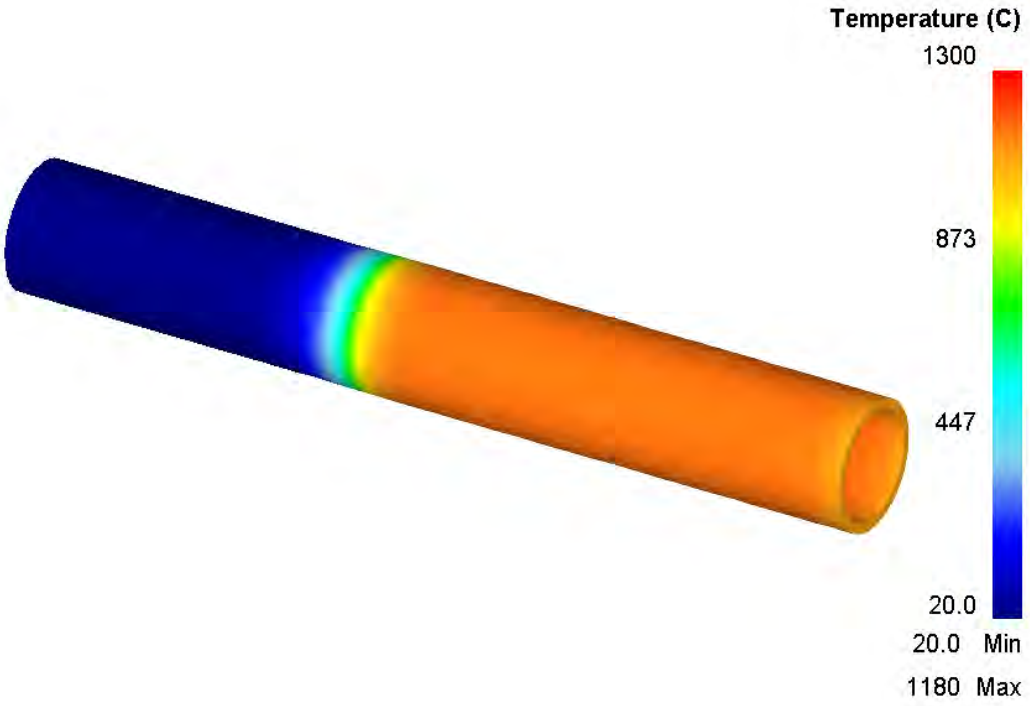
Результаты решения обеих тепловых задач для заготовки используются при решении деформационной задачи [77].

В случае, когда рассматривается абсолютно упругая модель пуансона на основе его твердотельной геометрии создается КЭ сетка согласно допущениям, принятым в Главе 2. Объекты, воспроизводящие инструмент, позиционируются относительно заготовки. В случае пуансона он устанавливается относительно заготовки так, чтобы воссоздать первоначальный контакт торца трубы с конической рабочей поверхностью пуансона (рис. 3.4).

Позиционирование матрицы производится по расстоянию от торца калибра до торца нагретого конца трубы с точки зрения попадания в калибр достаточного объема металла для обеспечения требуемой длины высаживаемого конца. Полуматрицы закрепляются в пространстве и неподвижны. Пуансон перемещается с установленной постоянной скоростью. В упругой постановке задачи для пуансона должны быть выбраны узлы поверхности, к которым приложена выбранная скорость перемещения (рис. 3.5)



а



б

Рисунок 3.3 – Распределение температурных полей, полученных в программном пакете, при температуре нагрева 1300°

(*а* – после выхода из индуктора; *б* – при подаче на ось высадочного пресса)

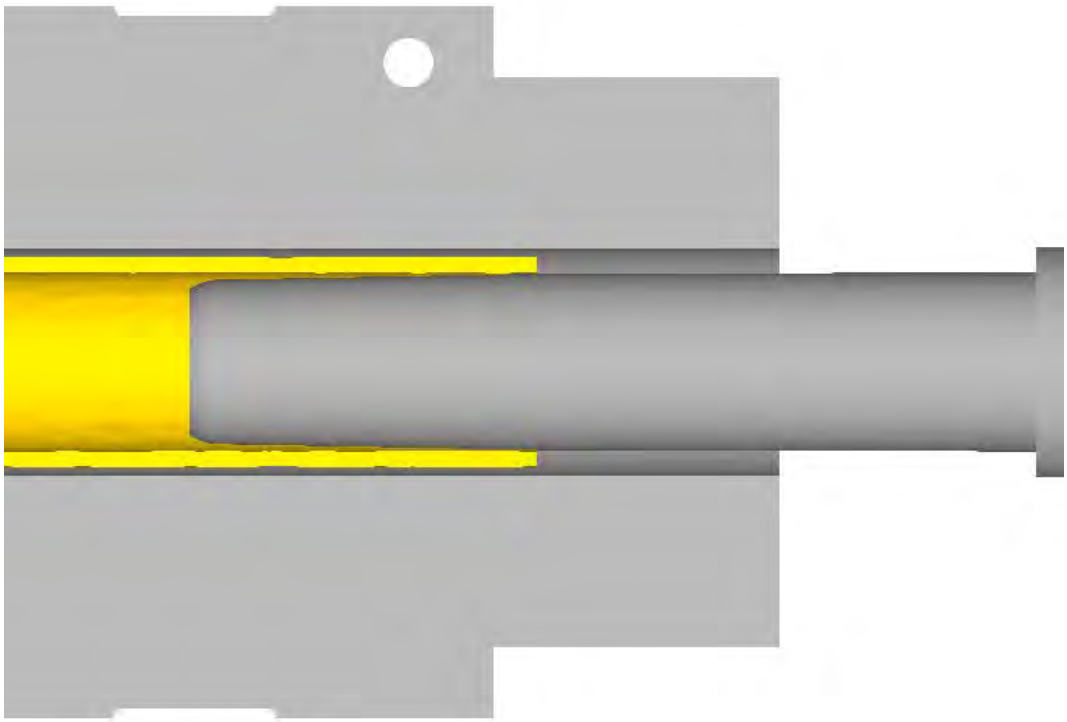


Рисунок 3.4 – Позиционирование высадочного инструмента относительно заготовки

Рисунок 3.5 – Назначение узлов, отвечающих за передачу скорости пуансону при упругой постановке модели пуансона

При решении деформационной задачи заготовка рассматривается как идеально пластичное тело со степенным законом упрочнения. Тем не менее, сетка КЭ с начальными и граничными условиями, полученными в результате решения тепловой задачи в упругой постановке, переноситься без изменений.

Помимо этого для заготовки должны быть заданы граничные условия по деформационному и тепловому контакту между заготовкой и инструментом. Для этого в модуле формируются пары «пуансон – заготовка», «правая полуматрица – заготовка», «левая полуматрица – заготовка», в каждом из которых заготовка определяется как подчиненный объект, а инструмент – главным. Необходимо задать критерий, по которому будет происходить разделение объектов, вступивших в контакт. Во всех случаях генерируются контакты разделяемых объектов.

Механический контакт между инструментом и заготовкой определяется по модели Зибеля [39] путем задания показателя трения, а теплопередача между контактирующими объектами – путем задания коэффициента теплопередачи. Существуют рекомендованные значения для коэффициента теплопередачи в зависимости от того ведет ли взаимодействие к деформации или играет вспомогательную роль в расчетной схеме. В данном случае все созданные контакты являются деформационными. Отображение созданных контактов в программном модуле показано на рис. 3.6.

Далее устанавливаются параметры моделирования для решения задачи, которые включают промежуток между шагами моделирования, общее число шагов моделирования, а также периодичность сохранения шагов расчета. Наиболее рациональным промежутком между шагами моделирования является такой, при котором пуансон за шаг проходит не более 1/3 от минимального размера КЭ (приблизительно 0,5-1 мм). Также устанавливается параметр по корректированию (уменьшению) интервала между шага расчета в случае отсутствия сходимости задачи. Параметры решателя осуществляется аналогично тепловой задаче.

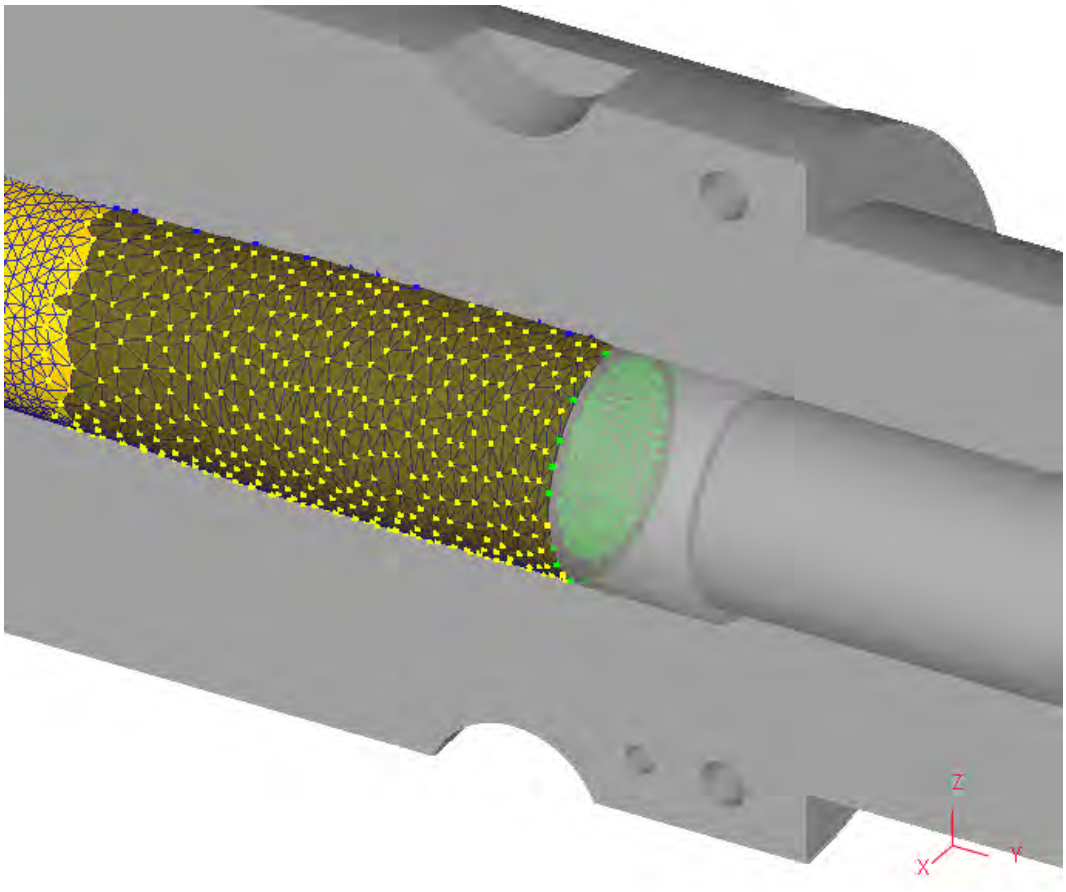


Рисунок 3.6 – Отображение контактов между заготовкой
и высадочным инструментом на финальных стадиях высадки

На рис. 3.7 показан процесс решения задачи в программном модуле Simulator. Отличием от аналогичного процесса решения при моделировании тепловой задачи является время, затрачиваемое на определение параметров полей скоростей и усилий сетки КЭ. При этом для определения исходной точки поля скоростей для обеспечения сходимости решения используется метод простой итерации. Вычисления этим способом осуществляются в течение первых итераций, после чего решение продолжается методом итераций Ньютона-Рафсона.

DIRECT METHOD

ITERATION NUMBER	VELOCITY NORM	RELATIVE VELOCITY ERROR NORM	RELATIVE FORCE ERROR NORM	SOLVING TIME (SEC)
1	0.8920090096E+04	0.5959934283E+00	0.4474760224E-01	2.698
2	0.8801626227E+04	0.1292764030E+00	0.1584368313E+00	2.699
3	0.8090511215E+04	0.1097043322E+00	0.4901855475E-01	2.714
4	0.7467002415E+04	0.1070823885E+00	0.4821608786E-01	2.699
5	0.6938412205E+04	0.9950342127E-01	0.4281297340E-01	2.699

CONVENTIONAL NEWTON RAPHSON METHOD

ITERATION NUMBER	VELOCITY NORM	RELATIVE VELOCITY ERROR NORM	RELATIVE FORCE ERROR NORM	SOLVING TIME (SEC)
1	0.6528450758E+04	0.7284319296E+00	0.3977577407E-01	2.699
2	0.5981450024E+04	0.5625114665E+00	0.3161671240E-01	2.683
3	0.5735456869E+04	0.2835247474E+00	0.2873479529E-01	2.684
4	0.5545398153E+04	0.1449648120E+00	0.2578001252E-01	2.683
5	0.5498097747E+04	0.9723456184E-01	0.1350101859E-01	2.714
6	0.5496662237E+04	0.3071308191E-01	0.4466514558E-02	2.715
7	0.5513195199E+04	0.1063286743E-01	0.2922039661E-02	2.715
8	0.5516245725E+04	0.3042645478E-02	0.6485982462E-03	2.730

Рисунок 3.7 – Отображение процесса решения деформационной задачи в программном пакете

На рис. 3.8-3.10 представлены некоторые результаты, которые были получены путем решения задачи высадки концов НКТ с помощью программного пакета конечно-элементного моделирования. С его помощью могут быть определены данные по распределению скоростей, деформаций, напряжений и температур в узлах сетки КЭ, изменению во времени усилий по координатным осям для инструмента и т.д., которые выводятся путем передачи решенной базы данных в программный модуль PostProcessor [78].

В программном модуле PostProcessor имеется также возможность наблюдать за течением металла при пластической деформации, регистрировать изменение параметров его напряженно-деформированного состояния и энергосиловых параметры в процессе нагрева и деформации. Данные могут быть отображены графически в виде объемных эпюр распределения величин по узлам КЭ и гистограмм, показывающих количественное распределение узлов КЭ по выбранным величинам. Программный модуль обладает возможностью построения графиков изменения параметров процесса во времени, извлечения массивов данных по параметрам в отдельных узлах сетки КЭ, отслеживания параметров в КЭ рабочей области решения.

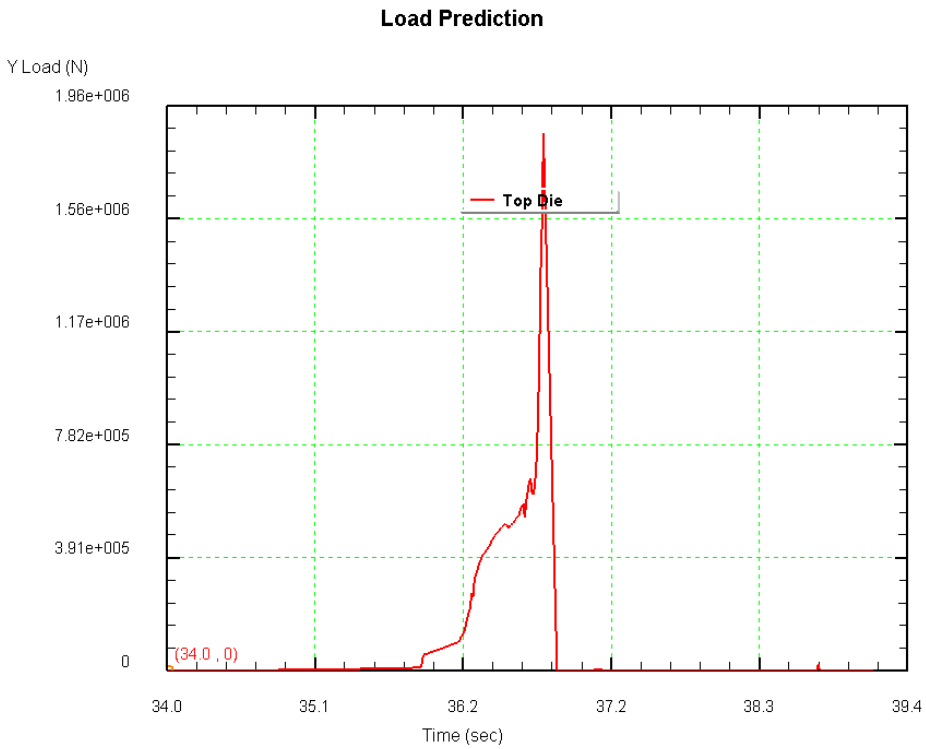


Рисунок 3.8 – График изменения усилия во время наружной высадки концов НКТВ в программном пакете

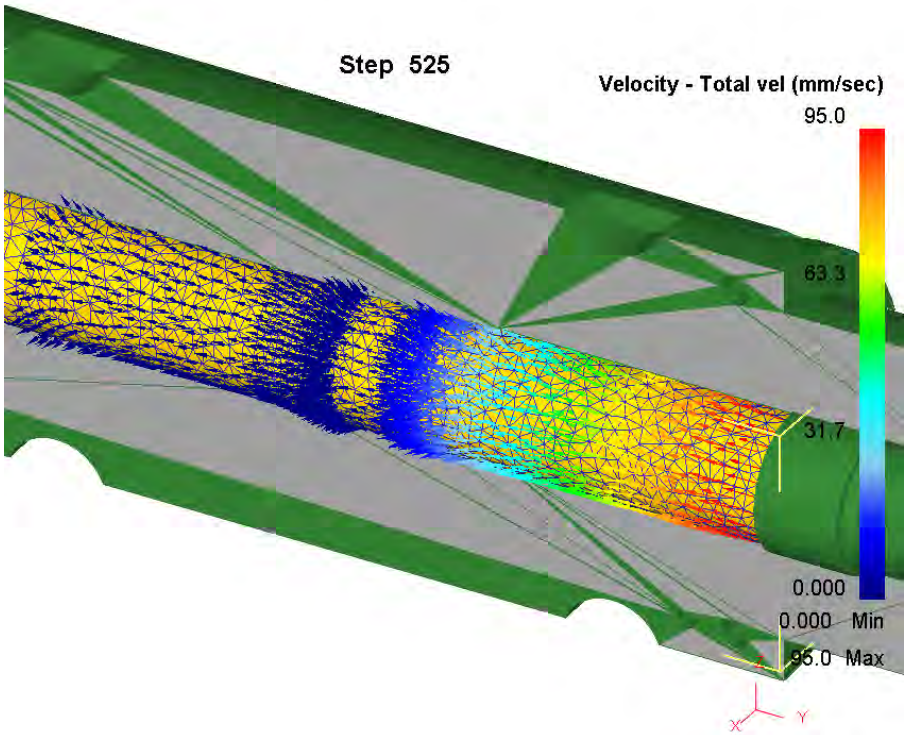


Рисунок 3.9 – Векторное поле скоростей на произвольном шаге расчета процесса наружной высадки концов НКТВ в программном пакете

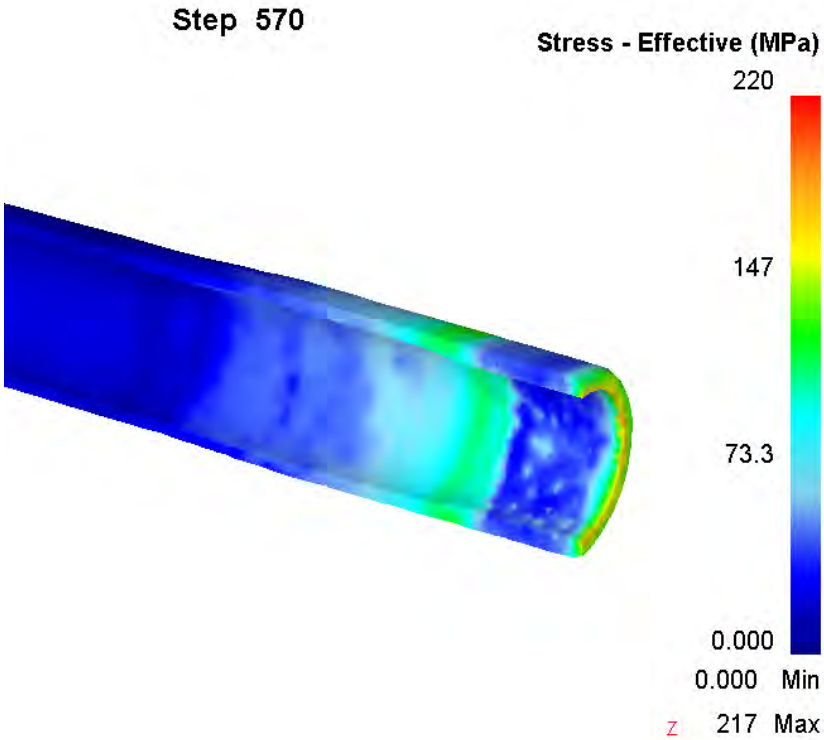


Рисунок 3.10 – Распределение эквивалентных напряжений в заготовке на произвольном шаге расчета процесса наружной высадки концов НКТВ в программном пакете

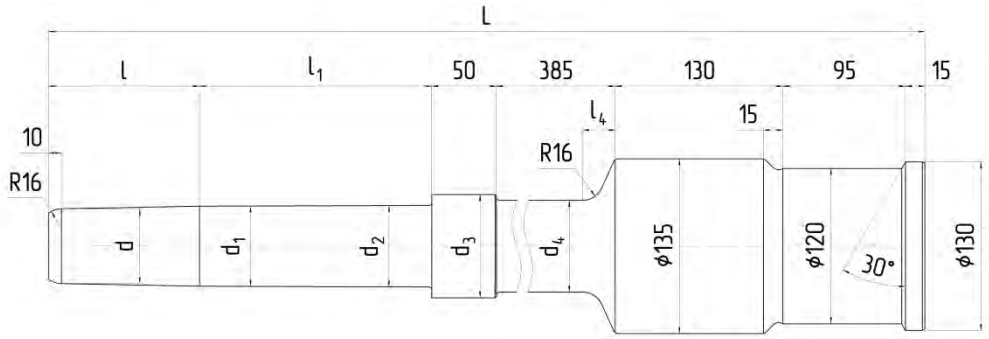
3.2 Исходные данные для анализа

Целью параметрического анализа являлось определение зависимостей для энергосиловых параметров стандартной и удлиненной наружной высадки концов труб при симметрии и асимметрии поперечного сечения заготовки от различных параметров.

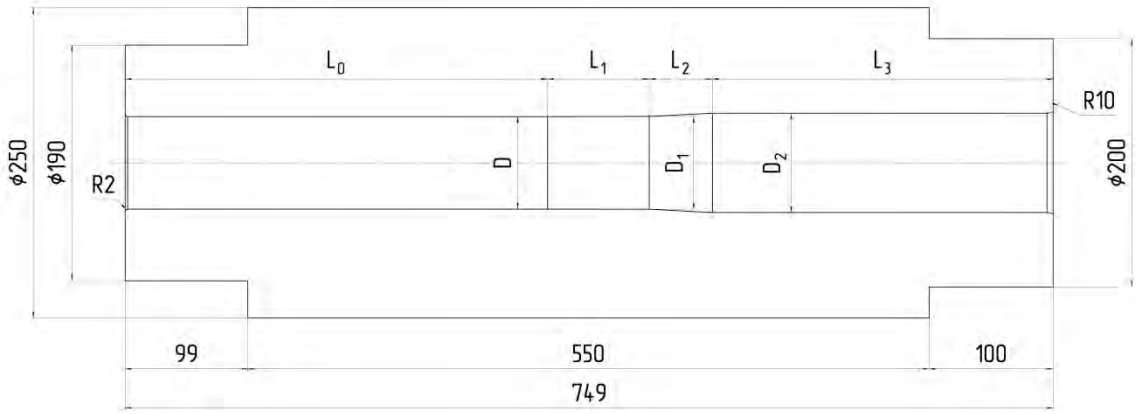
Параметрический анализ проводился на примере типоразмеров труб, представленных в табл. 3.4. Геометрия инструмента при проведении исследования представлена соответственно на рис. 3.11 и табл. 3.5, 3.6.

Таблица 3.4 – Геометрические размеры труб с высаженными наружу концами

Диаметр трубы, мм	Толщина стенки, мм	Наружный диаметр высаженной части, мм	Допуск на наружный диаметр высаженной части, мм	Длина высаженной части при стандартной высадке, мм	Допуск на длину высаженной части при стандартной высадке, мм	Длина высаженной части при удлиненной высадке, мм	Допуск на длину высаженной части при удлиненной высадке, мм
60,32	4,83	65,89	$^{+1,59}_{0}$	101,6	$^{+101,60}_{-25,4}$	203,2	$^{+25,4}_{0}$
73,02	5,51	78,59		107,95		209,55	
73,0	7,0	78,60		95,0		196,6	
88,90	6,45	95,25		114,3		215,9	



а



б

Рисунок 3.11 – Схема высадочного инструмента

(*а* – пуансона; *б* – матрицы)

Таблица 3.5 – Размеры высадочного пуансона

№	Типоразмер	Вид высадки	d, мм	d_1, мм	d_2, мм	d_3, мм	d_4, мм	l_0, мм	l_1, мм	l_2, мм	L, мм
1.	60,32x4,83	станд.	45,65	50,25	51,3	66,7	60	120	178	25	983
2.		удлин.							338		
3.	73,02x5,51	станд.	57,7	61,8	62,9	79,8	71	107	180	25	972
4.		удлин.							280/340/400		
5.	73,0x7,0	станд.	56	58,8	60,1	79,8	71	73	160	25	918
6.		удлин.							320		
7.	88,90x6,45	станд.	72,6	75,8	76,9	96,6	90	83,3	190,7	20	959
8.		удлин.							350,7		

Таблица 3.6 – Размеры высадочной матрицы

№	Типоразмер	Вид высадки	D, мм	D_1, мм	D_2, мм	l, мм	l_1, мм	l_2, мм	l_3, мм
1.	60,32x4,83	станд.	61,6	62,1	66,9	308	85	51	305
2.		удлин.				208			405
3.	73,02x5,51	станд.	74,5	74,8	80	341	82	51	275
4.		удлин.				321			375
5.	73,0x7,0	станд.	74,5	74,8	80	393,7	82	25,3	248
6.		удлин.				293,7			348
7.	88,90x6,45	станд.	90,3	91,1	96,8	308,5	89,5	51	300
8.		удлин.				208,5			400

В качестве переменных параметров при исследовании принимались:

- толщина стенки трубы $h = 4{,}83 \ldots 7{,}00$ мм;
- марка стали: 15Х5МФБ, 18Х3МФБ и 18ХМФБ;
- показатель трения заготовки с матрицей и пуансоном по Зибелю $\psi = 0{,}1 \ldots 1{,}0$;
- температура заготовки (после выхода из третьего индуктора): $T = 1100 \ldots 1300$ °С;
- конусность пуансона: 1:100; 1:200; 1:250; 1:310 и 1:360;
- длина нагреваемой части трубы: $l = 240 \ldots 505$ мм.
- скорость перемещения пуансона: $\vartheta = 30 \ldots 500$ мм/с;
- поперечная разнотолщинность заготовки $\Delta h = 0 \ldots 1{,}2$ мм (рис.3.12);
- величина отклонения оси инструмента от оси заготовки: $\delta = 0 \ldots 0{,}5$ мм (рис. 3.13).

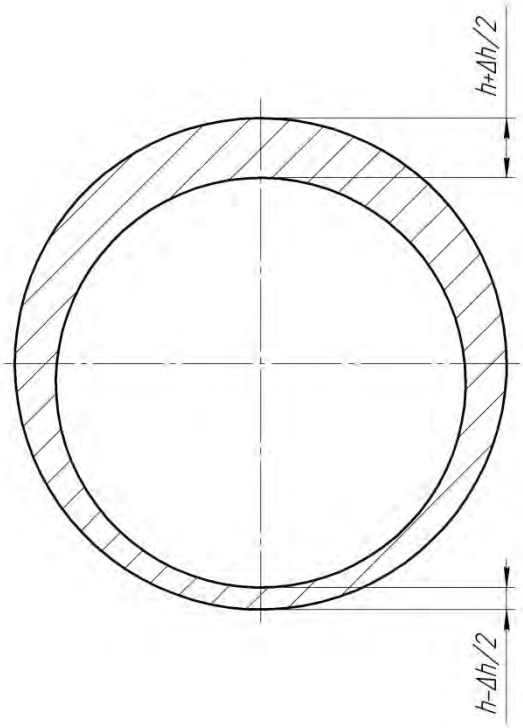


Рисунок 3.12 – Поперечное сечение трубы с заданной разнотолщинностью

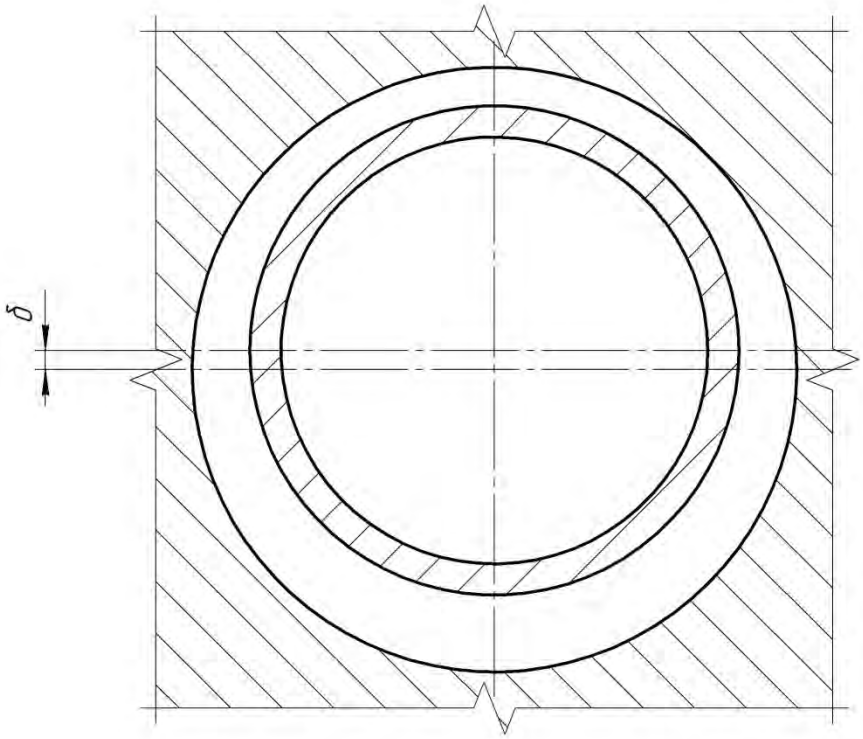


Рисунок 3.13 – Отклонение оси заготовки от оси инструмента

Поперечная разнотолщинность заготовки оценивалась абсолютной величиной Δh (в мм) и характеризовала разницу между наибольшим и наименьшим значением толщины стенки в сечении трубной заготовки (рис. 3.12).

Величина отклонения оси пуансона от оси заготовки в диапазоне $\delta = 0 \ldots 0{,}5$ мм принималась при исследовании симметричного сечения заготовки (рис. 3.13).

3.3 Параметрический анализ процесса стандартной наружной высадки концов труб

3.3.1 Анализ влияния температуры

При моделировании процесса стандартной наружной высадки концов труб была поставлена задача по определению рациональной длины зоны нагрева заготовки. Исследовался процесс высадки концов НКТ из стали марки 15Х5МФБ, типоразмеров 60,32х4,83 мм, 73,02х5,51 мм, 73,0х7,0 мм, 88,90х6,45 мм, при температуре нагрева $T = 1300$ °С. При этом длина зоны нагрева от торца трубы варьировалась в пределах $l = 240 \ldots 345$ мм в зависимости от типоразмера трубы [79].

В табл. 3.7 приведены значения усилий прямого хода, действующих на пуансон высадочного пресса при стандартной высадке. Как видно из полученных данных, происходит снижение усилий, действующих на пуансон, матрицу и зажим пресса высадки при увеличении длины зоны нагрева до определенной величины. При последующем увеличении длины зоны нагрева наблюдается увеличение усилия высадки. Поэтому существуют рациональные величины длины зоны нагрева заготовки под высадку (указаны в табл. 3.7 курсивом), которые можно рекомендовать к внедрению на практике.

Граница зоны нагрева заготовки при этом находится на расстоянии 36…55 мм от границы конического участка матрицы при установке трубы в пресс под высадку.

Таблица 3.7 – Энергосиловые параметры процесса высадки концов НКТ при различных значениях длины зоны нагрева трубы при стандартной высадке

Типоразмер	Длина зоны нагрева трубы *l*, мм	Усилие прямого хода, кН
60,32x4,83	240	2240
	290	*1530*
	340	1738
73,02x5,51	245	2720
	295	1750
	345	1925
73,0x7,0	175	1770
	225	*1400*
	275	1280
88,90x6,45	245	4060
	295	*2150*
	345	2310

В результате численной реализации созданной математической модели при значениях показателя трения на матрице $\psi_{матр} = 0{,}5$ и пуансоне $\psi_{пуан} = 0{,}5$ (принимается на основании исследований, проведенных в работах [39, 43] и рекомендаций, приведенных в программном комплексе DEFORM по значению показателя трения) получены зависимости усилия высадки в зависимости от марки стали, температуры нагрева и толщины стенки заготовки, при отсутствии разнотолщинности стенки трубы для типоразмера 73,02x5,51 мм, представленные на рис.3.14-3.16

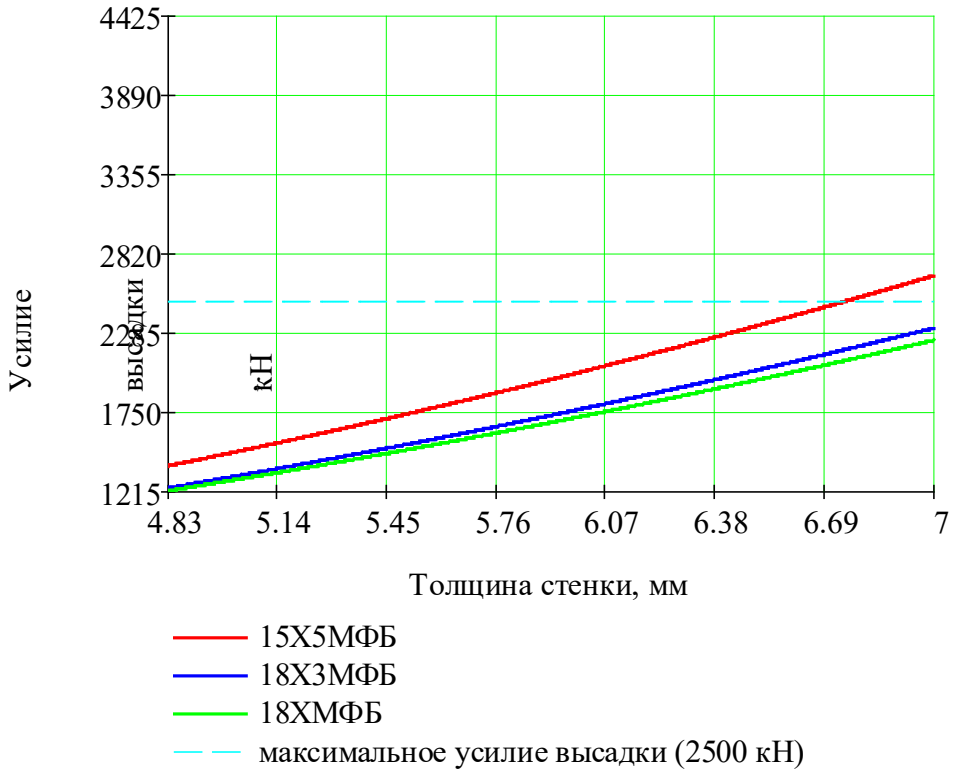


Рисунок 3.14 – Зависимость усилия высадки от толщины стенки для различных материалов НКТ
(T = 1300 °C; $\psi_{пуан} = \psi_{матр}$ = 0,5; Δh = 0 мм; ϑ = 95 мм/с)

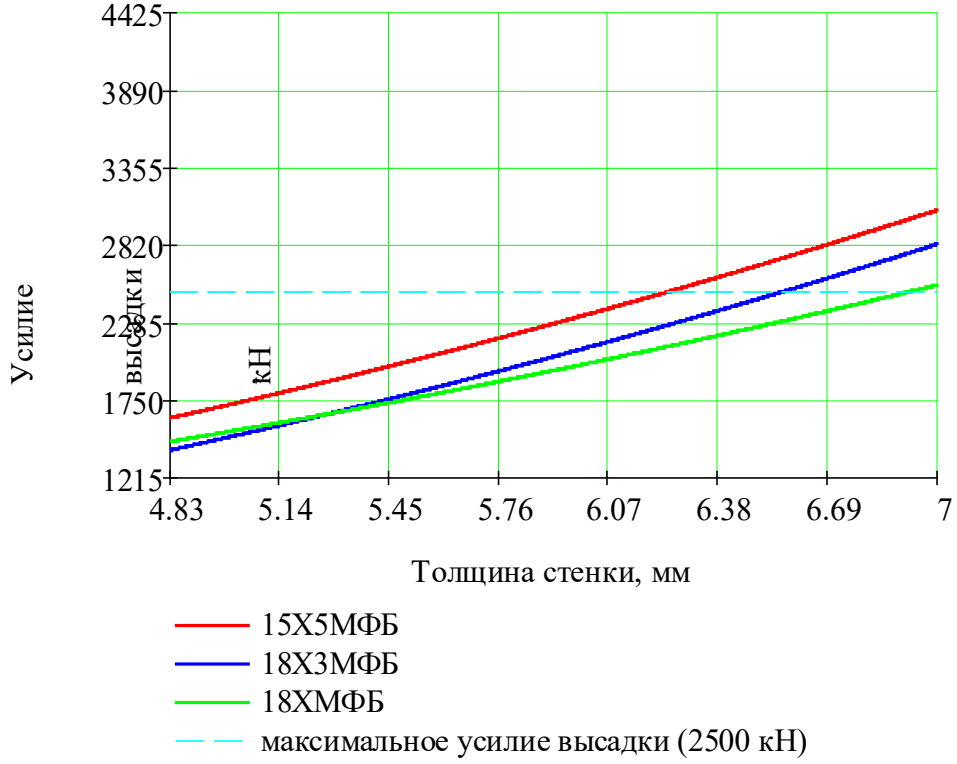


Рисунок 3.15 – Зависимость усилия высадки от толщины стенки для различных материалов НКТ
(T = 1200 °C; $\psi_{пуан} = \psi_{матр}$ = 0,5; Δh = 0 мм; ϑ = 95 мм/с)

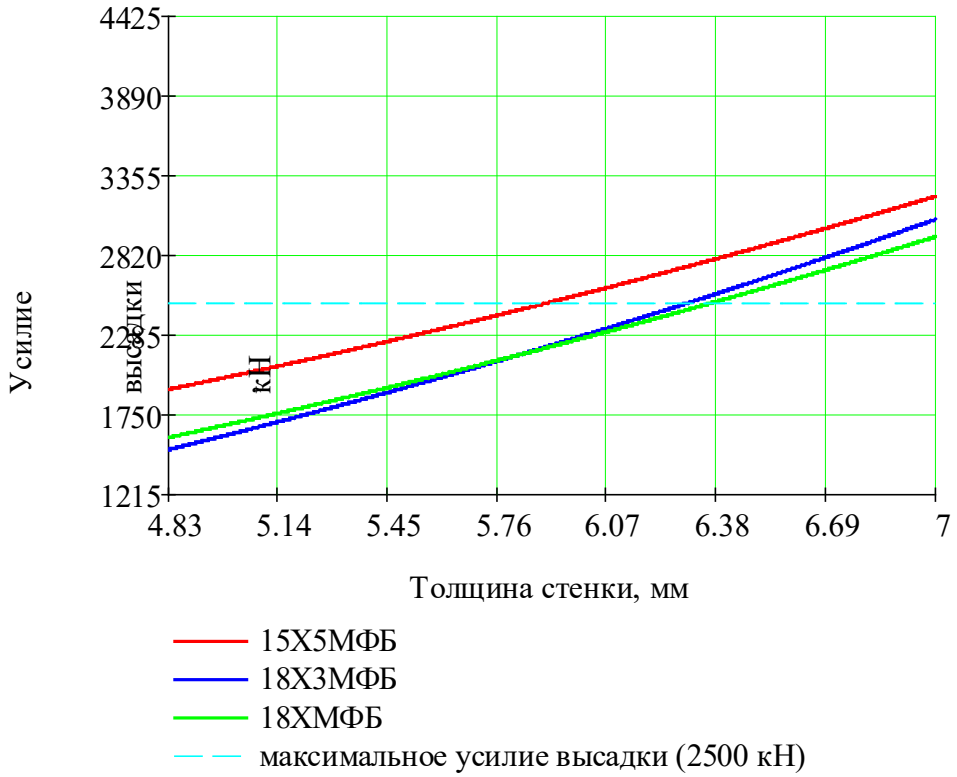


Рисунок 3.16 – Зависимость усилия высадки от толщины стенки для различных материалов НКТ
(T = 1100 °С; $\psi_{пуан} = \psi_{матр}$ = 0,5; Δh = 0 мм; ϑ = 95 мм/с)

Как следует из представленных графиков, наибольшие значения усилий при наружной высадке концов труб при различных значениях толщины стенки заготовки и температуре нагрева в индукторе 1100 °С, 1200 °С и 1300 °С получены для марки стали 15Х5МФБ, а наименьшие для марок сталей 18ХМФБ и 18Х3МФБ. Максимальное различие усилий во всем диапазоне толщины стенки при температуре 1300 °С при этом составляет 19,5 %, при температуре 1200 °С – 20,3%, при температуре 1100 °С – 26,3%.

3.3.2 Анализ влияния геометрии труб и 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. При температуре 1300 градусов: для стали 15Х5МФБ – 4,83…6,75 мм; для сталей 18ХМФБ и 18Х3МФБ – 4,83…7,0 мм. При температуре 1200 градусов: для стали

15Х5МФБ – 4,83…6,24 мм; для стали 18Х3МФБ – 4,83…6,58 мм и для стали 18ХМФБ – 4,83…6,93 мм. При температуре 1100 градусов: для стали 15Х5МФБ – 4,83…5,90 мм; для стали 18Х3МФБ – 4,83…6,30 мм и 18ХМФБ – 4,83…6,38 мм.

На рис. 3.17-3.19 представлены зависимости усилий высадки труб типоразмера 73,02х5,51 мм для каждой марки стали от толщины стенки заготовки и температуры нагрева в индукторе.

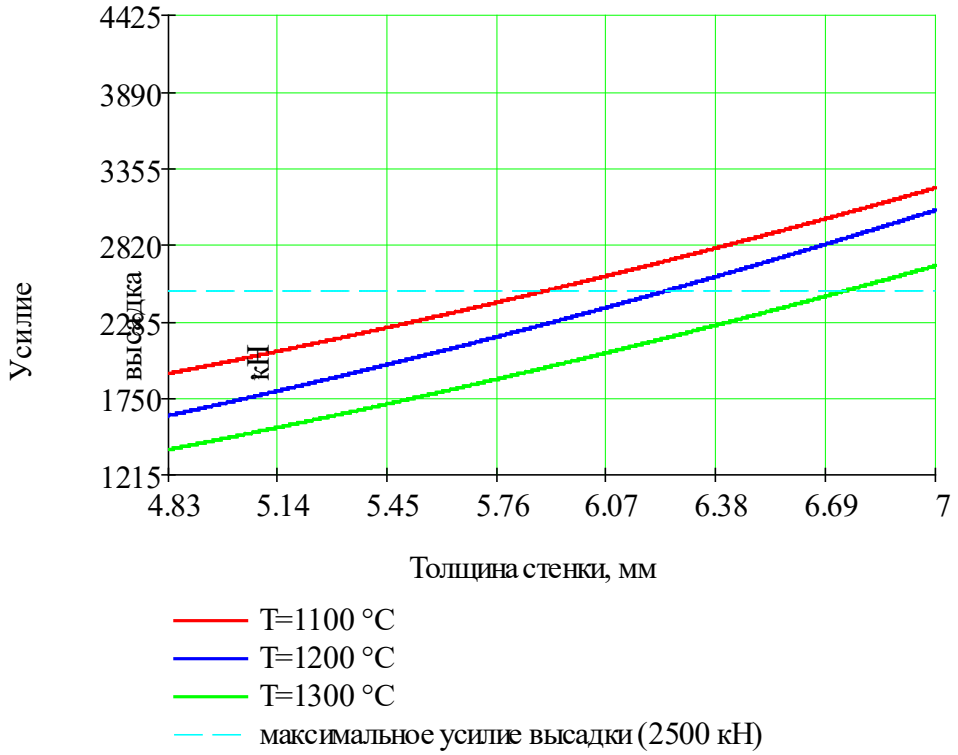


Рисунок 3.17 – Зависимость усилия высадки от толщины стенки при различных значениях температуры нагрева НКТ ($\psi_{пуан} = \psi_{матр} = 0{,}5$; материал – сталь 15Х5МФБ; $\Delta h = 0$ мм; $\vartheta = 95$ мм/с)

Как следует из представленных графиков, с уменьшением температуры нагрева происходит увеличение усилия высадки. Максимальное различие усилий для стали 15Х5МФБ при изменении температуры нагрева в индукторе с 1300 °С до 1100 °С составляет 38,1 %, для стали 18Х3МФБ – 32,1 %, для стали 18ХМФБ – 31,7 % , во всем диапазоне изменения толщины стенки заготовки.

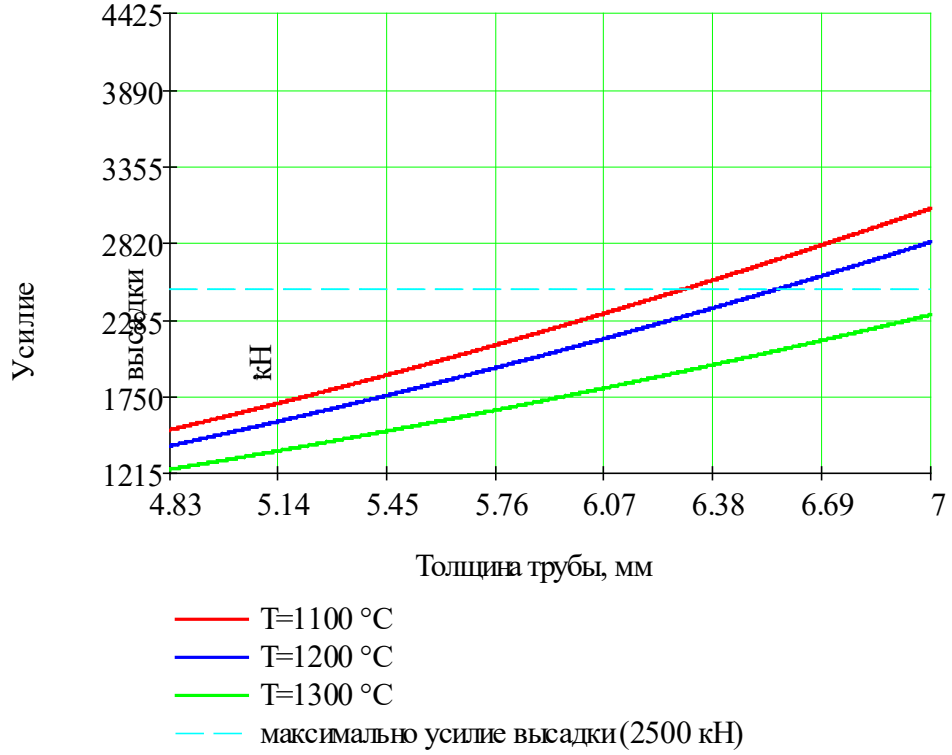


Рисунок 3.18 – Зависимость усилия высадки от толщины стенки при различных значениях температуры нагрева НКТ ($\psi_{пуан} = \psi_{матр} = 0{,}5$; материал – сталь 18Х3МФБ; $\Delta h = 0$ мм; $\vartheta = 95$ мм/с)

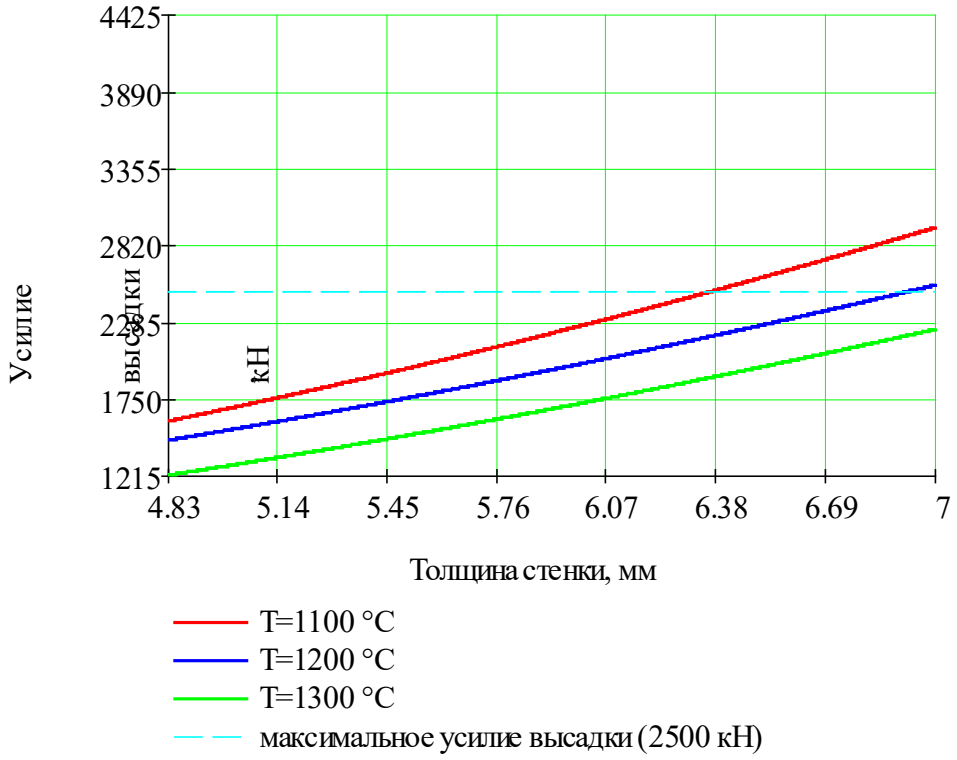


Рисунок 3.19 – Зависимость усилия высадки от толщины стенки при различных значениях температуры нагрева НКТ ($\psi_{пуан} = \psi_{матр} = 0{,}5$; материал – сталь 18ХМФБ; $\Delta h = 0$ мм; $\vartheta = 95$ мм/с)

В результате численной реализации созданной математической модели при значениях показателя трения на матрице $\psi_{матр} = 0{,}5$ и пуансоне $\psi_{пуан} = 0{,}5$ получены зависимости усилия высадки для труб размеров 60,32х4,83 мм, 73,0х7,0 мм, 88,90х6,45 мм для марки стали 15Х5МФБ и температуры нагрева представленные на рис. 3.20 [80].

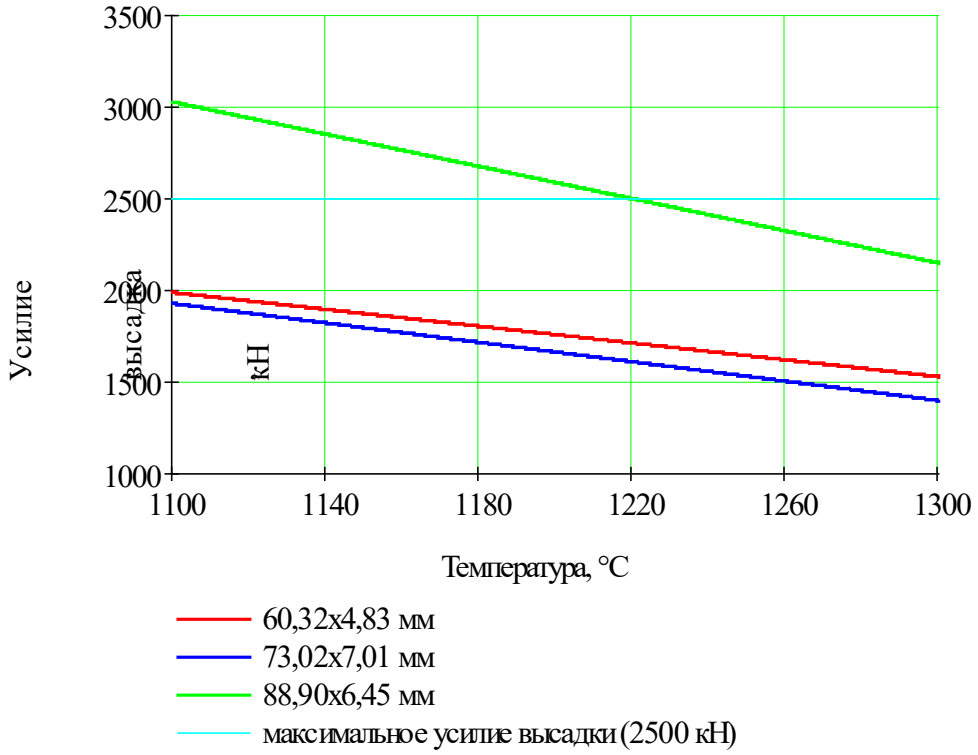


Рисунок 3.20 – Зависимость усилия высадки от температуры нагрева концов НКТ при стандартной высадке ($\psi_{пуан} = \psi_{матр} = 0{,}5$; материал – сталь 15Х5МФБ)

Как следует из представленных графиков, наибольшие значения усилий при наружной высадке концов труб рассматриваемых типоразмеров и температуре нагрева в индукторе 1100 …1300 °С получены при температуре 1100 °С, а наименьшие при температуре 1300 °С. Максимальное различие усилий при этом при температуре 1100 °С составляет: 36,3%, при температуре 1300 °С – 34,9%. Кроме того для марок сталей 18ХМФБ и 18Х3МФБ произведен расчет усилия высадки для труб рассматриваемых типоразмеров при температуре 1300 °С. Данные расчета сведены в табл. 3.8.

Таблица 3.8 – Энергосиловые параметры процесса высадки НКТ при различных материалах при стандартной высадке

Типоразмер	Материал	Усилие высадки, кН
60,32х4,83	18Х3МФБ	1510
	18ХМФБ	1320
73,0х7,0	18Х3МФБ	1150
	18ХМФБ	1050
88,90х6,45	18Х3МФБ	1830
	18ХМФБ	1680

Анализ значений усилия высадки, с точки зрения максимального усилия, развиваемого прессом SMS Meer (2500 кН) для исследуемых марок сталей позволяет определить температурные диапазоны нагрева исходной заготовки под высадку. Так, для стандартной длины высаженной части на типоразмере 88,90х6,45 мм из стали 15Х5МФБ при температурах ниже 1220 °С наблюдается превышение усилия развиваемого прессом. При 1300 °С усилия высадки не превышают 2150 кН. Для типоразмера 60,32х4,83 мм из стали 15Х5МФБ превышено значение усилия развиваемого прессом в диапазоне температур 1100…1225 °С. Для типоразмера 73,0х7,0 мм – в диапазоне температур 1100…1190 °С.

Усилие высадки стандартной длины высаженной части для сталей 18Х3МФБ и 18ХМФБ при температуре нагрева концов труб НКТ 1300 °С не превышает усилие развиваемое прессом для всех типоразмеров труб (табл. 3.8).

Моделирование процесса высадки с целью определения влияния конусности пуансона, проведенное с назначением упругих свойств материалу пуансона и последующий расчет показали, что изменение конусности с 1:200 на 1:100 для материала заготовки 15Х5МФБ типоразмера 73,02х5,51 мм, при температуре 1300 °С, после нагрева ее в индукторе, толщине стенки 4,83мм (при равных значениях показателя трения на матрице и пуансоне $\psi_{пуан} = \psi_{матр} = 0{,}5$) ведет к некоторому уменьшению усилия высадки (в пределах

11,5%) и снижению нагрузок действующих на пуансон (максимальные значения эквивалентных напряжений в теле пуансона снижаются на 16,0%).

При рассмотрении процесса наружной высадки со смещением оси трубной заготовки относительно оси инструмента рассматривалась наружная высадка концов труб из стали 15Х5МФБ типоразмера 73,02х5,51 мм, при температуре 1300 °С после нагрева в индукторе (при равных значениях показателя трения на матрице и пуансоне $\psi_{пуан} = \psi_{матр} = 0{,}5$), толщине стенки 4,83 мм. Как показали расчеты смещение оси трубной заготовки относительно оси инструмента на величину до 0,5 мм не оказывает влияния на усилие высадки и формоизменение металла при деформации.

В результате численной реализации созданной математической модели с заготовкой, имеющей исходную разнотолщинность, получены зависимости усилия высадки концов труб типоразмера 73,02х5,51 мм в зависимости от марки стали, температуры нагрева, толщины стенки, величины разнотолщинности заготовки (при равных значениях показателя трения на матрице и пуансоне $\psi_{пуан} = \psi_{матр} = 0{,}5$), представленные на рис. 3.21-3.29.

Как следует из полученных графиков, наличие разнотолщинности заготовки ведет к росту усилия высадки во всем диапазоне толщин стенки и температур при увеличении толщины стенки и уменьшении температуры нагрева исходной заготовки в индукторе. Наибольшие значения усилий при наружной высадке концов труб при одинаковых значениях толщины стенки, максимальном значении разнотолщинности заготовки равном 1,2 мм, температуре нагрева 1300 °С, получены для марки стали 15Х5МФБ (3670 кН при толщине стенки 7,0 мм), а наименьшее – для марки стали 18ХМФБ (2558 кН при толщине стенки 4,83 мм). Максимальное различие усилий во всем диапазоне толщины стенки при этом составляет 43,5%.

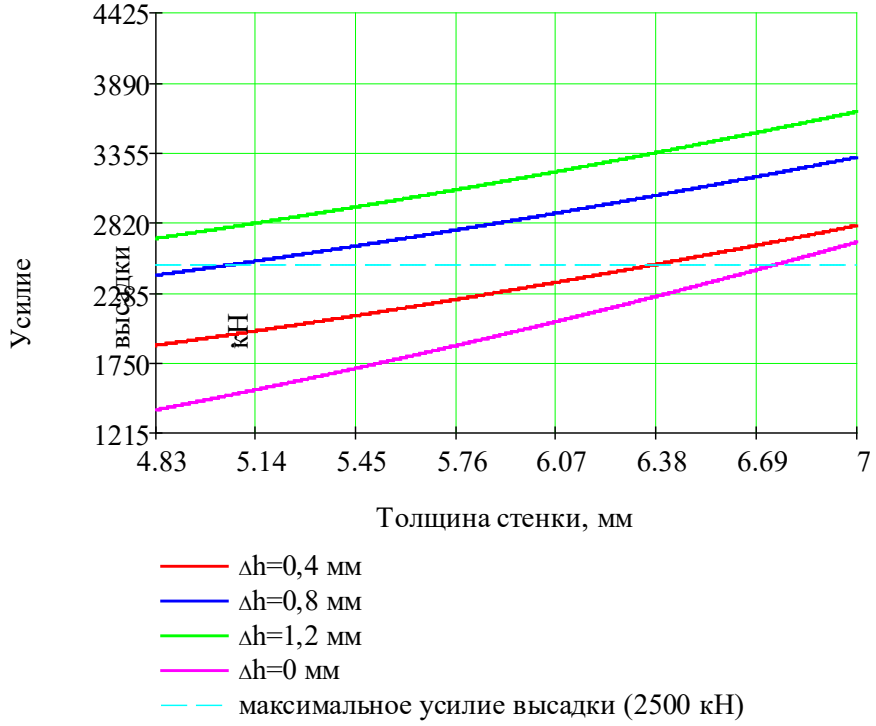


Рисунок 3.21 – Зависимость усилия высадки от толщины стенки при различных значениях разнотолщинности НКТ (T = 1300 °С; $\psi_{пуан} = \psi_{матр}$ = 0,5; материал – сталь 15Х5МФБ; ϑ = 95 мм/с)

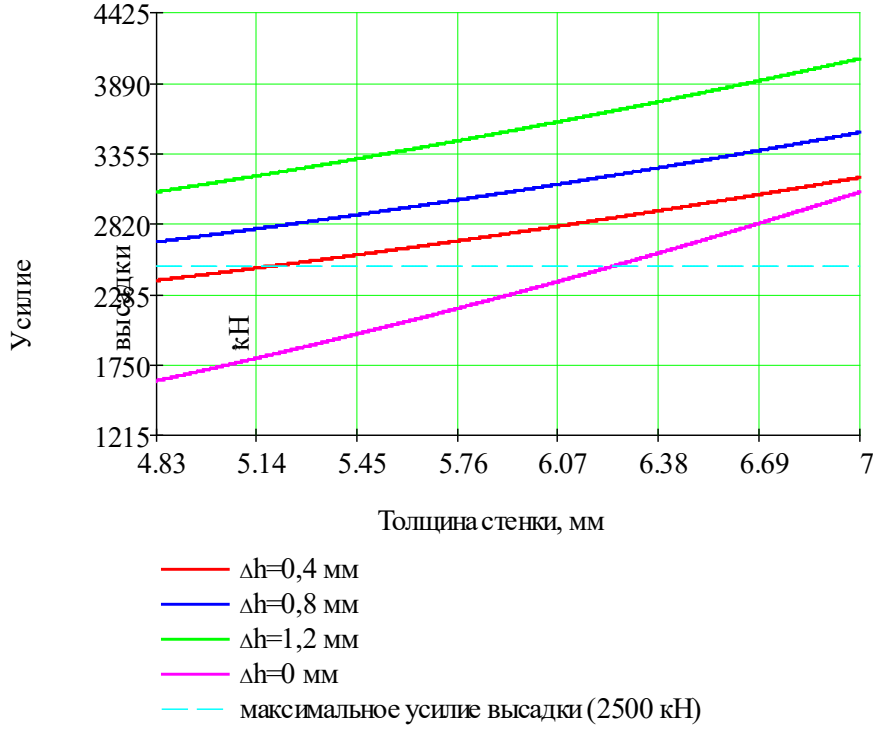


Рисунок 3.22 – Зависимость усилия высадки от толщины стенки при различных значениях разнотолщинности НКТ (T = 1200 °С; $\psi_{пуан} = \psi_{матр}$ = 0,5; материал – сталь 15Х5МФБ; ϑ = 95 мм/с)

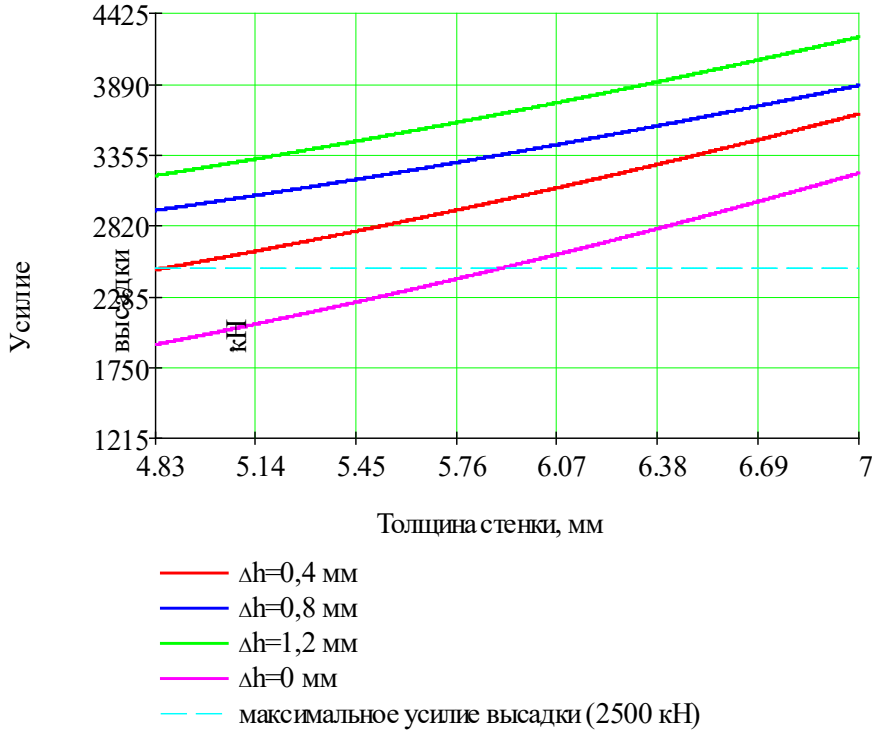


Рисунок 3.23 – Зависимость усилия высадки от толщины стенки при различных значениях разнотолщинности НКТ (T = 1100 °С; $\psi_{пуан} = \psi_{матр}$ = 0,5; материал – сталь 15Х5МФБ; ϑ = 95 мм/с)

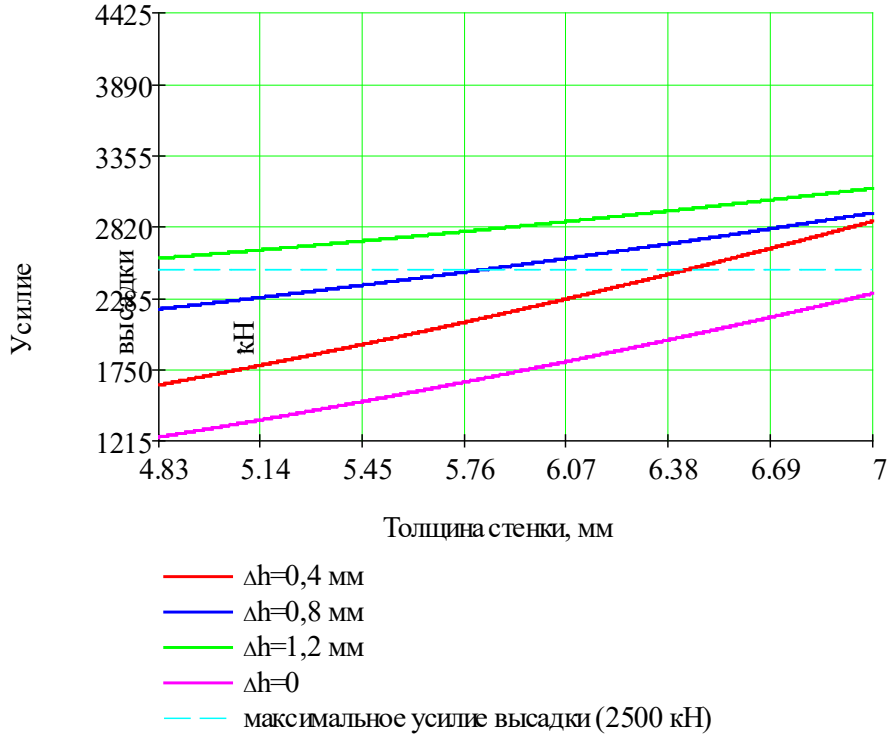


Рисунок 3.24 – Зависимость усилия высадки от толщины стенки при различных значениях разнотолщинности НКТ (T = 1300 °С; $\psi_{пуан} = \psi_{матр}$ = 0,5; материал – сталь 18Х3МФБ; ϑ = 95 мм/с)

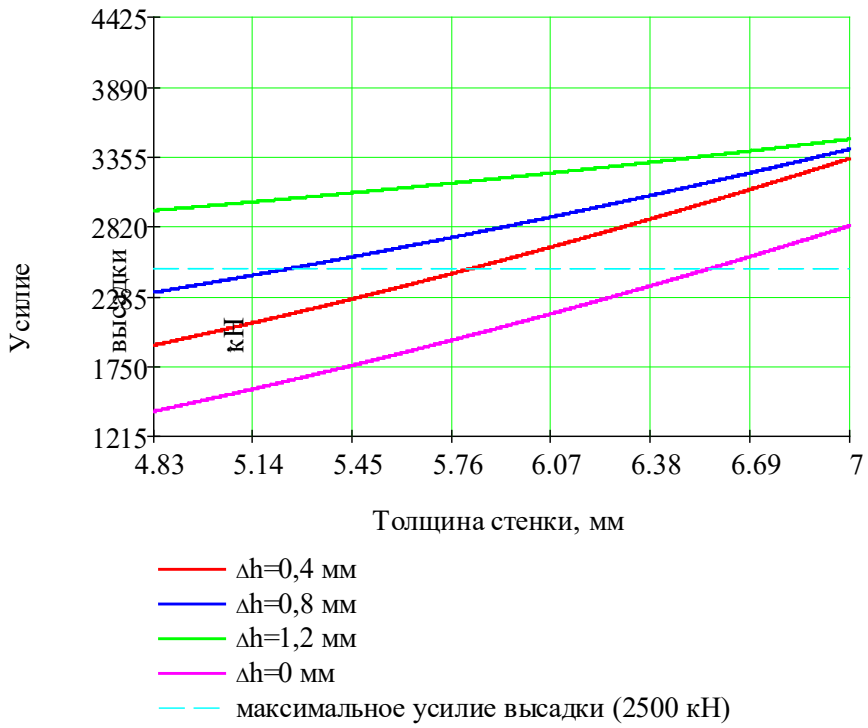


Рисунок 3.25 – Зависимость усилия высадки от толщины стенки при различных значениях разнотолщинности НКТ (T = 1200 °С; $\psi_{пуан} = \psi_{матр}$ = 0,5; материал – сталь 18Х3МФБ; ϑ = 95 мм/с)

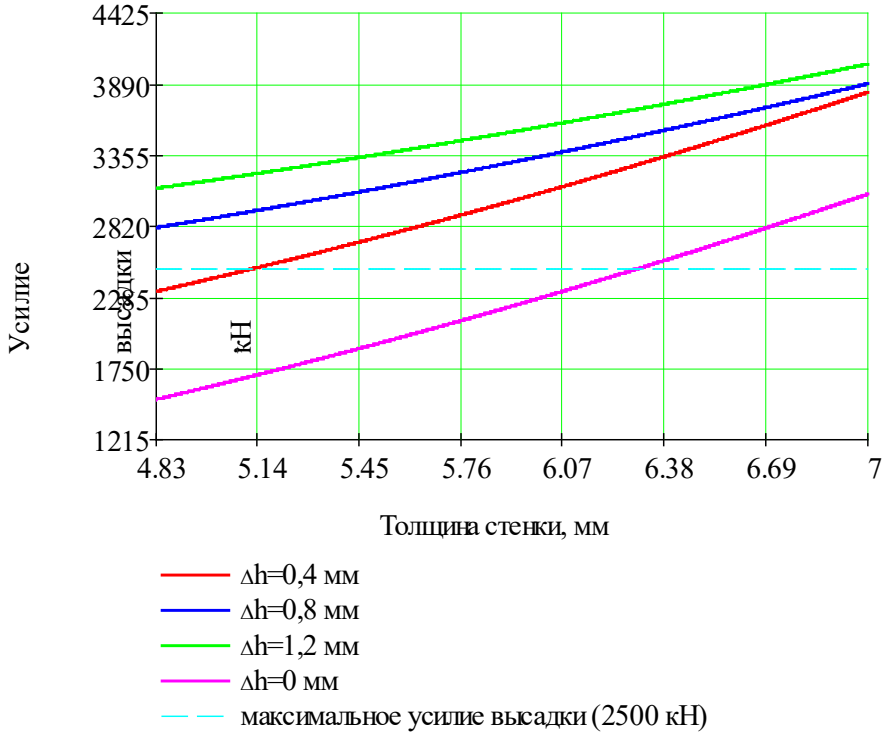


Рисунок 3.26 – Зависимость усилия высадки от толщины стенки при различных значениях разнотолщинности НКТ (T = 1100 °С; $\psi_{пуан} = \psi_{матр}$ = 0,5; материал – сталь 18Х3МФБ; ϑ = 95 мм/с)

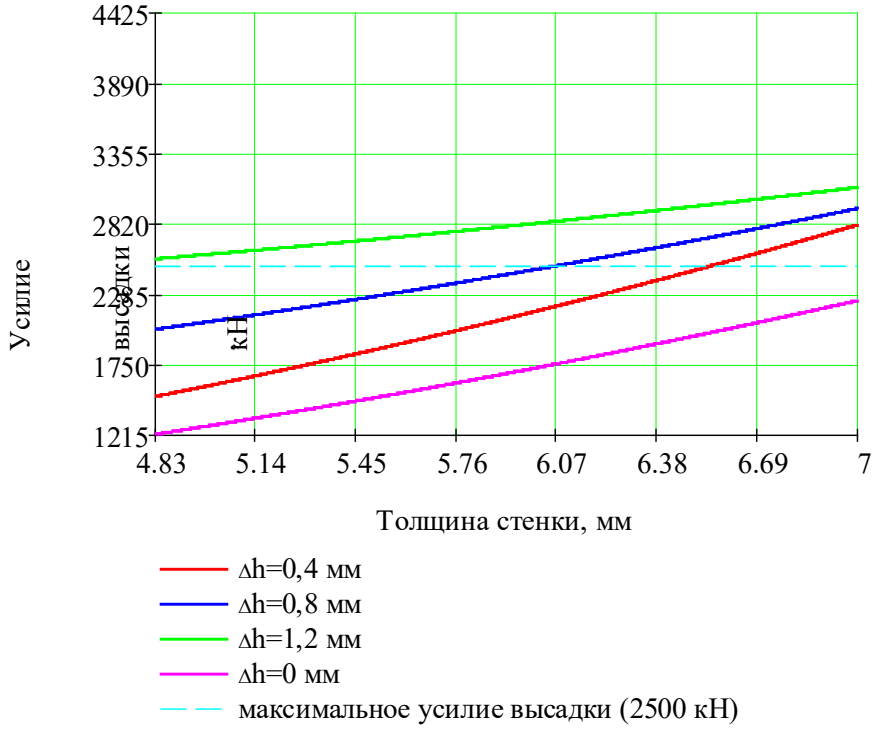


Рисунок 3.27 – Зависимость усилия высадки от толщины стенки при различных значениях разнотолщинности НКТ (T = 1300 °C; $\psi_{пуан} = \psi_{матр}$ = 0,5; материал – сталь 18ХМФБ; ϑ = 95 мм/с)

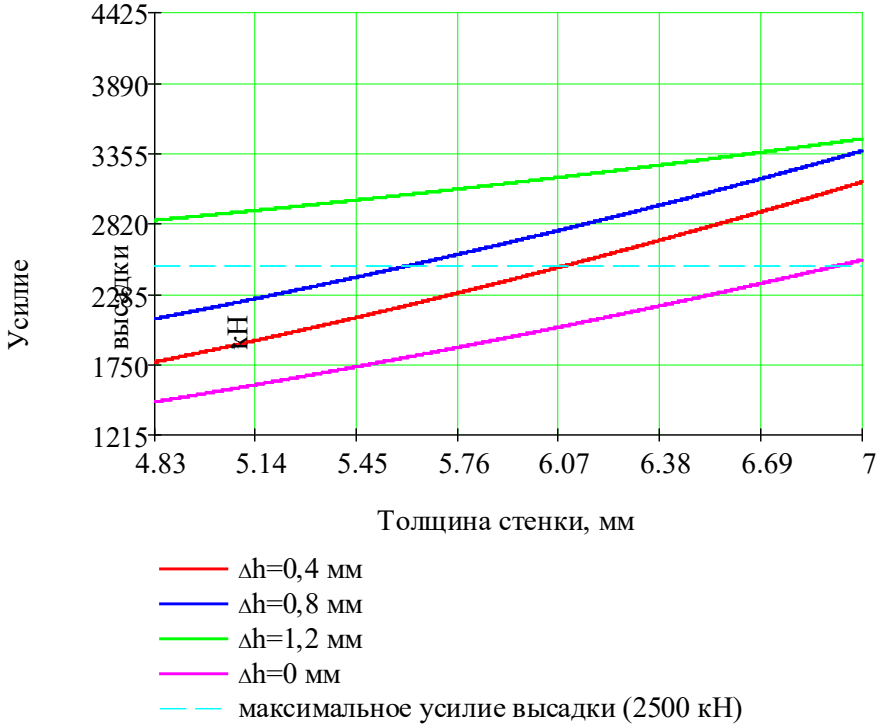


Рисунок 3.28 – Зависимость усилия высадки от толщины стенки при различных значениях разнотолщинности НКТ (T = 1200 °C; $\psi_{пуан} = \psi_{матр}$ = 0,5; материал – сталь 18ХМФБ; ϑ = 95 мм/с)

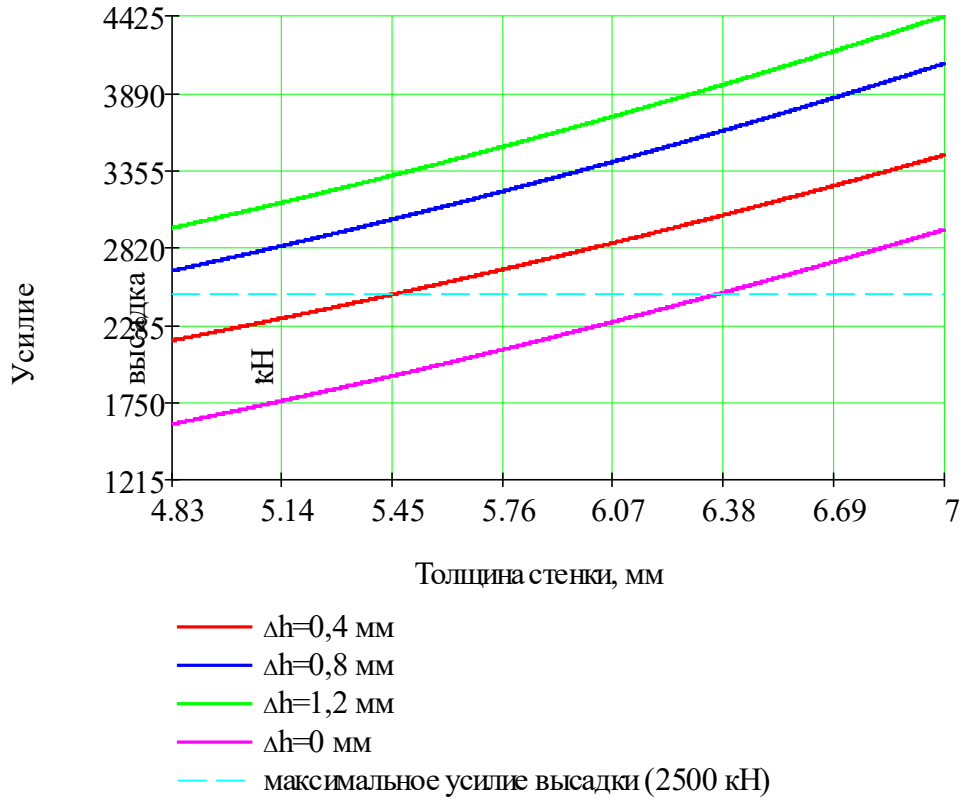


Рисунок 3.29 – Зависимость усилия прессования от толщины стенки при различных значениях разнотолщинности НКТ (T = 1100 °С; $\psi_{пуан} = \psi_{матр}$ = 0,5; материал – сталь 18ХМФБ; ϑ = 95 мм/с)

Максимальные значения усилий при высадке концов труб при одинаковых значениях толщины стенки, значении разнотолщинности заготовки равном 0,4 мм, температуре нагрева 1300 °С, получены также для марки стали 15Х5МФБ (3010 кН при толщине стенки 7,0 мм), а наименьшее – для марки стали 18ХМФБ (1512 кН при толщине стенки 4,83 мм). Максимальное различие усилий во всем диапазоне толщины стенки при этом составляет 99,1%.

При температуре нагрева 1200 °С наибольшие значения усилий получены при максимальном значении разнотолщинности заготовки равном 1,2 мм, также для марки стали 15Х5МФБ (4073 кН при толщине стенки 7,0 мм), а наименьшее – для марки стали 18ХМФБ (2849 кН при толщине стенки 4,83 мм). Максимальное различие усилий во всем диапазоне толщины стенки при этом составляет 43,0%. Максимальные значения усилий при высадке концов труб при одинаковых значениях толщины стенки, значении разнотолщинности заготовки равном 0,4 мм, температуре нагрева 1200 °С, получены также

для марки стали 15Х5МФБ (3170 кН при толщине стенки 7,0 мм), а наименьшее – для марки стали 18ХМФБ (1770 кН при толщине стенки 4,83 мм). Максимальное различие усилий во всем диапазоне толщины стенки при этом составляет 79,1%.

При температуре нагрева 1100 °С наибольшие значения усилий высадки получены при максимальном значении разнотолщинности заготовки равном 1,2 мм, для марки стали 15Х5МФБ (4245 кН при толщине стенки 7,0 мм), а наименьшее – для марки стали 18ХМФБ (2958 кН при толщине стенки 4,83 мм). Максимальное различие усилий во всем диапазоне толщины стенки при этом составляет 43,5%. Максимальные значения усилий при высадке концов труб при одинаковых значениях толщины стенки, значении разнотолщинности заготовки равном 0,4 мм, температуре нагрева 1100°С, получены также для марки стали 15Х5МФБ (3664 кН при толщине стенки 7,0 мм), а наименьшее – для марки стали 18ХМФБ (2180 кН при толщине стенки 4,83 мм). Максимальное различие усилий во всем диапазоне толщины стенки при этом составляет 68,1%.

3.3.3 Анализ влияния условий трения

При изучении влияния трения на процесс наружной высадки концов труб рассматривался случай высадки заготовок из стали 15Х5МФБ типоразмера 73,02х5,51 мм, при температуре нагрева в индукторе равной 1300 °С [81]. Значения показателя трения на поверхностях матрица-заготовка и пуансон-заготовка принимались согласно табл. 3.9.

В результате были определены значения усилий высадки при различных сочетаниях условий трения и нулевом значении разнотолщинности на стенке 4,83 мм (табл. 3.9).

Как следует из представленных данных, при значениях показателя трения $\psi_{пуан} = \psi_{матр} = 0{,}1$ получено минимальное значение усилия высадки равное 540 кН.

Таблица 3.9 – Значения усилия высадки при различных условиях трения

Показатель трения на матрице $\psi_{матр}$	Показатель трения на пуансоне $\psi_{пуан}$	Усилие высадки, кН
0,1	0,1	540
0,1	1,0	590
0,5	0,5	1750
1,0	0,1	2010
1,0	1,0	3870

Максимальное значение усилия высадки, равное 3870 кН, достигнуто при $\psi_{пуан} = \psi_{матр} = 1{,}0$, т.е. большее в 7,2 раза, что говорит о значительном влиянии условий трения на усилие высадки. При уменьшении показателя трения на поверхности матрица-заготовка ($\psi_{пуан} = 1{,}0$ и $\psi_{матр} = 0{,}1$) усилие уменьшается в 6,6 раза, а при уменьшении показателя трения на поверхности пуансон-заготовка ($\psi_{пуан} = 0{,}1$ и $\psi_{матр} = 1{,}0$) усилие высадки уменьшается в 1,9 раза от максимального значения при $\psi_{пуан} = \psi_{матр} = 1{,}0$. При одинаковых показателях трения $\psi_{пуан} = \psi_{матр} = 0{,}5$ усилие высадки составляет 1750 кН.

Определение усилий высадки для типоразмеров труб 60,32х4,83 мм, 73,0х7,0 мм, 88,90х6,45 мм, с целью изучения влияния условий трения, производилось на примере заготовки из стали 15Х5МФБ при нагреве до температуры 1300 °С, при изменении показателя трения в диапазоне 0,1…1,0. Полученные зависимости изображены на рис. 3.30.

Как видно из графиков, усилие высадки увеличивается с ростом показателя трения. При изменении показателя трения с 0,1 до 1,0 это увеличение составляет для типоразмера 60,32х4,83 мм – 6,57 раза, для 73,0х7,0 мм – 5,01 раза, для 88,90х6,45 мм – 7,14 раза.

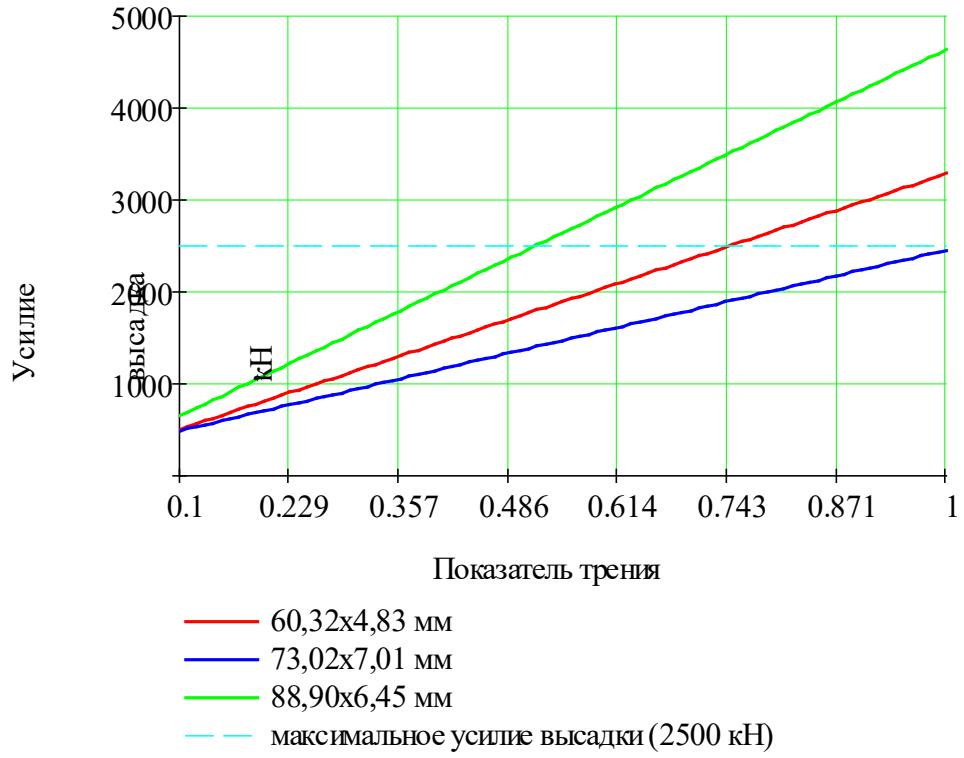


Рисунок 3.30 – Зависимость усилия высадки от показателя трения при стандартной высадке
(T = 1300°C; материал – сталь 15Х5МФБ)

Кроме того, были определены значения усилий высадки при различных сочетаниях условий трения на границах металла с матрицей и металла с пуансоном для рассматриваемых типоразмеров труб (табл. 3.10).

Как следует из представленных данных, при значениях показателя трения $\psi_{пуан} = \psi_{матр} = 0{,}1$ получены минимальные значения усилия высадки, равные 500 кН на типоразмере 60,32x4,83 мм. Максимальные значение усилия высадки, равные 4640 кН при $\psi_{пуан} = \psi_{матр} = 0{,}1$ на типоразмере 88,90x6,45 мм.

Таблица 3.10 – Значения усилия высадки при различных условиях трения при стандартной высадке

Типоразмер	Показатель трения на пуансоне $\psi_{пуан}$	Показатель трения на матрице $\psi_{матр}$	Усилие высадки, кН
60,32x4,83	0,1	0,1	500
	1,0	0,1	884
	0,5	0,5	1530
	0,1	1,0	1750
	1,0	1,0	3285
73,0x7,0	0,1	0,1	490
	1,0	0,1	1020
	0,5	0,5	1400
	0,1	1,0	2030
	1,0	1,0	2455
88,90x6,45	0,1	0,1	650
	1,0	0,1	1470
	0,5	0,5	2150
	0,1	1,0	3320
	1,0	1,0	4640

3.3.4 Анализ влияния скорости движения пуансона

Рассмотрение влияния скорости перемещения пуансона на усилие высадки концов труб проводилось на примере высадки заготовки типоразмера 73,02x5,51 мм из стали 15Х5МФБ, при температуре нагрева в индукторе $T = 1300$ °С, разнотолщинности, равной $\Delta h = 1{,}2$ мм, показателях трения $\psi_{пуан} = 1{,}0$ и $\psi_{матр} = 0{,}1$ [82]. В результате расчета построена зависимость, изображенная на рис. 3.31.

Анализ данной зависимости говорит о наличии минимума усилия в области скоростей 80…110 мм/с. Различие усилий во всем диапазоне рассматриваемых значений скоростей составляет 27,1%.

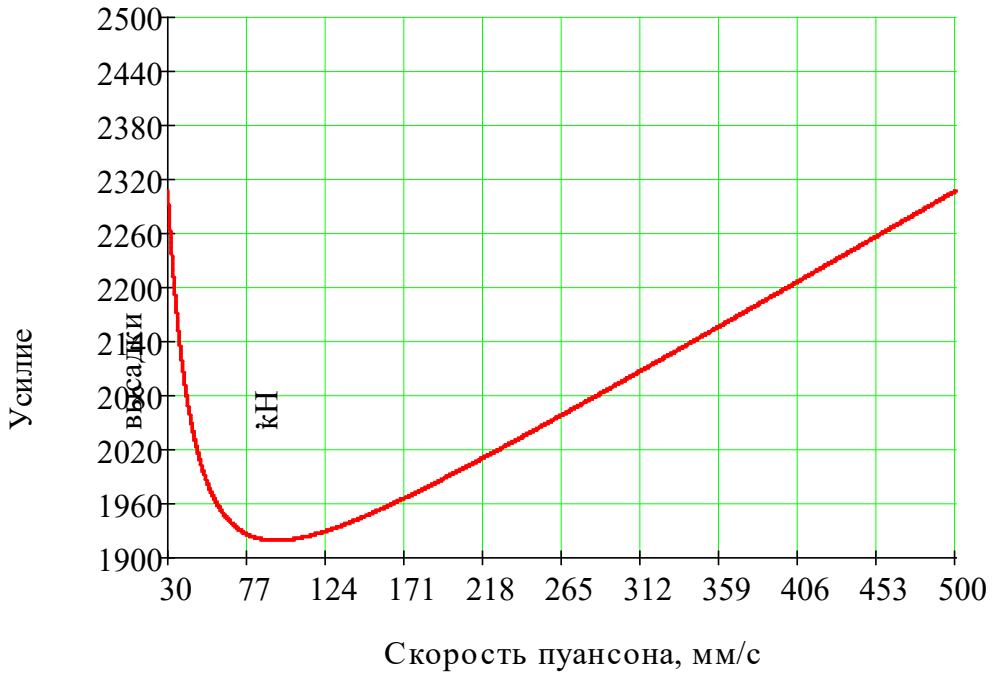


Рисунок 3.31 – Зависимость усилия высадки от скорости перемещения пуансона ($T = 1300$ °C; $\psi_{пуан} = 1{,}0$; $\psi_{матр} = 0{,}1$; материал – сталь 15Х5МФБ; $h = 5{,}51$ мм; $\Delta h = 1{,}2$ мм)

3.3.5 Анализ влияния параметров технологии на нагруженность инструмента при стандартной наружной высадке

Изучение нагруженности пуансона производилось с целью определения влияния параметров технологического процесса высадки на стойкость инструмента. Расчеты производились при значениях показателя трения $\psi_{пуан} = \psi_{матр} = 0{,}5$. 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. Точки с максимальными значениями эквивалентных напряжений для случаев высадки с различными значениями разнотолщинности заготовки показаны на рис. 3.32.

В табл. 3.11 приведены значения усилий, действующих на пуансон при которых получены значения максимальных эквивалентных напряжений и значения нормальных напряжений вдоль продольной оси Y пуансона (σ_y) в указанных точках.

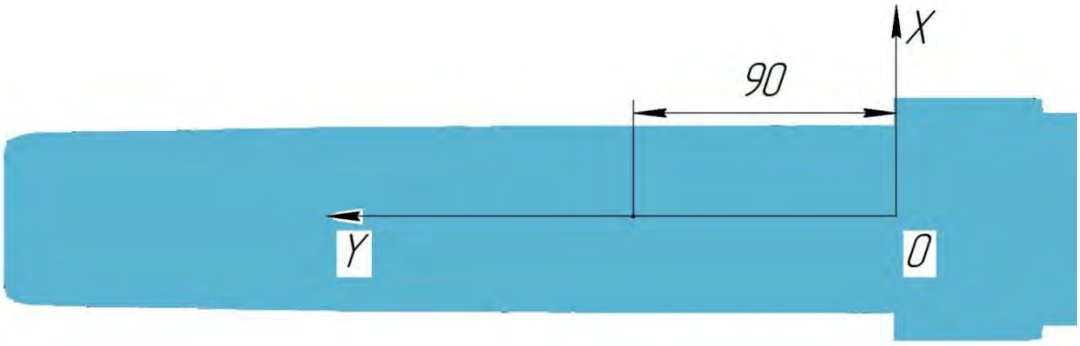
Таблица 3.11 – Напряжения, возникающие в пуансоне, в процессе высадки

№ точки	Разнотолщинность Δh, мм	Эквивалентные напряжения $\sigma_{экв}$, МПа	Продольные напряжения σ_y, МПа	Усилие высадки, кН
1	0	482	81	1320
2	0,4	552	90	1440
3	0,8	726	177	1870
4	1,2	846	267	1850

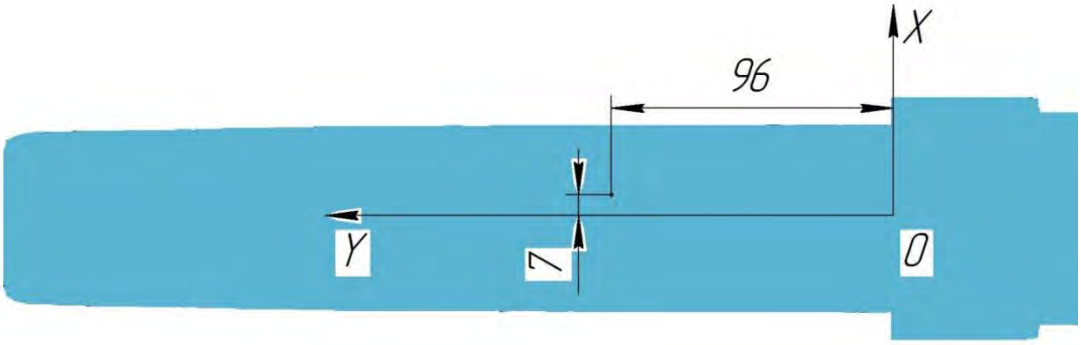
Как видно из полученных данных, нормальные напряжения вдоль оси Y имеют положительный знак, т.е. являются растягивающими, и изменяются от значения 81 МПа при нулевом значении разнотолщинности до 267 МПа при разнотолщинности, равной 1,2 мм. Остальные компоненты нормальных напряжений по осям X и Z, как показали расчеты, в указанных точках являются сжимающими. Происходит также увеличение эквивалентных напряжений, с увеличением значения разнотолщинности от нуля до значения 1,2 мм.

На рис. 3.33 представлено поле температур в теле пуансона при исходной температуре инструмента равной 20 °С и температуре заготовки из стали 15Х5МФБ после индуктора – 1300 °С, при высадке симметричной заготовки с толщиной стенки 5,51 мм в конце хода пуансона при заполнении рабочего пространства инструмента.

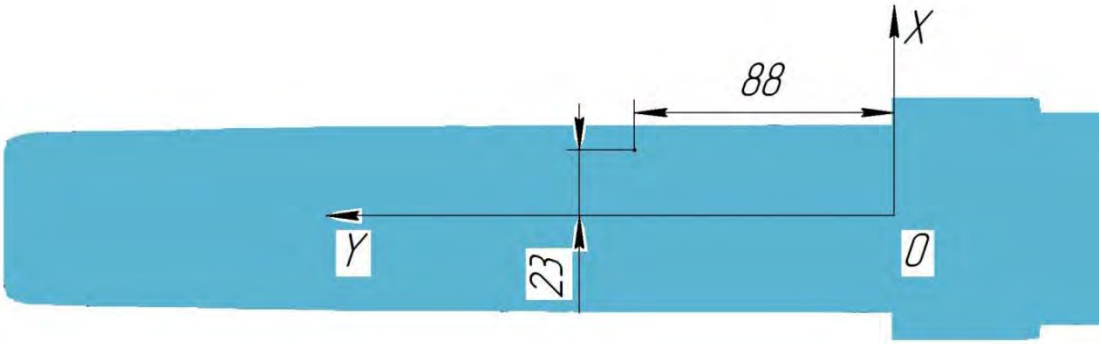
Максимальное значение температуры на коническом участке пуансона получено на его поверхности в точке удаленной на 15 мм от торца в момент окончания рабочего хода и составляет 264 °С (рис. 3.33). На глубине 12 мм в теле пуансона, с удалением от торца заготовки также на 15 мм температура составляет 22 °С. При обратном ходе пуансона, который совершается без паузы после окончания рабочего хода в течение 0,8 с наблюдается выравнивание температур в указанных точках тела пуансона до 139 °С и 35 °С соответственно на наружной поверхности пуансона и на глубине 12 мм в теле.



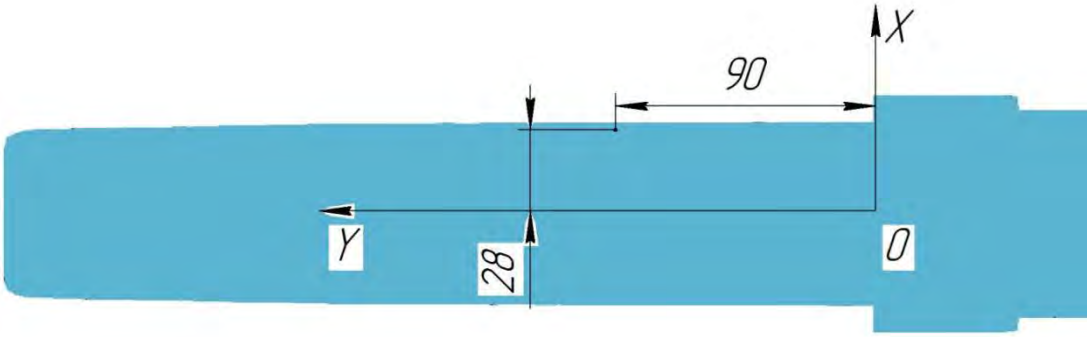
а



б



в



г

Рисунок 3.32 – Схема расположения точек пуансона, в которых действуют максимальные эквивалентные напряжения в течение процесса высадки ($T = 1300$ °С; $\psi_{пуан} = \psi_{матр} = 0{,}5$; материал – сталь 15Х5МФБ; $h = 4{,}83$ мм; $\vartheta = 95$ мм/с; *а* – $\Delta h = 0$ мм; *б* – $\Delta h = 0{,}4$ мм; *в* – $\Delta h = 0{,}8$ мм; *г* – $\Delta h = 1{,}2$ мм)

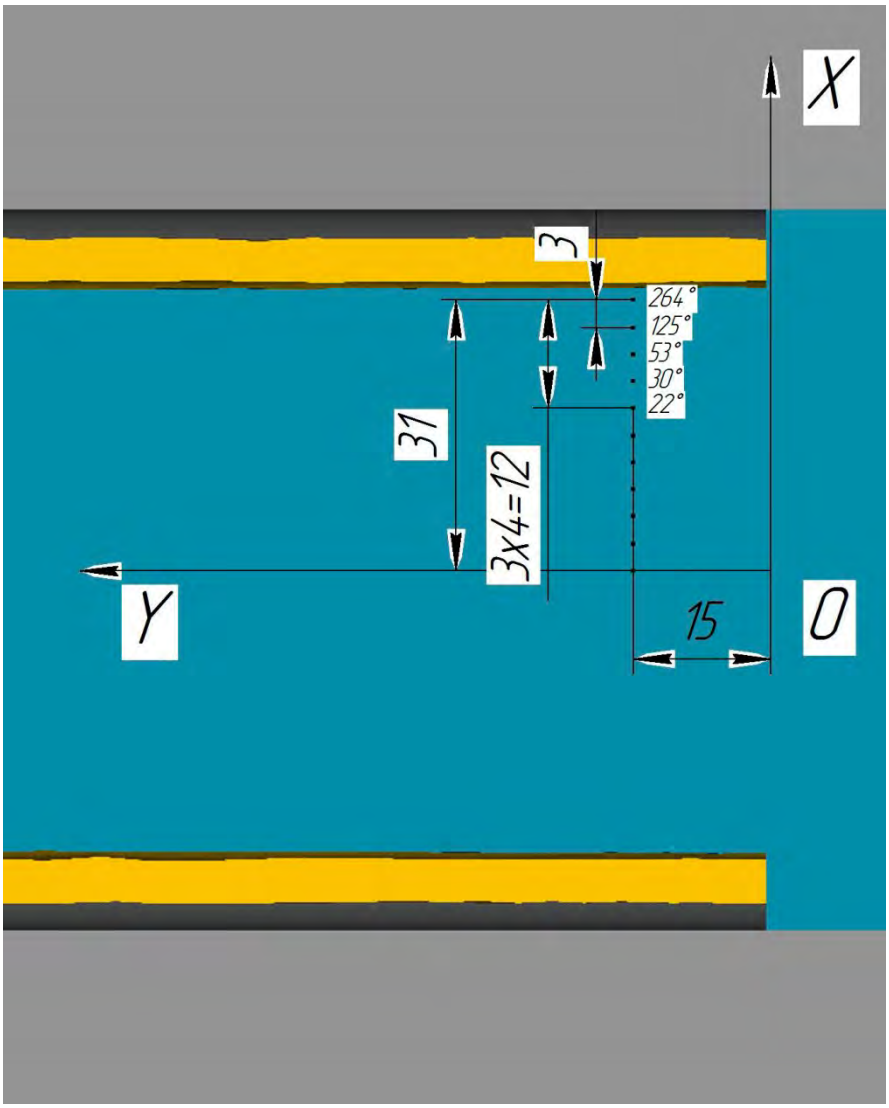


Рисунок 3.33 – Схема расположения точек пуансона, в которых производился замер температуры в течение процесса высадки
(T = 1300 °С; $\psi_{пуан} = \psi_{матр}$ = 0,5; материал – сталь 15Х5МФБ;
h = 4,83 мм; Δh = 0 мм; ϑ = 95 мм/с)

На поверхности заготовки в точке, находящейся непосредственно в зоне контакта с выделенной точкой поверхности пуансона (рис. 3.34), температура составила 920 °С при исходной температуре перед началом высадки 1180 °С (рис. 3.35).

Изменение температуры поверхностного слоя инструмента с 20 °С до 264 °С (согласно рис. 3.35) происходит за время рабочего хода, равное 1,2 с. Выдержка инструмента в зоне контакта с заготовкой в течение последующих 2,5 с, как показали расчеты, ведет к повышению температуры в данной точке до 377 °С.

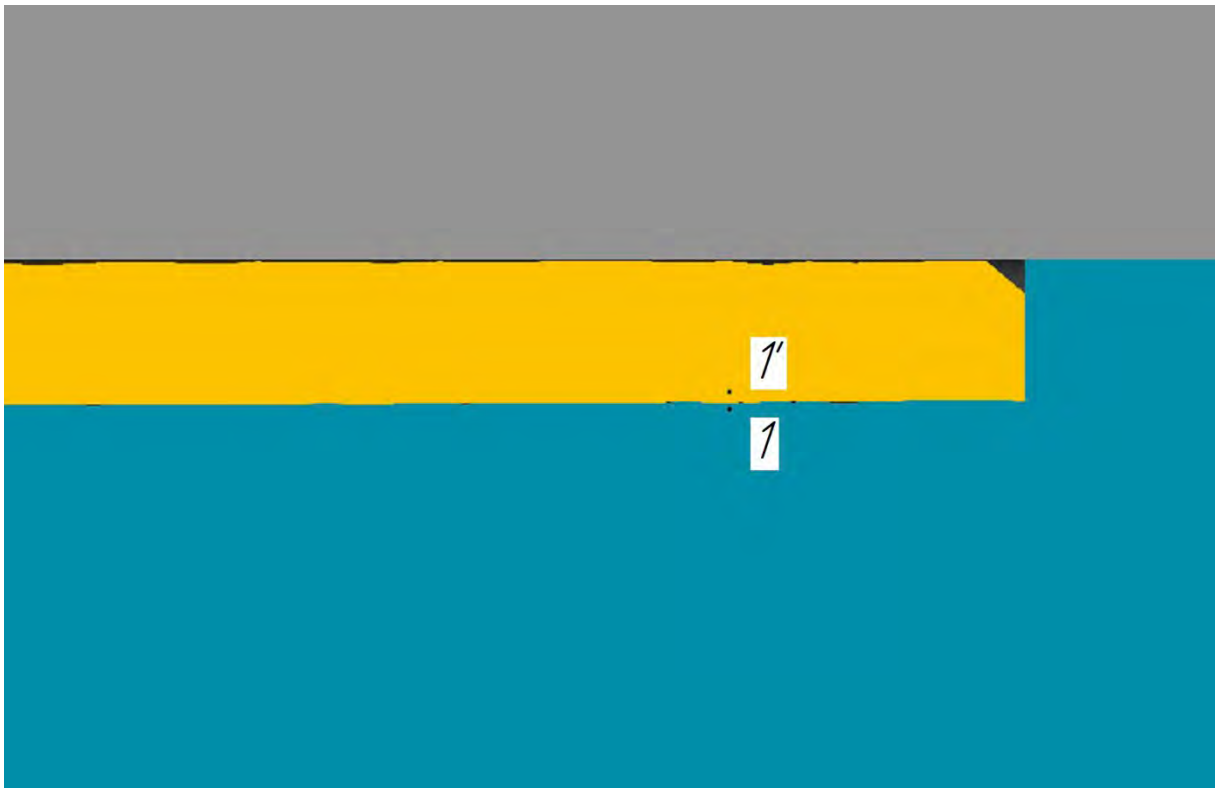


Рисунок 3.34 – Схема расположения точек на поверхности пуансона и внутренней поверхности заготовки, в которых производился замер температуры в течение процесса высадки
(T = 1300 °C; $\psi_{пуан} = \psi_{матр}$ = 0,5; материал – сталь 15Х5МФБ; h = 4,83 мм; Δh = 0 мм; ϑ = 95 мм/с)

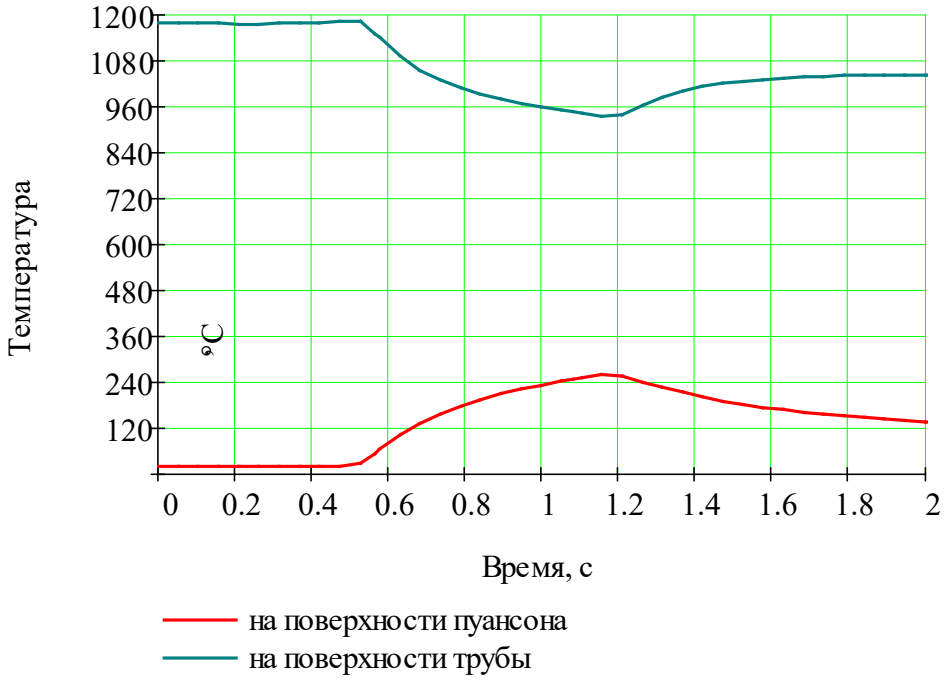


Рисунок 3.35 – Зависимость температуры на поверхности пуансона и внутренней поверхности трубы от времени
(T = 1300 °C; $\psi_{пуан} = \psi_{матр}$ = 0,5; материал – сталь 15Х5МФБ; h = 4,83 мм; Δh = 0 мм; ϑ = 95 мм/с)

Исследование влияния температуры предварительного нагрева пуансона и матрицы на усилие высадки на примере сталь 15Х5МФБ, для стенки заготовки 5,51 мм, нагреве заготовки в индукторе до температуры 1300 °С при разнотолщинности 0,8 мм и нагреве инструмента до 250 °С, показало, что происходит снижение усилия высадки в сравнении с пуансоном с исходной температурой 20 °С на 14,3% (с 2640 кН до 2310 кН).

3.4 Параметрический анализ процесса удлиненной наружной высадки концов труб

3.4.1 Анализ влияния температуры

При моделировании процесса удлиненной наружной высадки концов труб была поставлена задача по определению рациональной длины зоны нагрева заготовки. Исследовался процесс высадки концов НКТ из стали марки 15Х5МФБ, типоразмеров 60,32х4,83 мм, 73,02х5,51 мм, 73,0х7,0 мм, 88,90х6,45 мм, при температуре нагрева $T = 1300$ °С. При этом длина зоны нагрева от торца трубы варьировалась в пределах $l = 240 \ldots 505$ мм в зависимости от типоразмера трубы.

В табл. 3.12 приведены значения усилий прямого хода, действующих на пуансон, матрицу, а также на зажим трубы высадочного пресса при удлиненной высадке. Как видно из полученных данных, происходит снижение усилий, действующих на пуансон, матрицу и зажим пресса высадки при увеличении длины зоны нагрева до определенной величины. При последующем увеличении длины зоны нагрева наблюдается увеличение усилия высадки. Поэтому существуют рациональные величины длины зоны нагрева заготовки под высадку, соответствующие минимуму усилия высадки (указанные в таблице курсивом), которые можно рекомендовать к внедрению на практике.

Таблица 3.21 – Энергосиловые параметры процесса высадки концов НКТ при различных значениях длины зоны нагрева трубы при удлиненной высадке

Типоразмер	Длина зоны нагрева трубы *l*, мм	Усилие прямого хода, кН
60,32x4,83	410	2800
	460	*2275*
	510	2437
73,02x5,51	420	3254
	470	*2730*
	520	2855
73,0x7,0	320	2350
	370	*2005*
	420	2082
88,90x6,45	420	3830
	470	*3325*
	520	3440

В результате численной реализации созданной математической модели при значениях показателя трения на матрице $\psi_{матр} = 0{,}5$ и пуансоне $\psi_{пуан} = 0{,}5$, проведенной на примере высадки заготовки типоразмера 73,02x5,51 мм, получены зависимости усилия высадки в зависимости от марки стали и толщины стенки заготовки, представленные на рис. 3.36 [83].

Как следует из представленных графиков, наибольшие значения усилий при наружной высадке концов труб при различных значениях толщины стенки заготовки и температуре нагрева в индукторе 1300 °С получены для марки стали 15Х5МФБ, а наименьшие для марки сталей 18ХМФБ. Максимальное различие усилий во всем диапазоне толщины стенки при температуре 1300 °С при этом составляет 36,0%.

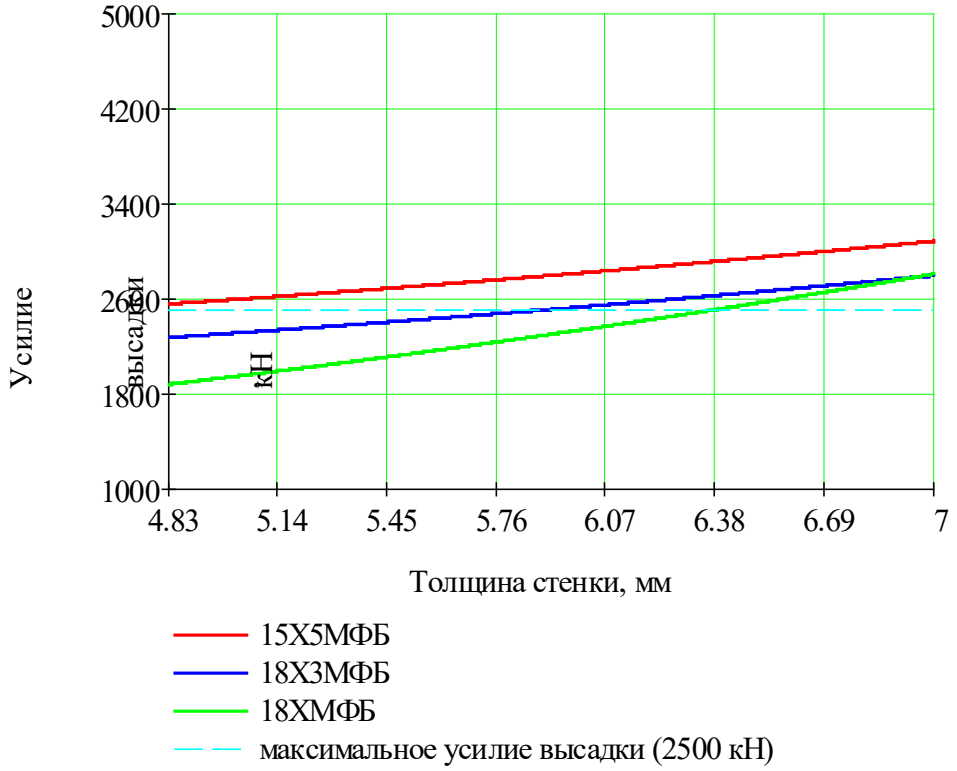


Рисунок 3.36 – Зависимость усилия высадки от толщины стенки для различных марок сталей НКТ
(T = 1300 °С; $\psi_{пуан} = \psi_{матр}$ = 0,5; Δh = 0 мм;
L = 340 мм; l = 470 мм; ϑ = 95 мм/с)

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. При температуре 1300 °С: для стали 15Х5МФБ все значения усилий в заданном диапазоне размеров выше максимального усилия прямого хода пресса; для стали 18Х3МФБ – 4,83…5,87 мм; для стали 18ХМФБ – 4,83…6,36 мм.

3.4.2 Анализ влияния геометрии труб

Для каждой марки стали изучены зависимости усилий высадки от толщины стенки заготовки при различных температурах нагрева в индукторе. Как следует из графиков, представленных на рис. 3.27 на примере стали 15Х5МФБ, с уменьшением температуры нагрева происходит увеличение усилия высадки. Максимальное различие усилий для стали 15Х5МФБ при

изменении температуры нагрева в индукторе с 1300 °С до 1100 °С составляет 34,2%. Аналогичная картина имеет место для сталей марок 18Х3МФБ и 18ХМФБ.

В результате численной реализации получены также зависимости усилия высадки для труб размером 60,32х4,83 мм, 73,0х7,0 мм, 88,90х6,45 мм для марки стали 15Х5МФБ от температуры нагрева представленные на рис. 3.28.

Как следует из представленных графиков, наибольшие значения усилий при наружной высадке концов труб рассматриваемых типоразмеров и температуре нагрева в индукторе 1100…1300 °С получены при температуре 1100 °С, а наименьшие при температуре 1300 °С. Максимальное различие усилий при этом при температуре 1100 °С составляет: 32,7%, при температуре 1300 °С – 39,8%. Кроме того для марок сталей 18ХМФБ и 18Х3МФБ произведен расчет усилия высадки для труб рассматриваемых типоразмеров при температуре 1300 °С. Данные расчета сведены в табл. 3.22.

Анализ значений усилия высадки, с точки зрения максимального усилия, развиваемого прессом SMS Meer (2500 кН) для исследуемых марок сталей позволяет определить температурные диапазоны нагрева исходной заготовки под высадку. Так, для удлиненной высадки на типоразмере 88,90х6,45 мм из стали 15Х5МФБ происходит превышение усилия, развиваемого прессом, во всем диапазоне рассматриваемых температур. Для типоразмера 60,32х4,83 мм из стали 15Х5МФБ превышено значение усилия развиваемого прессом в диапазоне температур 1100…1225 °С. Для типоразмера 73,0х7,0 мм – в диапазоне температур 1100…1190 °С.

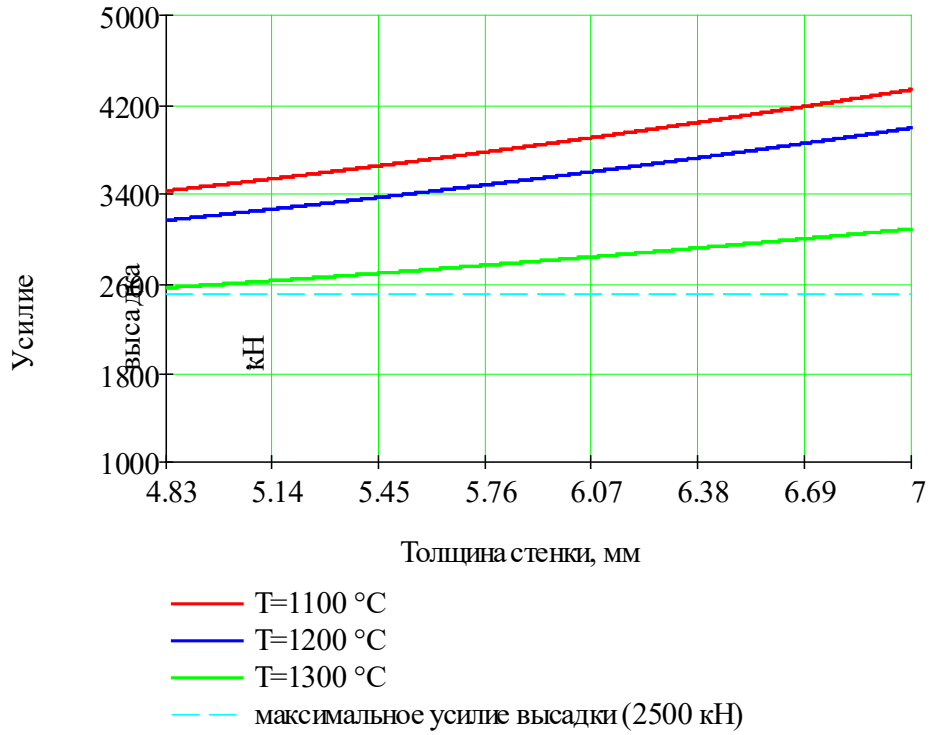


Рисунок 3.27 – Зависимость усилия высадки от толщины стенки при различных значениях температуры нагрева НКТ ($\psi_{пуан} = \psi_{матр} = 0{,}5$; материал – сталь 15Х5МФБ; $\Delta h = 0$ мм; $L = 340$ мм; $l = 470$ мм; $\vartheta = 95$ мм/с)

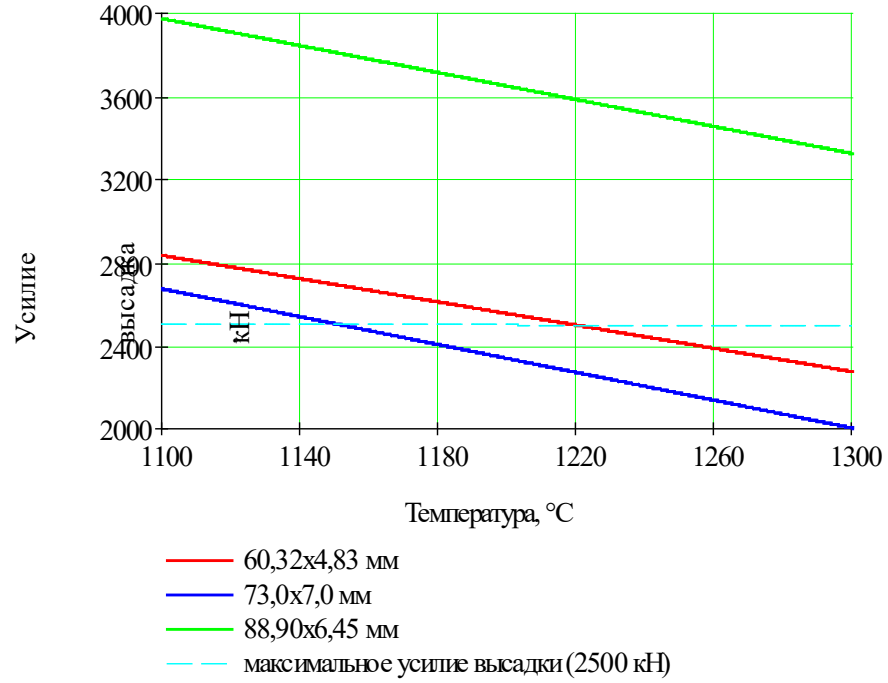


Рисунок 3.28 – Зависимость усилия высадки от температуры нагрева концов НКТ при удлиненной высадке ($\psi_{пуан} = \psi_{матр} = 0{,}5$; материал – сталь 15Х5МФБ)

Таблица 3.22 – Энергосиловые параметры процесса высадки НКТ при различных материалах при удлиненной высадке

Типоразмер	Материал	Усилие высадки, кН
60,32х4,83	18Х3МФБ	2025
	18ХМФБ	1790
73,0х7,0	18Х3МФБ	1785
	18ХМФБ	1620
88,90х6,45	18Х3МФБ	2790
	18ХМФБ	2360

При температуре нагрева концов труб НКТ 1300 °С наблюдается превышение усилия развиваемого прессом на типоразмере 88,90х6,45 мм из стали 18Х3МФБ (табл. 3.22).

В результате проведения параметрического анализа на примере заготовки типоразмера 73,02х5,51 мм из стали 15Х5МФБ, имеющей исходную разнотолщинность, получены зависимости усилия высадки в зависимости от марки стали, толщины стенки, величины разнотолщинности заготовки (при равных значениях показателя трения на матрице и пуансоне $\psi_{пуан} = \psi_{матр} = 0{,}5$), представленные на рис. 3.29-3.31.

Как следует из полученных графиков, наличие разнотолщинности заготовки ведет к росту усилия высадки во всем диапазоне толщин стенки и температур при увеличении толщины стенки и уменьшении температуры нагрева исходной заготовки в индукторе. Наибольшие усилий при наружной высадке концов труб при одинаковых значениях толщины стенки, максимальном значении разнотолщинности заготовки равном 1,2 мм, температуре нагрева 1300 °С, получены для марки стали 15Х5МФБ: 4328 кН при толщине стенки 7,0 мм. Наименьшие – для стали 18ХМФБ – 3629 кН при толщине стенки 4,83 мм. Максимальное различие усилий во всем диапазоне толщины стенки при этом получено для стали 18ХМФБ и составляет 92,7%.

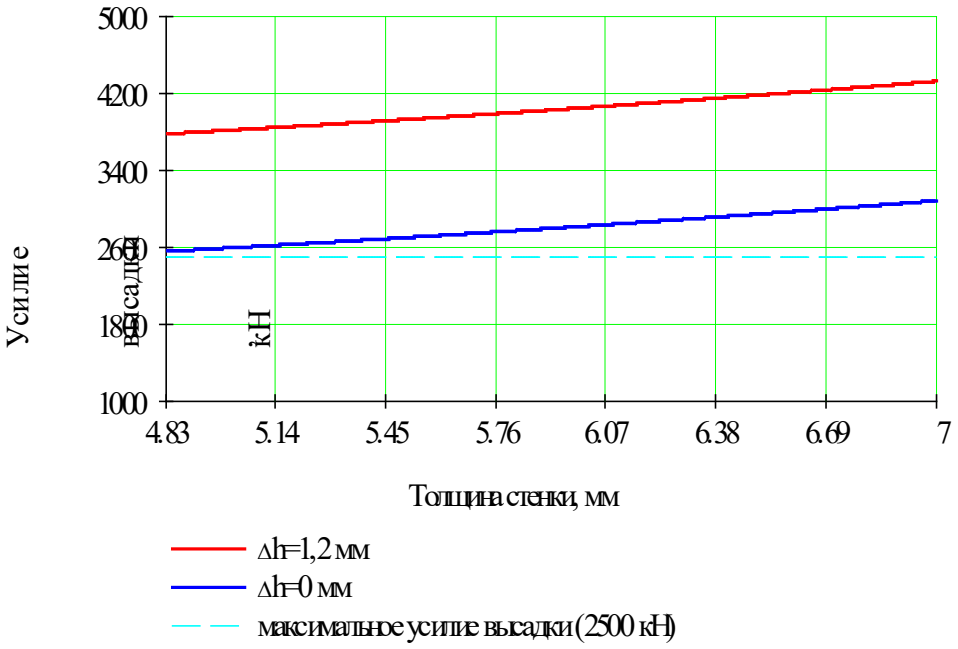


Рисунок 3.29 – Зависимость усилия высадки от толщины стенки при различных значениях разнотолщинности НКТ
(T = 1300 °C; $\psi_{пуан} = \psi_{матр}$ = 0,5; материал – сталь 15Х5МФБ;
L = 340 мм; l = 470 мм; ϑ = 95 мм/с)

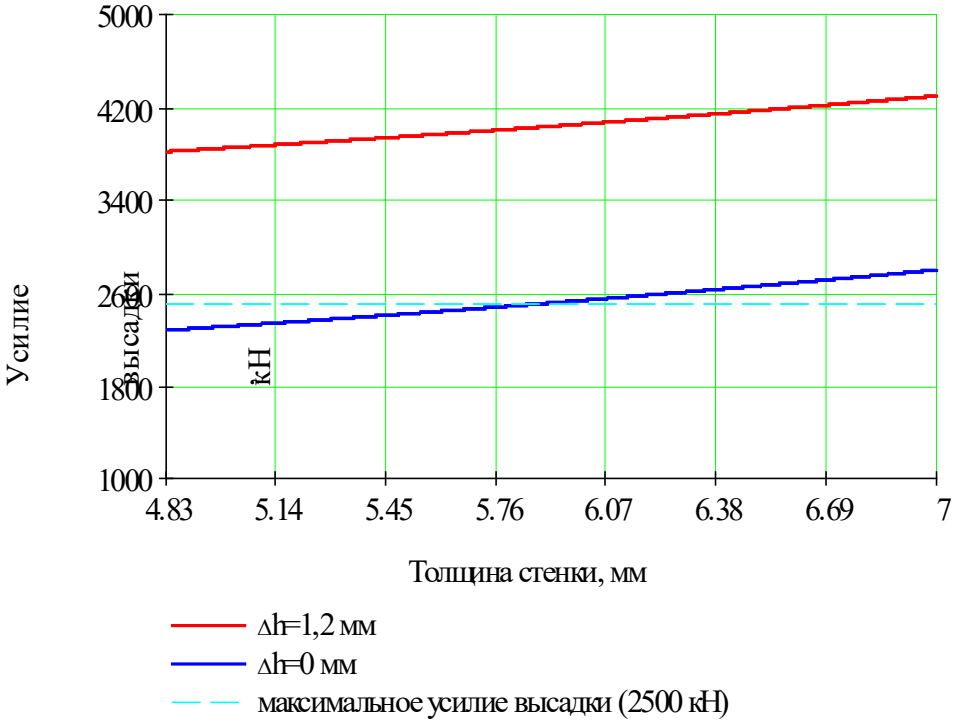


Рисунок 3.30 – Зависимость усилия высадки от толщины стенки при различных значениях разнотолщинности НКТ
(T = 1300 °C; $\psi_{пуан} = \psi_{матр}$ = 0,5; материал – сталь 18Х3МФБ;
L = 340 мм; l = 470 мм; ϑ = 95 мм/с)

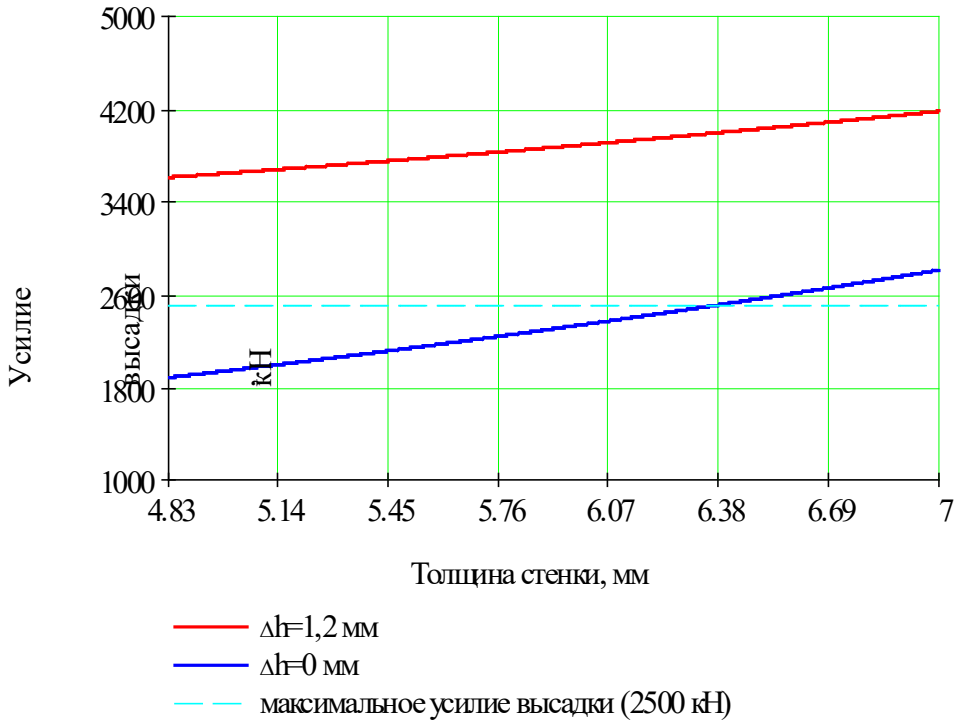


Рисунок 3.31 – Зависимость усилия высадки от толщины стенки при различных значениях разнотолщинности НКТ (T = 1300 °С; $\psi_{пуан} = \psi_{матр}$ = 0,5; материал – сталь 18ХМФБ; L = 340 мм; l = 470 мм; ϑ = 95 мм/с)

3.4.3 Анализ влияния условий трения

При изучении влияния трения на процесс удлиненной наружной высадки концов труб рассматривался случай высадки заготовок типоразмера 73,02х5,51 мм из стали 15Х5МФБ, при температуре нагрева в индукторе равной 1300 °С. Значения показателя трения на поверхностях матрица-заготовка и пуансон-заготовка принимались согласно табл. 3.23. В результате были определены значения усилий высадки при различных сочетаниях условий трения.

Таблица 3.23 – Значения усилия высадки при различных условиях трения

Показатель трения на матрице $\psi_{матр}$	Показатель трения на пуансоне $\psi_{пуан}$	Усилие высадки, кН
0,1	0,1	806
0,1	1,0	952
0,5	0,5	2620
1,0	0,1	4467
1,0	1,0	6920

Как следует из представленных данных при значениях показателя трения $\psi_{пуан} = \psi_{матр} = 0{,}1$ получено минимальное значение усилия высадки равное 806 кН. Максимальное значение усилия высадки, равное 6920 кН, достигнуто при $\psi_{пуан} = \psi_{матр} = 1{,}0$, т.е. большее в 8,6 раза, что говорит о значительном влиянии условий трения на усилие высадки. При уменьшении показателя трения на поверхности матрица-заготовка ($\psi_{пуан} = 1{,}0$ и $\psi_{матр} = 0{,}1$) усилие уменьшается в 7,3 раза, а при уменьшении показателя трения на поверхности пуансон-заготовка ($\psi_{пуан} = 0{,}1$ и $\psi_{матр} = 1{,}0$) усилие высадки уменьшается в 1,5 раза от максимального значения при $\psi_{пуан} = \psi_{матр} = 1{,}0$. При одинаковых показателях трения $\psi_{пуан} = \psi_{матр} = 0{,}5$ усилие высадки составляет 2620 кН.

Определение усилий высадки для типоразмеров труб 60,32х4,83 мм, 73,0х7,0 мм, 88,90х6,45 мм, с целью изучения влияния условий трения, производилось на примере заготовки из стали 15Х5МФБ при нагреве до температуры 1300 °С, при изменении показателя трения в диапазоне 0,1…1,0. Полученные зависимости изображены на рис. 3.32.

Как видно из графиков, усилие высадки увеличивается с ростом показателя трения. При изменении показателя трения с 0,1 до 1,0 это увеличение составляет при удлиненной высадке концов труб: для типоразмера 60,32х4,83 мм – 7,75 раза, для 73,0х7,0 мм – 6,7 раза, для 88,90х6,45 мм – 9,53 раза. Кроме того, были определены значения усилий высадки при различных сочетаниях условий трения на границах металла с матрицей и металла с пуансоном для рассматриваемых типоразмеров труб (табл. 3.24).

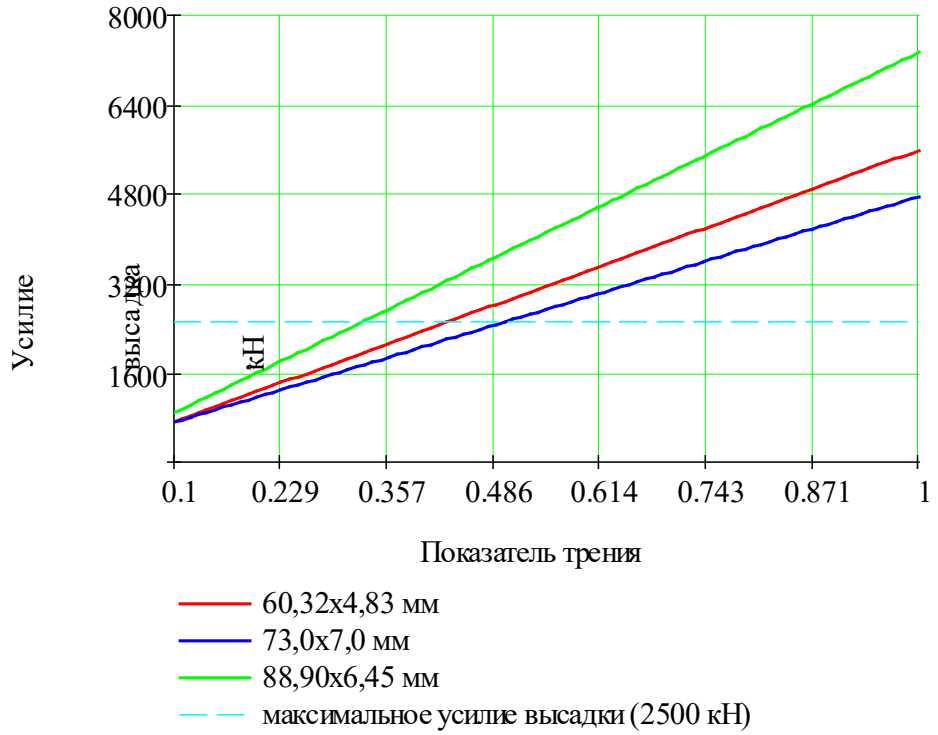


Рисунок 3.32 – Зависимость усилия высадки
от показателя трения при удлиненной высадке
($T = 1300$°C; материал – сталь 15Х5МФБ)

Таблица 3.24 – Значения усилия высадки при различных условиях трения при удлиненной высадке

Типоразмер	Показатель трения на пуансоне $\psi_{пуан}$	Показатель трения на матрице $\psi_{матр}$	Усилие высадки, кН
60,32x4,83	0,1	0,1	710
	1,0	0,1	1470
	0,5	0,5	2275
	0,1	1,0	3010
	1,0	1,0	5580
73,0x7,0	0,1	0,1	710
	1,0	0,1	1380
	0,5	0,5	2005
	0,1	1,0	2840
	1,0	1,0	4755
88,90x6,45	0,1	0,1	770
	1,0	0,1	1050
	0,5	0,5	3325
	0,1	1,0	5260
	1,0	1,0	7340

Как следует из представленных данных, при значениях показателя трения $\psi_{пуан} = \psi_{матр} = 0{,}1$ получены минимальные значения усилия высадки, равные 710 кН на типоразмере 60,32х4,83 мм. Максимальные значение усилия высадки, равные 7340 кН получены при $\psi_{пуан} = \psi_{матр} = 0{,}1$ на типоразмере 88,90х6,45 мм.

3.4.4 Анализ влияния скорости движения пуансона

Рассмотрение влияния скорости перемещения пуансона на усилие высадки концов труб проводилось на примере высадки заготовки 73,02х5,51 мм из стали 15Х5МФБ, при температуре нагрева в индукторе $T = 1300$ °С, разнотолщинности, равной $\Delta h = 1{,}2$ мм, показателях трения $\psi_{пуан} = \psi_{матр} = 0{,}5$. В результате расчета построена зависимость, изображенная на рис. 3.33.

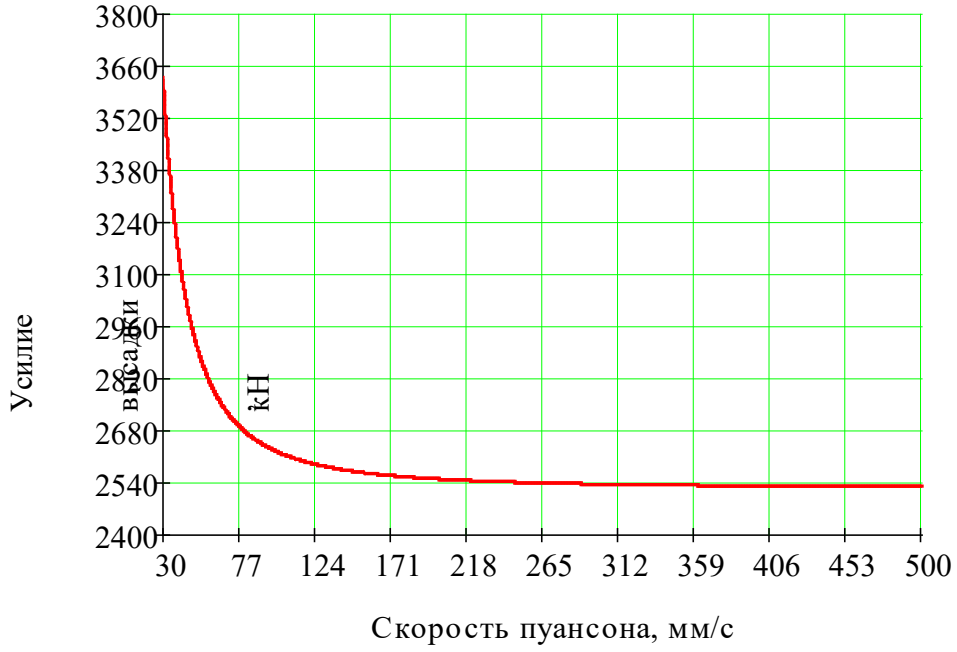


Рисунок 3.33 – Зависимость усилия высадки от скорости перемещения пуансона ($T = 1300$ °С; $\psi_{пуан} = \psi_{матр} = 0{,}5$; материал – сталь 15Х5МФБ; $h = 5{,}51$ мм; $\Delta h = 1{,}2$ мм; $L = 340$ мм; $l = 470$ мм)

Анализ данной зависимости говорит о резком падении усилия при увеличении скорости перемещения пуансона от 30 до 180 мм/с (снижение составляет 29,7%). В дальнейшем на участке от 180 до 500 мм/с наблюдается более плавное снижение усилия, которое составляет 0,9%.

3.4.5 Сравнение усилий прямого хода при стандартной и удлиненной высадках

Для оценки технологического ресурса пресса для высадки труб SMS Meer на рис. 3.34-3.42 приведены совместные графики изменения усилия прямого хода пуансона в зависимости от толщины стенки трубы при высадке концов НКТ стандартного и удлиненного размера. Для стали марки 15Х5МФБ на типоразмере 73,02х5,51 мм проведено сравнение величин усилий при различных температурах. Максимальное различие в величинах усилий при стандартной и удлиненной высадках получено при температуре 1200 °С и толщине стенки 4,83 мм и составляет 95,7% (рис. 3.34-3.36).

Для стали марки 18Х3МФБ совместный график усилий при двух типах высадки концов НКТ представлен на рис. 3.37. Максимальное различие в величинах усилий составляет 82,2%. Аналогичный график зависимости усилия высадки от толщины стенки НКТ для стали марки 18ХМФБ представлен на рис. 37. Максимальное различие усилий составляет 52,7%.

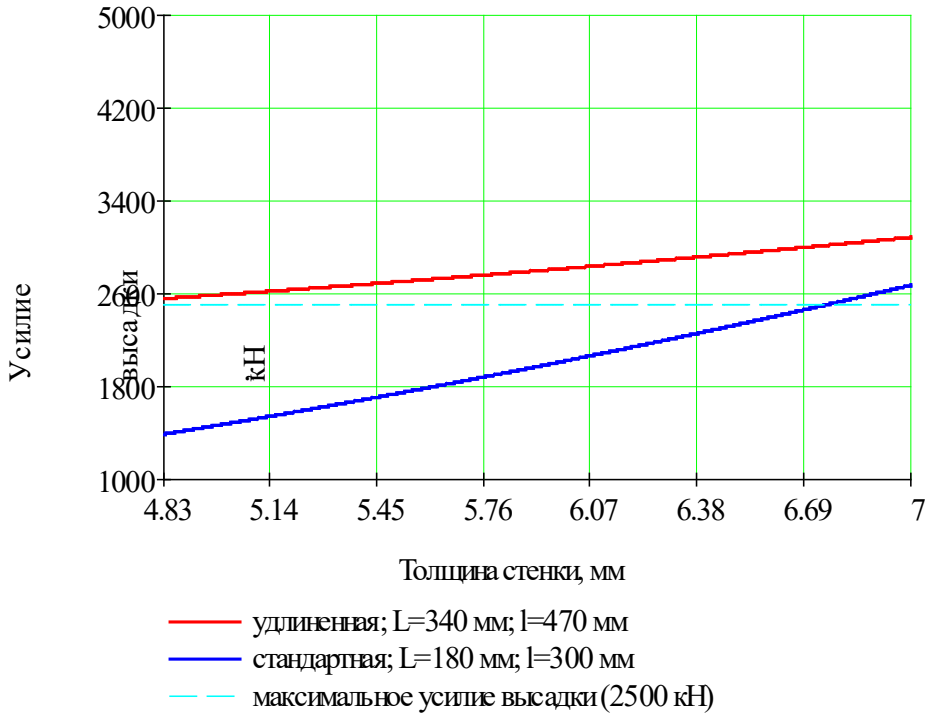


Рисунок 3.34 – Зависимость усилия высадки от толщины стенки при стандартной и удлиненной высадке (T = 1300 °С; $\psi_{пуан} = \psi_{матр} = 0{,}5$; $\Delta h = 0$ мм; материал – сталь 15Х5МФБ; $\vartheta = 95$ мм/с)

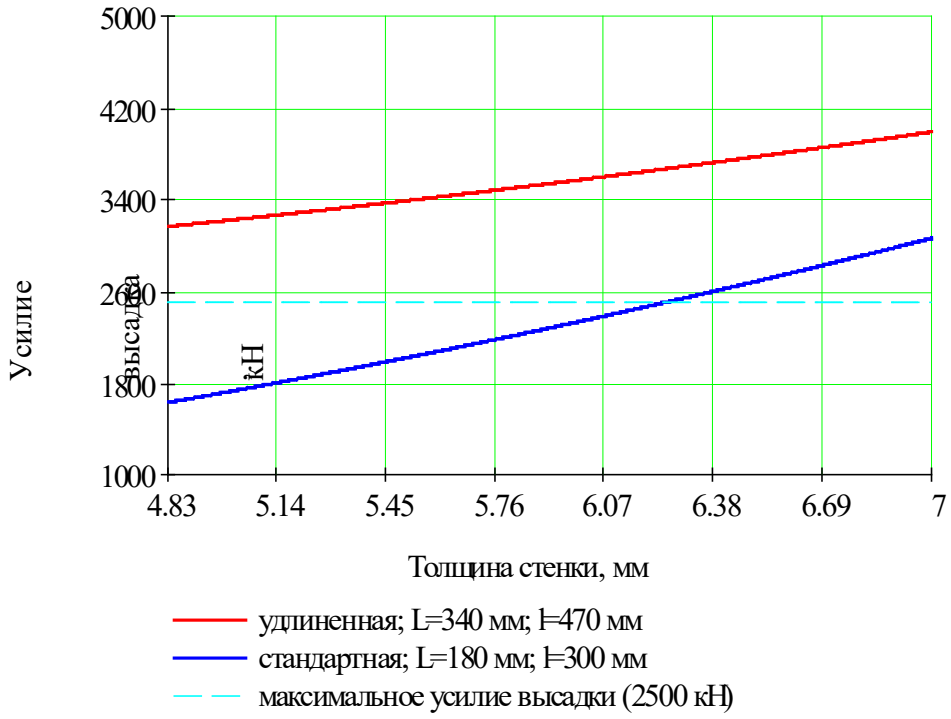


Рисунок 3.35 – Зависимость усилия высадки от толщины стенки нагрева НКТ при стандартной и удлиненной высадке ($T = 1200$ °C; $\psi_{пуан} = \psi_{матр} = 0{,}5$; $\Delta h = 0$ мм; материал – сталь 15Х5МФБ; $\vartheta = 95$ мм/с)

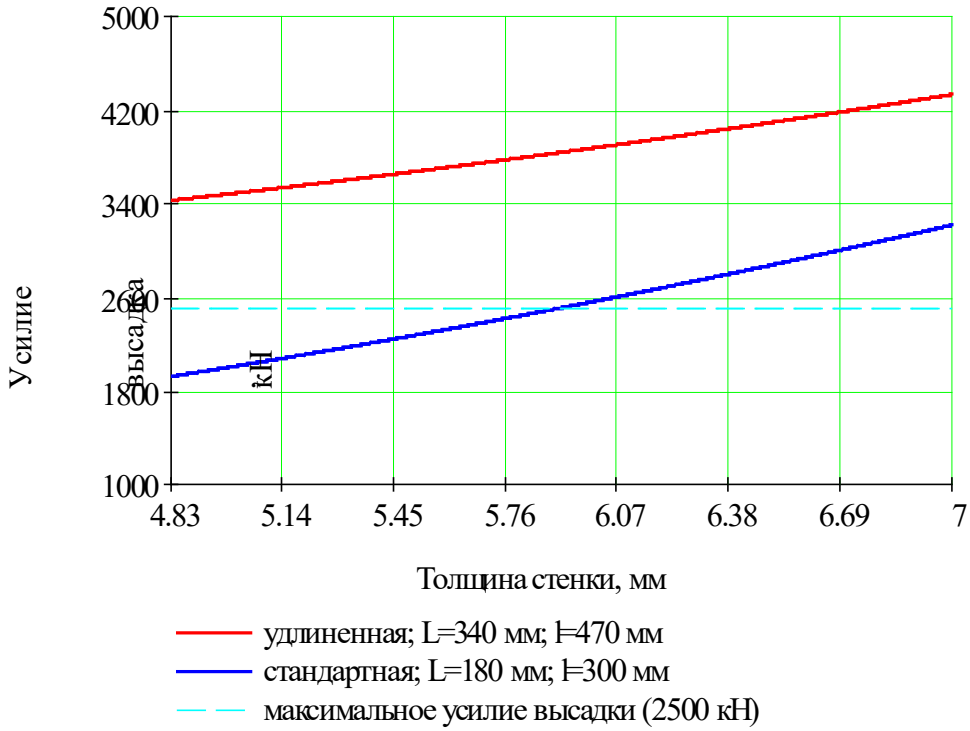


Рисунок 3.36 – Зависимость усилия высадки от толщины стенки нагрева НКТ при стандартной и удлиненной высадке ($T = 1100$ °C; $\psi_{пуан} = \psi_{матр} = 0{,}5$; $\Delta h = 0$ мм; материал – сталь 15Х5МФБ; $\vartheta = 95$ мм/с)

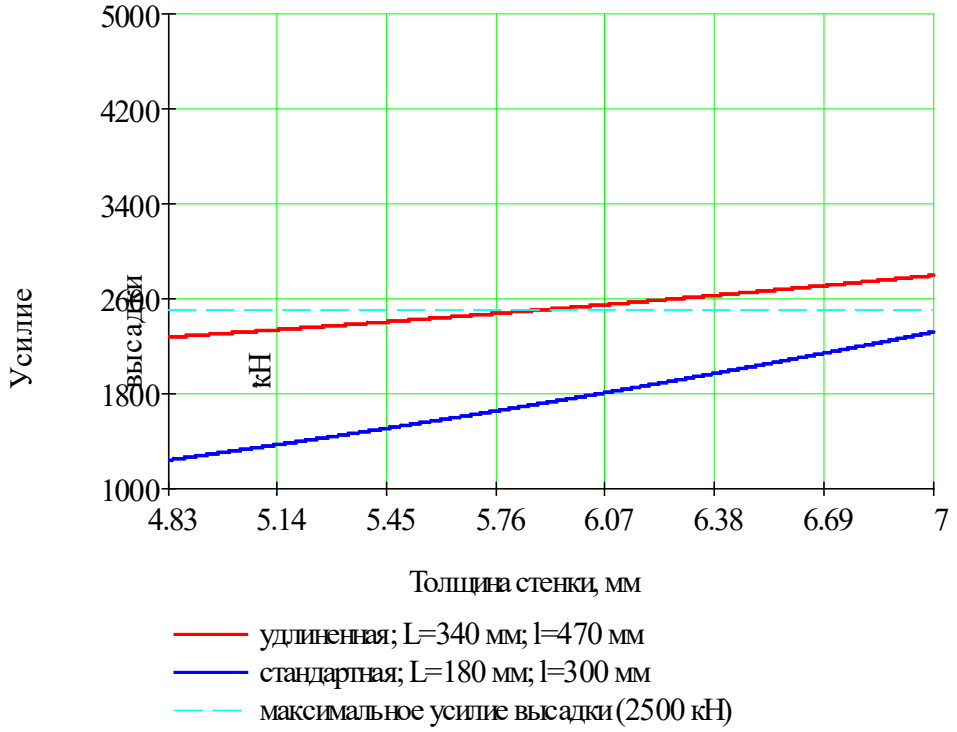


Рисунок 3.37 – Зависимость усилия высадки от толщины стенки при стандартной и удлиненной высадке ($T = 1300$ °C; $\psi_{пуан} = \psi_{матр} = 0{,}5$; $\Delta h = 0$ мм; материал – сталь 18Х3МФБ; $\vartheta = 95$ мм/с)

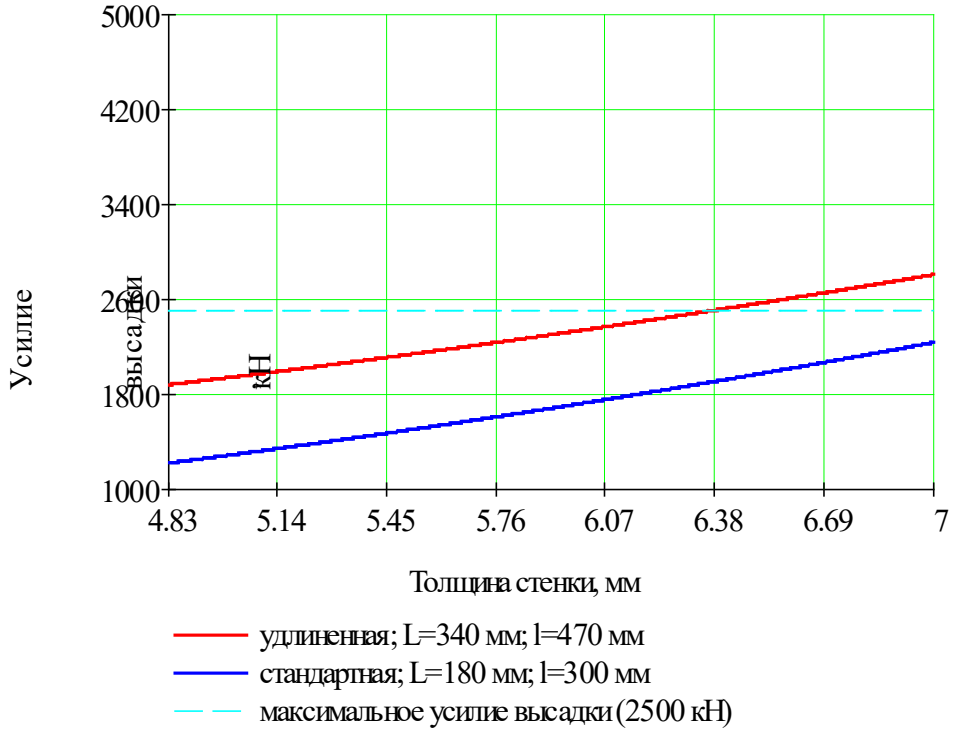


Рисунок 3.38 – Зависимость усилия высадки от толщины стенки при стандартной и удлиненной высадке ($T = 1300$ °C; $\psi_{пуан} = \psi_{матр} = 0{,}5$; $\Delta h = 0$ мм; материал – сталь 18ХМФБ; $\vartheta = 95$ мм/с)

В рамках моделирования процессов высадки концов НКТ на высадочном прессе SMS Meer проведено исследования влияния разнотолщинности стенки труб типоразмера 73,02х5,51 мм на характер изменения усилия в зависимости от толщины стенки. В результате построены совместные графики изменения усилия для стандартной и увеличенной длины высадки концов НКТ, которые показаны на рис. 3.39-3.41. Максимальное отклонение в усилиях при разнотолщинности 1,2 мм получено для стали марки 18Х3МФБ и равно 47,8%, минимальное для марки стали 15Х5МФБ – 39,8%.

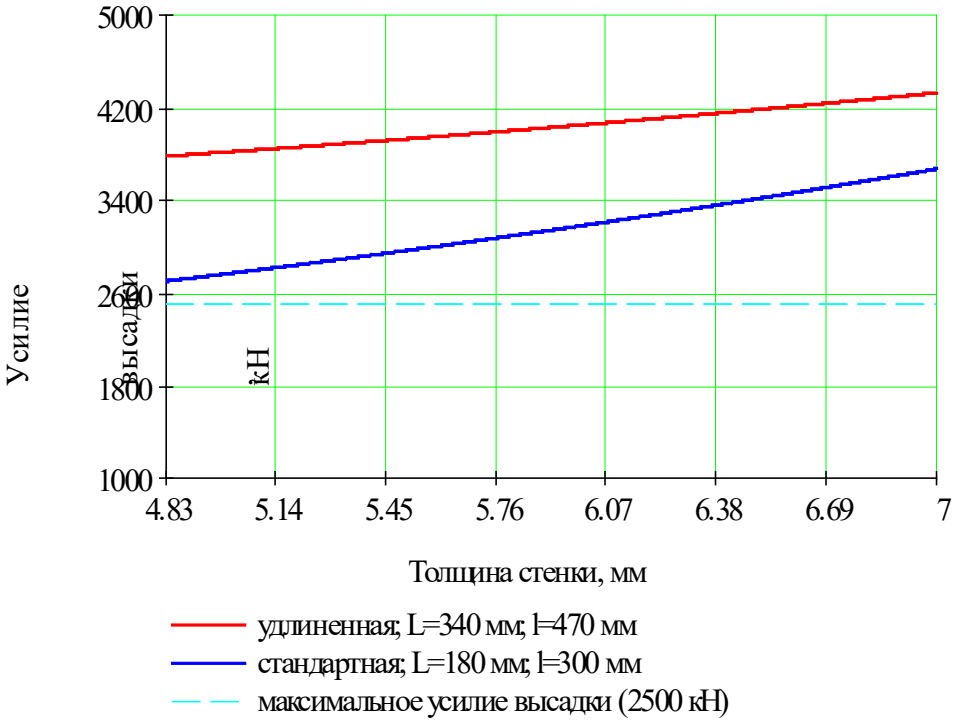


Рисунок 3.39 – Зависимость усилия высадки от толщины стенки при различных значениях разнотолщинности НКТ при стандартной и удлиненной высадке (T = 1300 °С; $\psi_{пуан} = \psi_{матр} = 0{,}5$; $\Delta h = 1{,}2$ мм; материал – сталь 15Х5МФБ; $\vartheta = 95$ мм/с)

На рис. 3.42 также построен совместный график зависимостей длин высаженной части от первоначальной толщины стенки трубы при нулевом значении поперечной разнотолщинности.

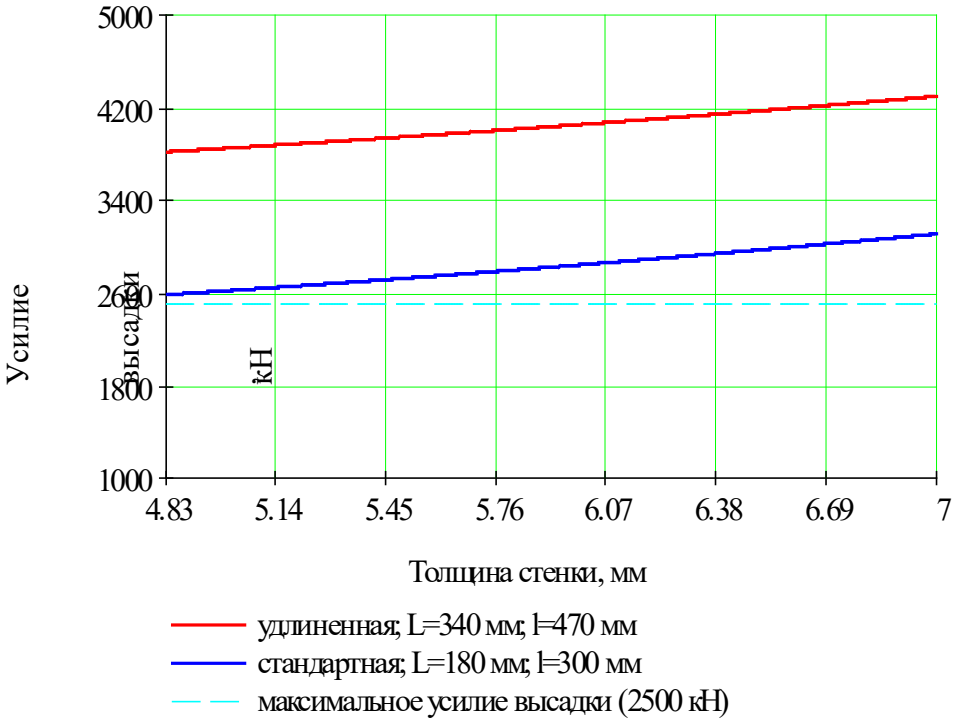


Рисунок 3.40 – Зависимость усилия высадки от толщины стенки при различных значениях разнотолщинности НКТ при стандартной и удлиненной высадке (T = 1300 °C; $\psi_{пуан} = \psi_{матр}$ = 0,5; Δh = 1,2 мм; материал – сталь 18Х3МФБ; ϑ = 95 мм/с)

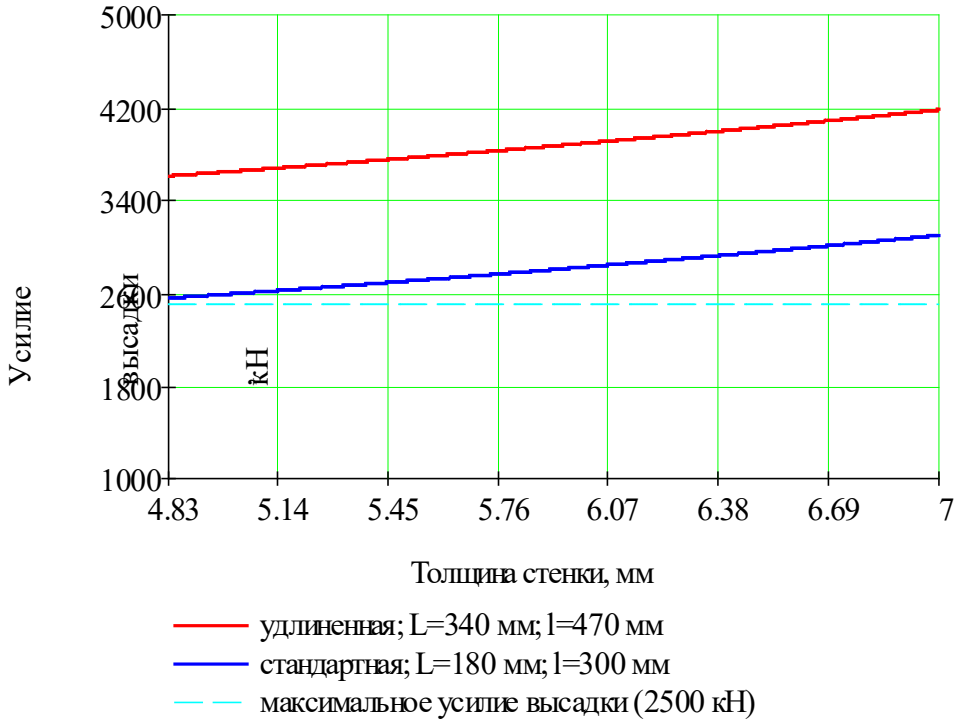


Рисунок 3.41 – Зависимость усилия высадки от толщины стенки при различных значениях разнотолщинности НКТ при стандартной и удлиненной высадке (T = 1300 °C; $\psi_{пуан} = \psi_{матр}$ = 0,5; Δh = 1,2 мм; материал – сталь 18ХМФБ; ϑ = 95 мм/с)

Используя результаты расчета, представленные на рис. 3.36-3.38, а также рис. 3.42, с достаточной степенью точности можно определить максимально возможную длину высаженной части для марок сталей 15Х5МФБ, 18Х3МФБ и 18ХМФБ с учетом максимального усилия развиваемого прессом SMS Meer в 2500 кН для диапазонов толщин стенок от номинальной и ниже (4,83…6,19 мм).

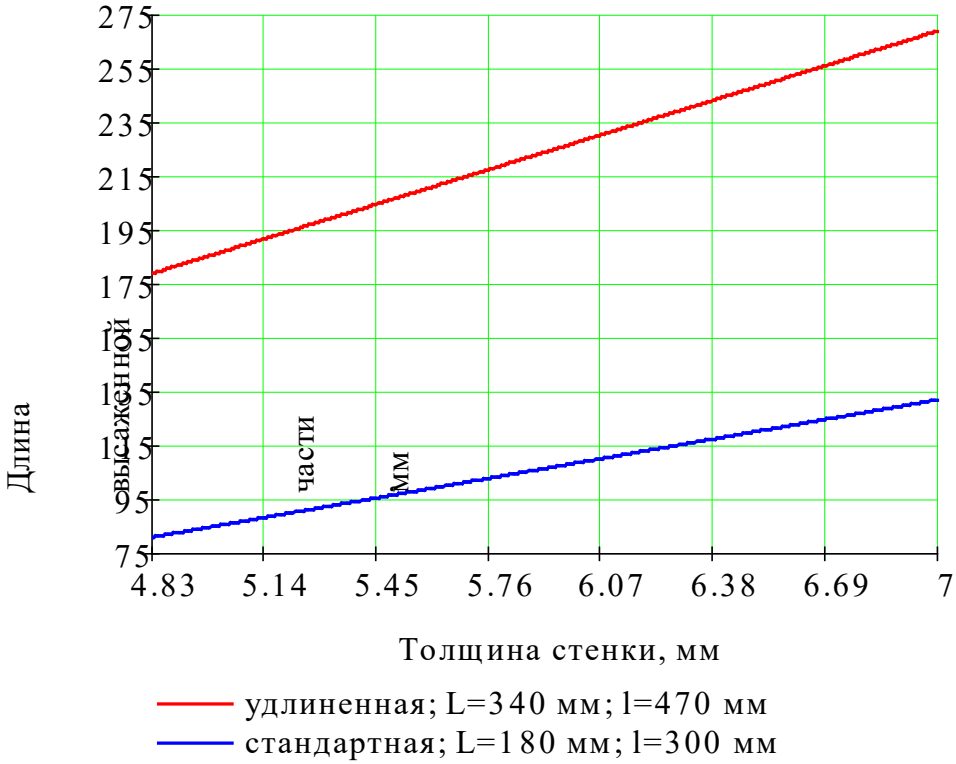


Рисунок 3.42 – Зависимость длины высаженной части НКТ от толщины стенки при полном заполнении рабочего пространства между матрицей и пуансоном при стандартной и удлиненной высадке (T = 1300 °C; $\psi_{пуан} = \psi_{матр}$ = 0,5; Δh = 0 мм; L = 340 мм; l = 470 мм; ϑ = 95 мм/с)

При этом используем выражение вида:

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

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 $l_{max} \leq l_{удл}$.

Например, при толщине стенки 5,51 мм при нулевой разнолтолщинности $\Delta h = 0$ мм; длине рабочей части пуансона $L = 340$ мм; длине нагрева заготовки $l = 470$ мм от конца трубы и показателях трения на инструменте $\psi_{\text{пуан}} = \psi_{\text{матр}} = 0{,}5$ для стали 15Х5МФБ после подстановки соответствующих величин имеем $l_{\max} = 183{,}7$ мм, для стали 18Х3МФБ $l_{\max} = 207$ мм; 18ХМФБ – $l_{\max} = 207$ мм. При толщинах стенки большей 6,19 мм имеет место ярко выраженная зависимость $l_{\max}$ от длины рабочего участка пуансона. В этом случае наблюдается разный характер взаимодействия пуансона с длиной рабочего участка 180 мм в случае высадки стандартного участка и пуансона с длиной рабочего участка 340 мм в случае высадки удлиненного участка с металлом.

Проведен также параметрический анализ с целью определения максимально возможной длины высаженной части трубы при номинальных размерах для типоразмеров труб 60,32х4,83 мм, 73,0х7,0 мм, 88,90х6,45 мм, исходя из условия технических возможностей пресса по усилию высадки.

В результате численной реализации созданной математической модели при значениях показателя трения на матрице $\psi_{\text{матр}} = 0{,}5$ и пуансоне $\psi_{\text{пуан}} = 0{,}5$, при температуре нагрева $T = 1300$ °С получены зависимости усилия высадки от длины высаженной части трубы для в зависимости от марки стали для труб 60,32х4,83 мм, 73,0х7,0 мм, 88,90х6,45 мм, представленные на рис. 3.43-3.45.

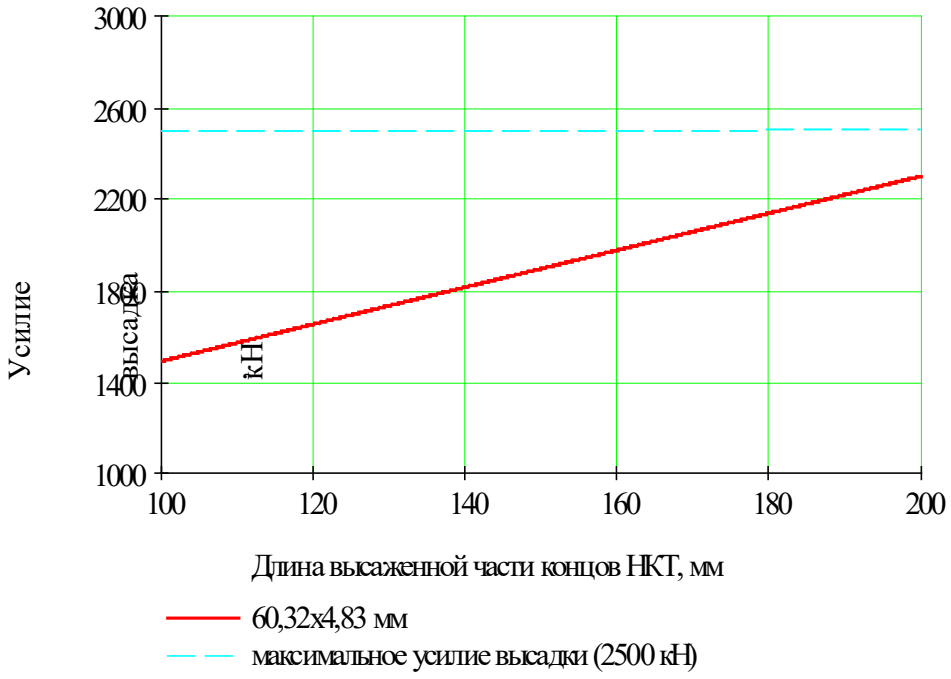


Рисунок 3.43 – Зависимость усилия высадки
от длины высаженной части концов НКТ
($\psi_{пуан} = \psi_{матр} = 0,5$; материал – сталь 15Х5МФБ)

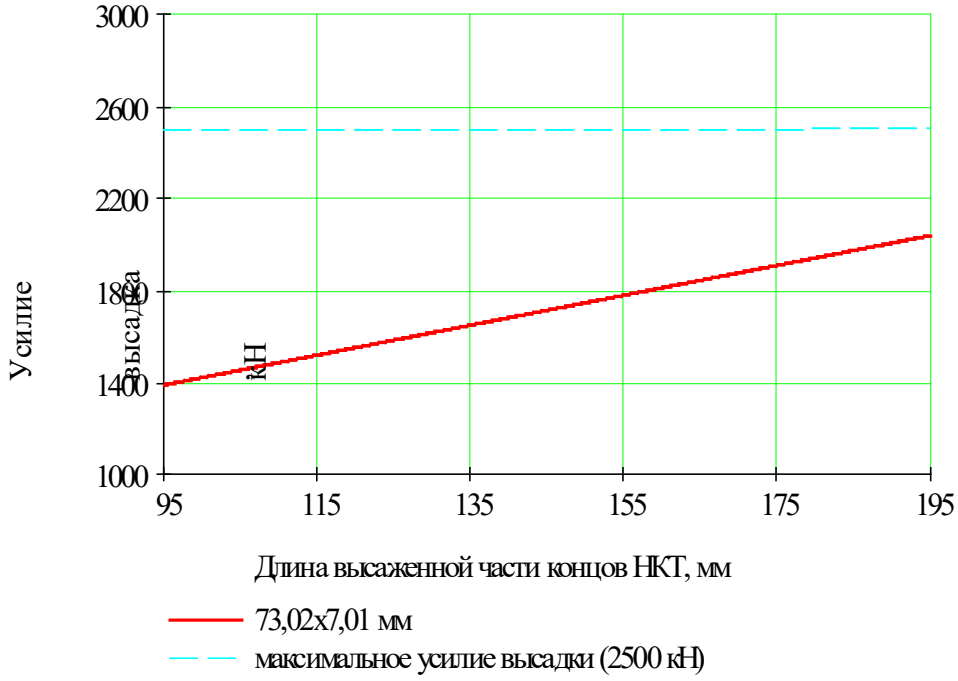


Рисунок 3.44 – Зависимость усилия высадки
от длины высаженной части концов НКТ
($\psi_{пуан} = \psi_{матр} = 0,5$; материал – сталь 15Х5МФБ)

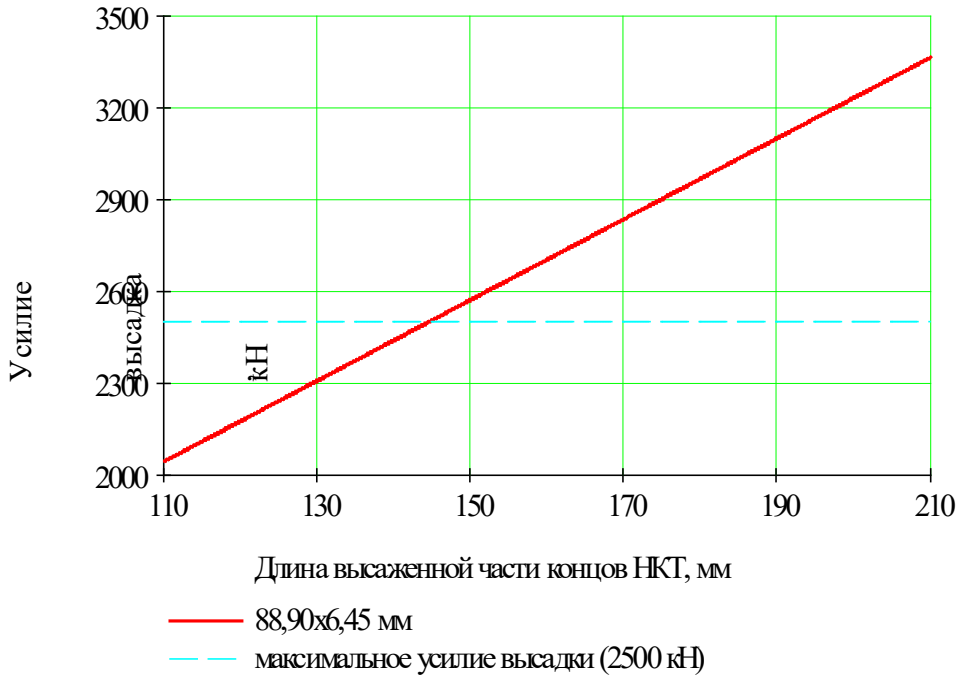


Рисунок 3.45 – Зависимость усилия высадки
от длины высаженной части концов НКТ
($\psi_{пуан} = \psi_{матр} = 0{,}5$; материал – сталь 15Х5МФБ)

Как видно из полученных графиков, усилие высадки не превышает максимальное усилие развиваемое прессом в исследуемом диапазоне длин для типоразмеров труб 60,32х4,83 мм и 73,0х7,0 мм. Для типоразмера 88,90х6,45мм максимальная длина высаженной части трубы ограничена величиной 145мм.

3.4.6 Анализ влияния геометрии инструмента и параметров технологии на нагруженность инструмента

С целью определения оптимальной геометрии пуансона проводилось определение нагрузок, действующих на инструмент и оборудование высадочного пресса при температуре нагрева заготовки 1300 °С из стали 15Х5МФБ при толщине стенки $h = 4{,}83 \ldots 7{,}0$ мм.

Как показали исследования, усилие прямого хода, действующее на пуансон при толщине стенки $h = 4{,}83 \ldots 6{,}19$ мм (6,19 мм – верхнее значение размера толщины стенки для 5,51 мм), практически не зависит от длины рабочего участка пуансона в диапазоне 280…400 мм (различие составляет не

более 5,8% от абсолютной величины). С увеличением толщины стенки происходит изменение характера зависимости. В таблице 3.25 приведены значения усилия высадки, усилия действующего на матрицу, усилия действующего на зажим трубы высадочного пресса, усилия обратного хода от длины рабочего участка пуансона для $h = 7{,}0$ мм (поперечная разнотолщинность заготовки при этом $\Delta h = 0$ мм).

В соответствии с полученными зависимостями усилие, действующее на пуансон, принимает максимальные значения при 280 мм и 400 мм длины рабочего участка пуансона и имеет минимум при 340 мм. Различие усилий при 400 мм и 340 мм составляет 74,3%, а при 280 мм и 340 мм – 25,1%. Усилие, действующее на матрицу высадочного пресса, уменьшается при увеличении длины рабочего участка пуансона в рассматриваемом диапазоне величин с 3400 кН до 2280 кН (в 1,5 раза).

Таблица 3.25 – Энергосиловые параметры процесса высадки НКТ при различных значениях рабочего участка пуансона*

№	Наименование параметра	Длина рабочего участка пуансона L, мм		
		280	340	400
1.	Усилие прямого хода, кН	4150	*3110*	5420
2.	Усилие, действующее на матрицу, кН	3400	*2220*	2280
3.	Усилие, действующее на зажим пресса, кН	*750*	890	3140
4.	Усилие обратного хода, кН	2980	*1910*	2250

* - минимальные значения параметра указаны курсивом

В то же время значение усилия на зажим пресса принимает минимальные значения при наименьшей длине пуансона (снижение величины усилия на зажим пресса при изменении рабочего участка пуансона от 400 мм до 280 мм составляет 4,2 раза). Усилие обратного хода, согласно проведенным расчетам, составляет 2980 кН, 1910 кН, 2250 кН для пуансонов с длиной рабочего участка 280 мм, 340 мм и 400 мм соответственно.

Аналогично были получены значения усилий прямого хода, усилия, действующего на матрицу, зажим пресса при высадке с полным заполнением калибра заготовок из стали 15Х5МФБ с толщиной $\mathrm{h} = 5{,}51$ мм с исходной раз-

нотолщинностью стенки 1,2 мм (таблица 3.26).

Таблица 3.26 – Энергосиловые параметры процесса высадки НКТ при различных значениях рабочего участка пуансона*

№	Наименование параметра	Длина рабочего участка пуансона L, мм		
		280	340	400
1.	Усилие прямого хода, кН	4300	*3230*	4780
2.	Усилие, действующее на матрицу, кН	*520*	730	710
3.	Усилие, действующее на зажим пресса, кН	3780	*2500*	4070

* - минимальные значения параметра указаны курсивом

Согласно табл. 10 оптимальной длиной рабочего участка пуансона по критерию усилий высадки, усилий действующих на матрицу и зажим пресса является длина рабочего участка пуансона равная 340 мм.

Анализ характера распределения нормальных давлений, скоростей течения металла относительно инструмента и их величин, проведённый с целью прогнозирования износа инструмента при высадке концов труб, показал следующее. При заполнении металлом пространства между пуансоном и матрицей на начальном периоде высадки на рабочих участках инструмента изменение давлений и скоростей имеет сходный характер (рис. 3.46 и 3.47).

При этом для пуансонов с длиной рабочего участка 280, 340 и 400 мм при толщине стенки более 6,19 мм может наблюдаться взаимодействие пуансона и матрицы с металлом на участке заходного конуса пуансона и участке матрицы за пределами ее конического участка.

При этом максимальные значения нормальных давлений при высадке концов труб действуют на инструмент в окончании рабочего хода. Наиболее характерной, с точки зрения рассмотрения, является высадка концов труб с толщиной исходной стенки $h = 7{,}0$ мм. Для пуансона с длиной рабочего участка 280 мм характер изменения величины нормального давления (при $h = 7{,}0$ мм) металла на матрицу показан на рис. 3.48, а для пуансонов с длиной рабочей части 340 мм и 400 мм на рис. 3.49 и 3.50 соответственно.

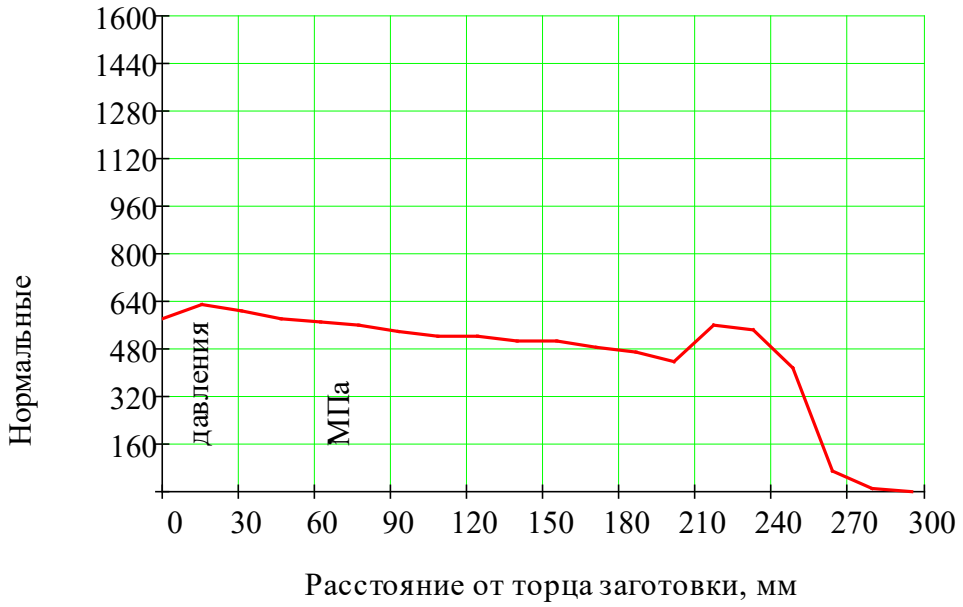


Рисунок 3.46 – Распределение нормальных давлений, действующих на матрицу, по длине рабочей части
(T = 1300 °С; $\psi_{пуан} = \psi_{матр}$ = 0,5; материал – сталь 15Х5МФБ; h = 5,51 мм; Δh = 0 мм; L = 340 мм; l = 470 мм; ϑ = 95 мм/с)

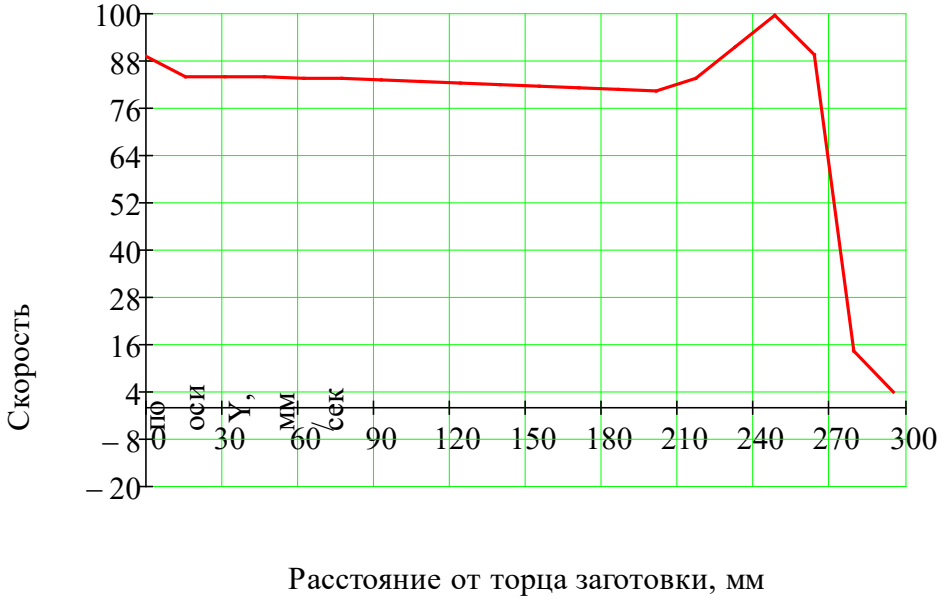


Рисунок 3.47 – Распределение скоростей скольжения металла заготовки по поверхности матрицы на рабочей части
(T = 1300 °С; $\psi_{пуан} = \psi_{матр}$ = 0,5; материал – сталь 15Х5МФБ; h = 5,51 мм; Δh = 0 мм; L = 340 мм; l = 470 мм; ϑ = 95 мм/с)

Рисунок 3.48 – Распределение нормальных давлений, действующих на матрицу, по длине рабочей части
(T = 1300 °С; $\psi_{пуан} = \psi_{матр}$ = 0,5; материал – сталь 15Х5МФБ; h = 7,0 мм; Δh = 0 мм; L = 280 мм; l = 470 мм; ϑ = 95 мм/с)

Рисунок 3.49 – Распределение нормальных давлений, действующих на матрицу, по длине рабочей части
(T = 1300 °С; $\psi_{пуан} = \psi_{матр}$ = 0,5; материал – сталь 15Х5МФБ; h = 7,0 мм; Δh = 0 мм; L = 340 мм; l = 470 мм; ϑ = 95 мм/с)

Рисунок 3.50 – Распределение нормальных давлений, действующих на матрицу, по длине рабочей части
($T = 1300$ °С; $\psi_{пуан} = \psi_{матр} = 0{,}5$; материал – сталь 15Х5МФБ; $h = 7{,}0$ мм; $\Delta h = 0$ мм; $L = 400$ мм; $l = 470$ мм; $\vartheta = 95$ мм/с)

Как видно из полученных зависимостей, минимальные значения нормальных давлений на рабочих участках инструмента получены для пуансона с длиной рабочего участка 340 мм. Кроме того присутствуют участки высоких значений нормальных давлений за коническим переходом матрицы и на заходных участках пуансонов для пуансонов с рабочими участками 340 мм и 400 мм. Для пуансона с рабочим участком 340 мм – максимальные значения нормальных давлений в этой зоне: на матрице – 980 МПа, на пуансоне – 1350 МПа. Максимальные нормальные давления металла на инструмент для пуансона с длиной рабочего участка 400мм: на матрице – 1430 МПа, на пуансоне – 2070 МПа.

При проведении исследований изучались также скорости скольжения металла по поверхности инструмента. На рис. 3.51, 3.52, 3.53 показаны расчетные значения скоростей течения металла в направлении перемещения пуансона.

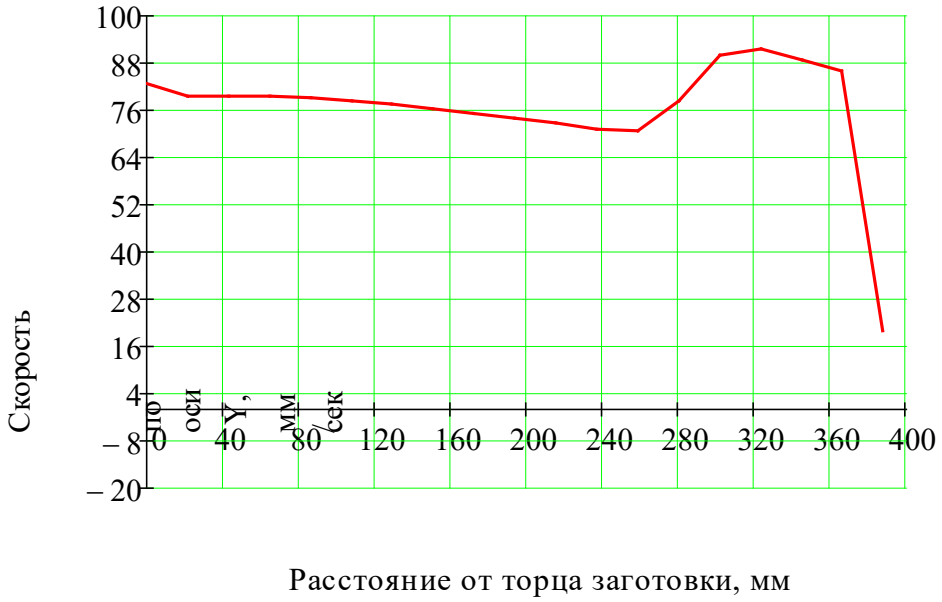


Рисунок 3.51 – Распределение скоростей скольжения металла заготовки по поверхности матрицы на рабочей части (T = 1300 °С; $\psi_{пуан} = \psi_{матр}$ = 0,5; материал – сталь 15Х5МФБ; h = 7,0 мм; Δh = 0 мм; L = 280 мм; l = 470 мм; ϑ = 95 мм/с)

Рисунок 3.52 – Распределение скоростей скольжения металла заготовки по поверхности матрицы на рабочей части (T = 1300 °С; $\psi_{пуан} = \psi_{матр}$ = 0,5; материал – сталь 15Х5МФБ; h = 7,0 мм; Δh = 0 мм; L = 340 мм; l = 470 мм; ϑ = 95 мм/с)

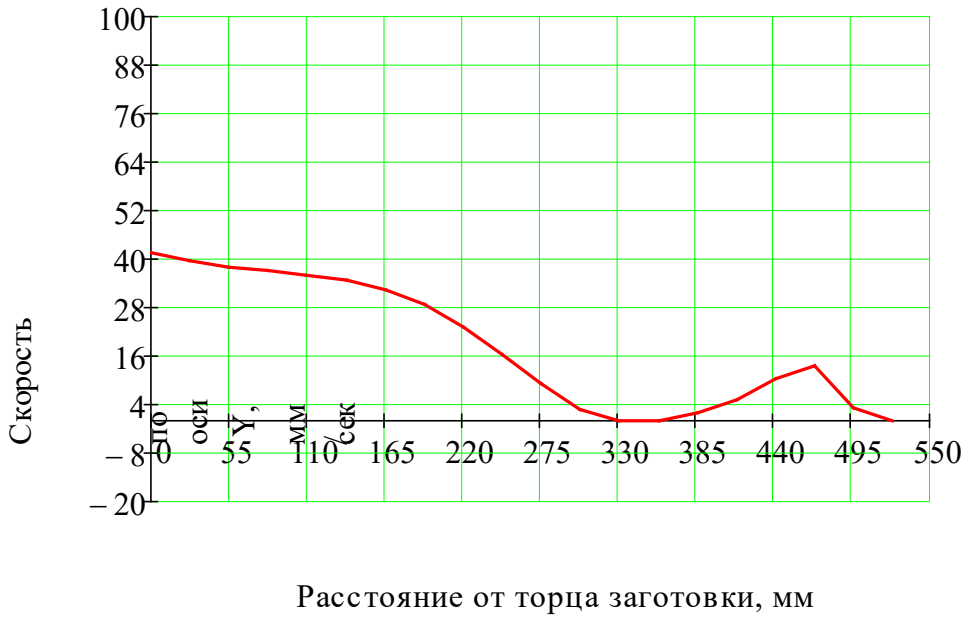


Рисунок 3.53 – Распределение скоростей скольжения металла заготовки по поверхности матрицы на рабочей части (T = 1300 °С; $\psi_{пуан} = \psi_{матр}$ = 0,5; материал – сталь 15Х5МФБ; h = 7,0 мм; Δh = 0 мм; L = 400 мм; l = 470 мм; ϑ = 95 мм/с)

Как следует из полученных зависимостей, скорость скольжения металла по поверхности матрицы в зоне контакта с торцевым участком трубы в окончании рабочего хода (с учетом упругих свойств материала пуансона в расчете) составляют: для пуансона с длиной рабочего участка 280 мм – 82,2 мм/с; для 340 мм – 58,6 мм/с; для 400мм – 41,5 мм/с. Для пуансона с длиной рабочего участка 280 мм скорость скольжения металла по поверхности матрицы в зоне конического перехода (пик нормальных напряжений) в окончании рабочего хода достигает 76,4 мм/с; за коническим переходом матрицы для пуансонов 340 мм и 400 мм (в зонах действия максимальных нормальных напряжений) составляет от 10,3 мм/с до 11,2 мм/с. Скорость скольжения металла по поверхности пуансона на участке заходного конуса пуансона в окончании рабочего хода достигает (в зоне действия максимальных нормальных напряжений): для пуансона с длиной рабочего участка 280 мм – 3,9 мм/с; для пуансонов 340мм и 400мм – 11,0 мм/с и 12,1 мм/с соответственно.

Как известно напряжения, действующие в теле инструмента в процессах ОМД, определяют его работоспособность [84, 85]. Согласно результатам

проведенных расчетов, эквивалентные напряжения в теле пуансона при высадке увеличиваются с увеличением толщины стенки исходной заготовки. Результаты расчета эквивалентных напряжений в теле пуансона для толщины стенки заготовки 7,0 мм (при отсутствии разнотолщинности трубы) показали, что минимальные значения эквивалентных напряжений в окончании рабочего хода действуют в теле пуансона с длиной рабочего участка – 340 мм, и составляют 960 МПа на оси пуансона. Максимальные значения эквивалентных напряжений получены для пуансона с длиной рабочего участка – 400 мм и составляют 1320 МПа. Для пуансона 280 мм – 1200 МПа. Места расположения точек, в которых действуют максимальные значения эквивалентных напряжений, показаны на рис. 3.54.

На поверхности пуансонов получены меньшие значения эквивалентных напряжений. Для пуансона длиной рабочего участка 340 мм величина эквивалентных напряжений, на его поверхности в плоскости перпендикулярной оси пуансона и проходящей через указанную на рис. 3.54, *а* точку минимальна и составляет 780 МПа. Для пуансонов 280 мм и 400 мм – 1060 МПа и 1050 МПа соответственно.

В результате исследований получены также температуры поверхности пуансонов в окончании рабочего хода на участках действия максимальных эквивалентных напряжений: для 280 мм рабочего участка пуансона – 118 °С; 340 мм – 330 °С; 400 мм – 350 °С. (Теплопрочность инструментальных сталей снижается с ростом температуры. Например, для конструкционной легированной стали 38ХН3МФА предел текучести: при 20 °С – 1200 МПа; 100 °С - 1130 МПа; при 400 °С – 980 МПа.).

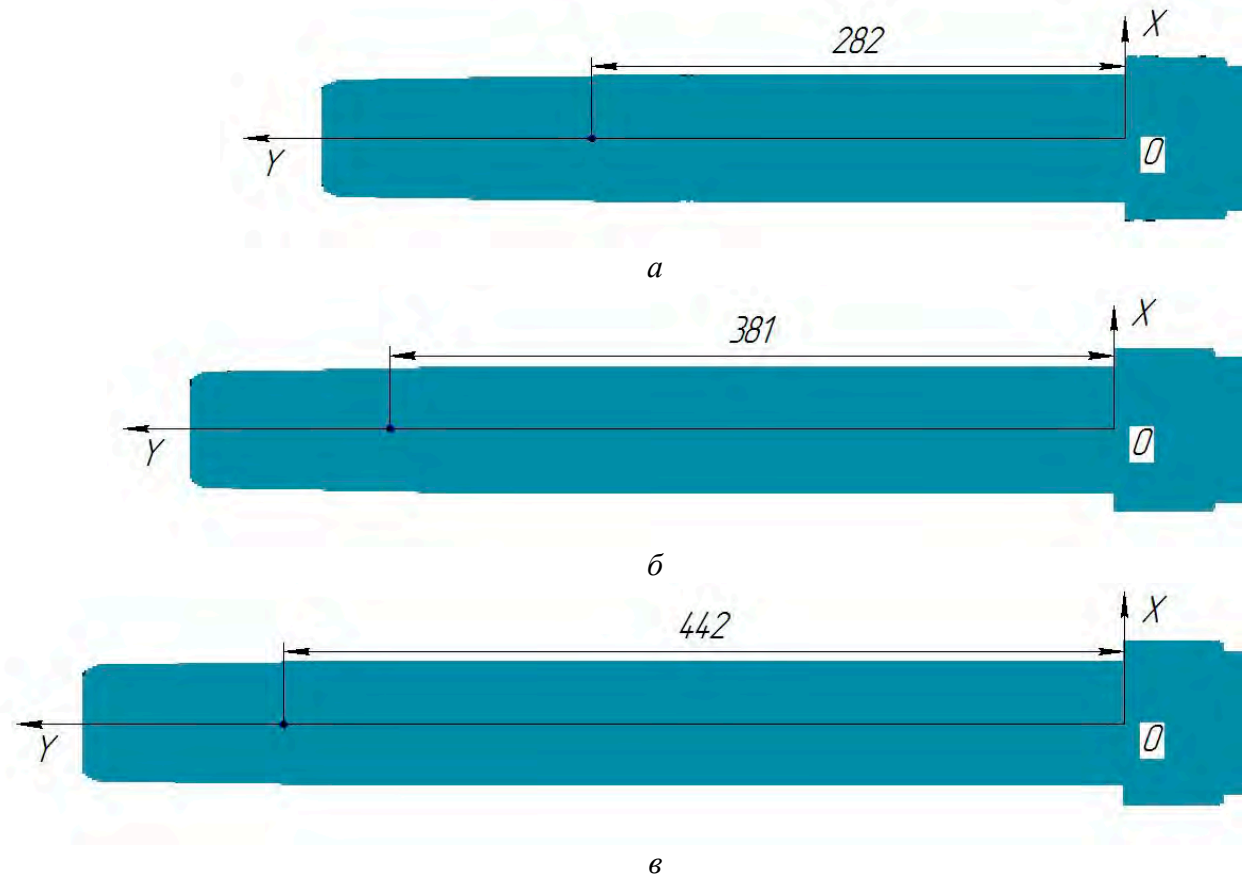


Рисунок 3.54 – Схема расположения точек пуансона, в которых действуют максимальные эквивалентные напряжения в течение процесса высадки (T = 1300 °С; $\psi_{пуан} = \psi_{матр}$ = 0,5; материал – сталь 15Х5МФБ; h = 4,83 мм; l = 470 мм; ϑ = 95 мм/с; *а* – L = 280 мм; *б* – L = 340 мм; *в* – L = 400 мм)

Таким образом, проведенный анализ нагруженности инструмента и оборудования высадочного пресса при высадке концов труб с удлиненной высаженной частью показал, что оптимальной, из рассматриваемых, является конструкция пуансона с рабочим участком 340 мм при этом матрица согласно рис. 1 позволяет производить процесс с получением высаженной части в соответствии с [7].

ВЫВОДЫ

1. Численная реализация созданной математической модели процесса наружной высадки концов труб проведена на примере стандартной и удлиненной высадки концов труб из марок сталей 15Х5МФБ, 18Х3МФБ и 18ХМФБ ряда типоразмеров, путем поиска зависимостей энергосиловых параметров процесса от геометрии высаживаемых труб, температуры и длины зоны нагрева, условий трения на поверхности контакта металла и инструмента, скорости движения пуансона.

2. В результате проведенного анализа установлено, что увеличение толщины стенки трубы, разнотолщинности концов труб, понижение температуры, ухудшение условий трения при высадке ведут росту энергосиловых параметров процесса.

3. Параметрический анализ процесса наружной высадки позволил определить величины длины зон нагрева и скорости движения пуансона при которых энергосиловые параметры достигают минимальных значений.

4. В результате численной реализации созданной математической 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.

5. 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.

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАРУЖНОЙ ВЫСАДКИ КОНЦОВ ТРУБ И ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ В ПРОИЗВОДСТВО

С целью проверки адекватности математических моделей создаваемых для описания реальных технологических процессов проводят экспериментальные исследования данных процессов. Кроме того экспериментальным путем возможно получение исходных данных для теоретического исследования, а также производится проверка принятых при этом допущений.

4.1 Экспериментальное исследование процесса наружной высадки концов труб

4.1.1 Задачи экспериментального исследования

В качестве задач экспериментального исследования процесса наружной высадки концов труб выделим следующие:

1. Исследование реологических свойств коррозионностойких марок стали 18ХМФБ, 18Х3МФБ и 15Х5МФБ в зависимости от термодинамических условий деформирования [86, 87].

2. Определение усилий при наружной высадке концов труб на прессе SMS Meer.

Исследования проводились на автоматизированной пластометрической установке Института машиноведения УрО РАН (рис. 4.1) и прессе для наружной высадки концов труб SMS Meer цеха №4 АО «Первоуральский новотрубный завод».

Установка Института машиноведения УрО РАН обеспечивает максимальную силу деформирования 30 кН и изменение скорости деформации в диапазоне 0,005-10 $с^{-1}$. Перед проведением серии испытаний установка прошла поверку. На основании её было установлено, что комбинированная по-

грешность измерения силы сжатия не превышает 100 Н, а перемещения захватов установки – 20 мкм.

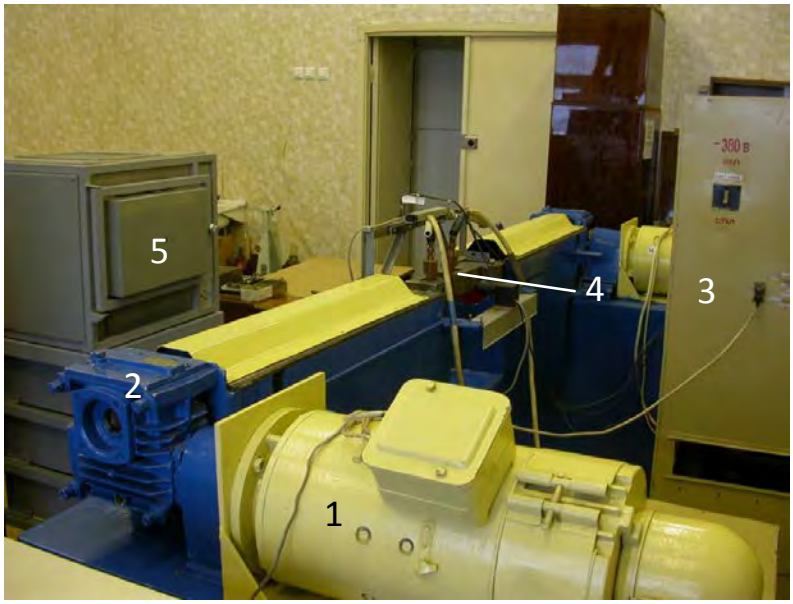


Рисунок 4.1 – Пластометрическая установка
(*1* – электродвигатель; *2* – редуктор; *3* – шкаф управления электроприводом; *4* – захваты; *5* – электропечь для нагрева образцов)

Для предотвращения тепловых потерь в процессе испытания образец обертывается каолиновой ватой и вместе с бойками помещается в контейнер, как показано на рис. 4.2. Контроль температуры образца в процессе нагрева и её изменения внутри контейнера в ходе испытания осуществляется с помощью алюмель-хромелевой термопары.

Собранный контейнер с образцом нагревают в электропечи до температуры испытания и затем переносят из печи в рабочее пространство установки, где проводят деформацию сжатия образца. В качестве смазки между образцом и бойками используют смазку на основе графита.

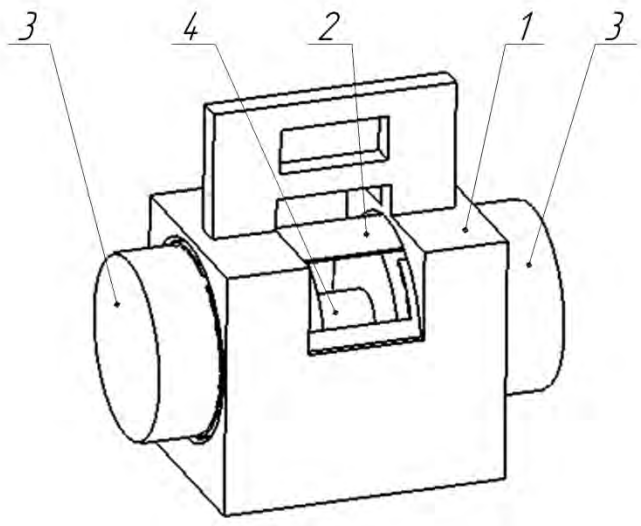


Рисунок 4.2 – Контейнер с образцом и бойками
(1 – корпус; 2 – труба; 3 – боек; 4 – образец)

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 результатов на монитор оператора пресса. Диаметр поршня главного цилиндра пресса равен 360 мм. В качестве заготовки служили трубы сортамента 73,02х5,51 мм из стали 15Х5МФБ.

4.1.2 Исследование реологических свойств коррозионностойких марок стали 18ХМФБ, 18Х3МФБ и 15Х5МФБ в зависимости от термодинамических условий деформирования

Объектом исследования являлись стали следующих марок: 18ХМФБ, 18Х3МФБ, 15Х5МФБ. Для проведения исследований были подготовлены цилиндрические образцы из стали 15Х5МФБ, 18Х3МФБ и 18ХМФБ высотой $h_0 = 9 \pm 0{,}1$ мм и диаметром $d_0 = 6 \pm 0{,}1$ мм. Перед проведением высокотемпературных испытаний термообработка образцов не производилась.

Сжатие образов проводили с переменной скоростью деформации, состоящей из двух участков. На первом участке образец деформировали при по-

стоянной скорости перемещения захватов установки. В результате скорость деформации возрастала за счет уменьшения текущей высоты образца. После выключения электропривода установки образец оставался зажатым бойками, и активное нагружение сменялось стадией релаксации. Такой способ осуществления сжатия образцов обусловлен необходимостью построения адекватной реологической модели сопротивления деформации и сложностью обеспечения в эксперименте постоянства скорости деформации. В экспериментах имел место диапазон скоростей *I*, в котором скорость деформации $\dot{\varepsilon}$ изменялась в пределах 0,02-0,065 $с^{-1}$; диапазон скоростей *II*, в котором скорость деформации $\dot{\varepsilon}$ изменялась в пределах 0,2-0,6 $с^{-1}$ и диапазон скоростей III, в котором скорость деформации $\dot{\varepsilon}$ изменялась в пределах 2,0-6,5 $с^{-1}$. Данная методика проведения экспериментов была разработана и опубликована в ряде статей [88, 89].

Эксперименты на сжатие образцов провели для трех температур испытания 750 °С, 1000 °С и 1150 °С, а также при трех различных скоростных режимах нагружения. Для повышения значимости результатов испытывали от 3 до 5 образцов для каждого набора параметров эксперимента.

На рисунке 4.3 приведен пример опытных данных изменения величины сжатия образца Δh, а на рисунке 4.4 показан пример изменения силы сжатия образца P от времени деформирования t.

Дифференцируя по времени кривые $\Delta h = \Delta h(t)$, рассчитали зависимость скорости изменения высоты $\dot{h}(t)$ образца от времени. Скорость деформации образца $\dot{\varepsilon}$ вычислили по формуле

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{\dot{h}(t)}{h(t)}$$

где $h(t)$ – текущая высота образца в момент времени t, вычисляется по формуле $h(t) = h_0 - \Delta h(t)$

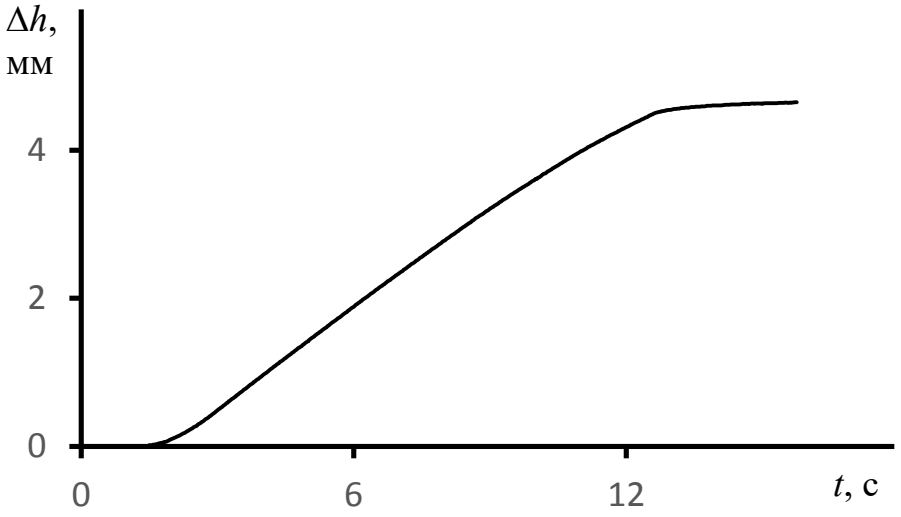


Рисунок 4.3 – Зависимость величины сжатия образца Δh от времени t

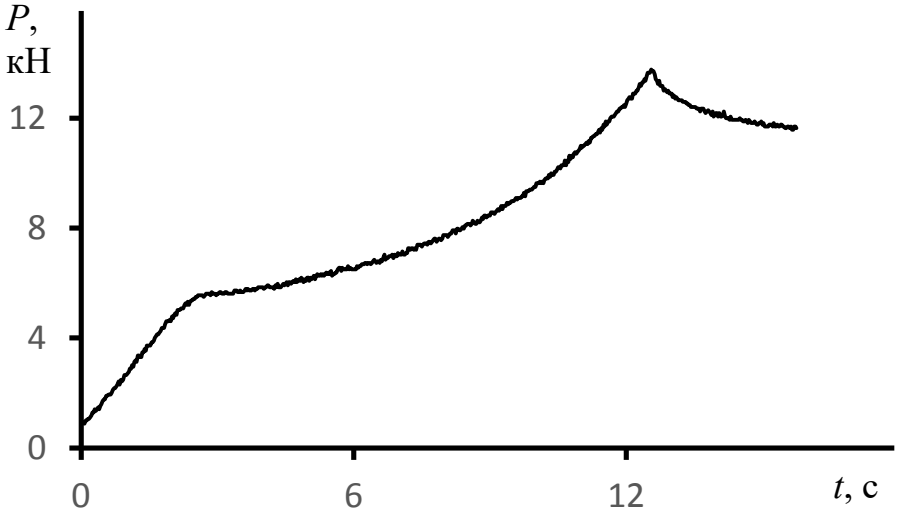


Рисунок 4.4 – Зависимость силы сжатия образца P от времени t

В качестве примера на рис. 4.5 показан вид зависимости скорости деформации образца от времени в одном из экспериментов. Видно, что эта зависимость имеет два участка. На первом участке имеет место активное нагружение, и скорость деформации возрастает, сменяясь затем плавным уменьшением. На втором участке скорость деформации в результате отключения привода установки резко уменьшается, и имеет место релаксация напряжений в зажатом бойками образце.

Степень деформации ε определяли как логарифмическую деформацию следующим образом

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{h_0}{h}\right)$$

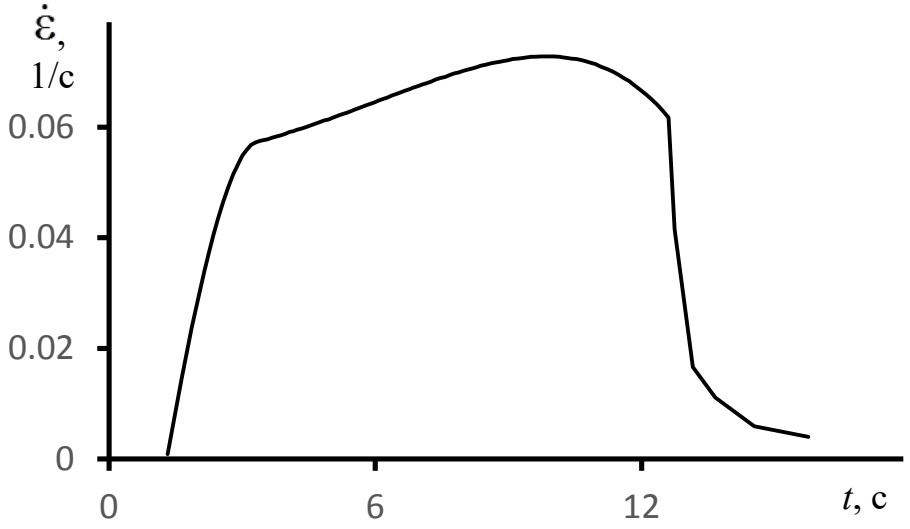


Рисунок 4.5 – Зависимость скорости деформации $\dot{\varepsilon}$ от времени t

Для построения по полученным опытным данным функции сопротивления деформации $\sigma_s = \sigma_s(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$ для каждой температуры испытания применили методику идентификации модели сопротивления деформации, разработанную в Институте машиноведения УрО РАН. Методика опубликована в работах [88-90].

В работе [88] построена математическая реологическая модель сопротивления деформации, описывающая вязкие свойства стали, ее упрочнение и разупрочнение за счет процессов статического и динамического возврата и динамической рекристаллизации. Модель имеет следующий вид (точкой сверху обозначена производная по времени):

$$\sigma_s = \sqrt{3}k + \frac{\sqrt{3}}{2}q \tag{4.1}$$

$$k = a_0 + \rho V_n$$

$$\dot{\rho} = a_1 \cdot e^{-a_2\rho} \cdot \dot{\varepsilon} - a_3\rho \tag{4.2}$$

$$\dot{V}_r = \begin{cases} a_5 \varepsilon_r R^2 \frac{dR}{dt}, \text{если } V_r \leq a_6; \\ \dot{V}_r^{\,*} \left(\frac{1-V_r}{1-a_6}\right)^{a_7}, \text{если } V_r > a_6, \text{где } \dot{V}_r^{\,*} = \dot{V}_r \text{ при } V_r = a_6 \end{cases} \quad (4.3)$$

$$\varepsilon_r = \int_0^t \dot{\varepsilon}\, dt, \frac{dR}{dt} = \dot{\varepsilon}\rho, \text{при } \rho > a_4 \quad (4.4)$$

$$q = a_8 \ln(1 + a_9 \dot{\varepsilon}) \quad (4.5)$$

где V_r – относительная доля объема, в которой прошла динамическая рекристаллизация; остальная доля объема сплава V_n, $V_n + V_r = 1$;

q – функция, описывающая вязкие свойства материала;

ρ – величина, пропорциональная приращению плотности дислокаций за счет пластической деформации;

$\dot{\varepsilon}$ – скорость деформации (для одноосного напряженного состояния при сжатии:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{|\nu|}{h}$$

где ν – скорость перемещения захвата испытательной машины;

h – текущая высота деформируемого образца;

t – время;

ε_r – степень деформации, накопленная до начала динамической рекристаллизации;

R – радиус рекристаллизованного зерна, $R(t_r) = 0$;

t_r – момент времени начала динамической рекристаллизации, определяемый условием $\rho = a_4$;

a_i $(i = 0, \dots, 9)$ – параметры модели, подлежащие идентификации по опытным данным.

В начальный момент времени до деформации принимается $V_n = 1$, $V_r = 0$. Предполагается, что упрочнение происходит в результате увеличения плотности дислокаций, а разупрочнение – за счет процессов динамического и статического возврата, динамической рекристаллизации. Под динамическим возвратом понимается аннигиляция дислокаций, приводимых в движение в результате деформации, а статический возврат происходит за счет диффузи-

онных процессов. Кинетическое уравнение (4.2) описывает упрочнение за счет увеличения плотности дислокаций и разупрочнение за счет процессов возврата, уравнения (4.3), (4.4) моделируют прохождение динамической рекристаллизации, а равенство (4.5) учитывает вязкое проявление свойств сплава.

Предполагается также, что динамическая рекристаллизация начинается при достижении средней по величине критической плотности дислокаций в объеме материала, характеризующейся параметром a_4. Их дальнейший рост подчиняется следующим допущениям: число зародышей рекристаллизации не изменяется после достижения критической плотности дислокаций; динамически рекристаллизованное зерно имеет форму шара; радиус зародыша бесконечно мал; скорость роста зерна может замедляться в результате роста соседних зерен, что определяется достижением V_r значения a_6.

Система уравнений (4.1)-(4.5) представляет физико-механическую иерархическую реологическую модель, описывающую в совокупности вязкие и пластические свойства металла и протекающие процессы пластического упрочнения, статического и динамического возврата и динамической рекристаллизации.

Значения параметров модели сопротивления деформации (4.1)-(4.5) получили отдельно для каждой температуры испытаний. При этом они охватывают весь скоростной диапазон нагружения *I-III*.

Идентификацию параметров модели (4.1)-(4.5) проводили итерационно. На первом шаге полагали, что имеет место однородная деформация с одноосным напряженным состоянием образца. Текущую площадь поперечного сечения образца $F(t)$ определили из условия постоянства объема образца:

$$F(t) = \frac{\pi d_0^2 h_0}{4h(t)}$$

В первом приближении сопротивление деформации $z(t)$ рассчитали по формуле

$$z(t) = \frac{P(t)}{F(t)}$$

Значения коэффициентов модели в первом приближении получали, путем минимизации функции

$$J(a_0, \dots, a_9) = \frac{1}{9}\sum_{j=1}^{9}\int_0^T [\sigma_s(t) - z(t)]^2\, dt \to min \qquad (4.6)$$

где T – время деформации образца;

z и σ_s – экспериментальное и рассчитанное по модели (4.1)-(4.5) значения сопротивления деформации.

Для расчета значений σ_s использовали функцию скорости деформации от времени, которая имела место в соответствующем эксперименте. Идентификацию модели проводили одновременно для всего диапазона скоростей нагружения. Поскольку в экспериментах наблюдается разброс значений силы сжатия P при одной и той же величине Δh, то для каждого диапазона скоростей нагружения при идентификации модели применяли по три экспериментальные зависимости $z(t)$. В результате число экспериментальных зависимостей $z(t)$, используемых при идентификации модели (4.1)-(4.5), составило 9 для конкретной марки стали и температуры испытания.

Поскольку в опытах на сжатие с большими высокотемпературными пластическими деформациями не удается избежать влияния трения на силовые параметры и неоднородность деформации образца, то истинные значения сопротивления деформации сплавов отличаются от значений, полученных в первом приближении. Влияние неоднородности деформации образца учли с помощью итерационного применения компьютерного моделирования процесса деформирования образца и корректировки значений экспериментальной кривой сопротивления деформации. Данная методика подробно описана в работе [90]. Используя конечно-элементное моделирование сжатия образца со значениями параметров модели (4.1)-(4.5), полученными в первом приближении, получили расчетные зависимости силы сжатия образца от величины его обжатия Δh.

Итерационное уточнение экспериментальных кривых сопротивления деформации выполняли по формуле [90]:

$$z_{m+1} = z_m \frac{P}{P_m}$$

где m – номер итерации, $m = 1,2, \ldots$;

z_m – значение сопротивления деформации на m-ой итерации, входящее в функцию (4.6), $z_1 = z$;

P – экспериментальное значение силы сжатия образца;

P_m – значение силы сжатия образца, полученное по результатам конечно-элементного моделирования на m-ой итерации.

Используя уточненные данные сопротивления деформации z_m, снова выполняли процедуру минимизации функции (4.6) и решали краевую задачу сжатия образца для всех экспериментальных данных. Такие итерации повторяли до тех пор, пока среднее относительное отклонение δ экспериментальных значений силы сжатия образца от расчетных на текущей итерации не будет отличаться от значения δ на предыдущей итерации на величину, меньшую 0,1 %. Величину δ вычисляли по формуле

$$\delta = \frac{1}{9}\sum_{j=1}^{9} \frac{\int_0^T |P(t) - P_m(t)|\, dt}{\int_0^T P(t)\, dt} 100\%$$

где T – время деформации образца.

На рисунке 4.6 в качестве примера применения методики приведены результаты моделирования сжатия образца из стали 15Х5МФБ при температуре 750 °С. Расчетная кривая построена после третей итерации уточнения кривой сопротивления деформации. Здесь среднее относительное отклонение экспериментальных значений силы сжатия от расчетных составило 2,5 %.

Зависимости сопротивления деформации σ_s от степени деформации ε при постоянных скоростях деформации $\dot{\varepsilon}$ строили с использованием реологической модели (4.1)-(4.5) со значениями параметров a_i. Для этого в модели (4.1)-(4.5) величину $\dot{\varepsilon}$ задавали постоянной и строили зависимость $\sigma_s(\varepsilon)$ до значения $\varepsilon = 2$.

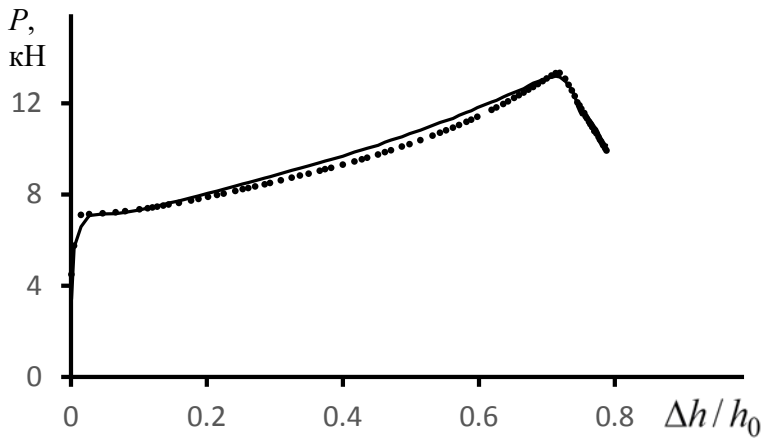


Рисунок 4.6 – Экспериментальная (*пунктир*) и расчетная (*сплошная*) зависимость силы сжатия образца P от величины относительного обжатия $\frac{\Delta h}{h_0}$

Примеры кривых $\sigma_s = \sigma_s(\varepsilon)$ полученных для рассмотренных трех марок сталей при температуре испытаний 1150 °С и скорости деформации $\dot{\varepsilon} = 0{,}05$ приведены на рисунке 4.7.

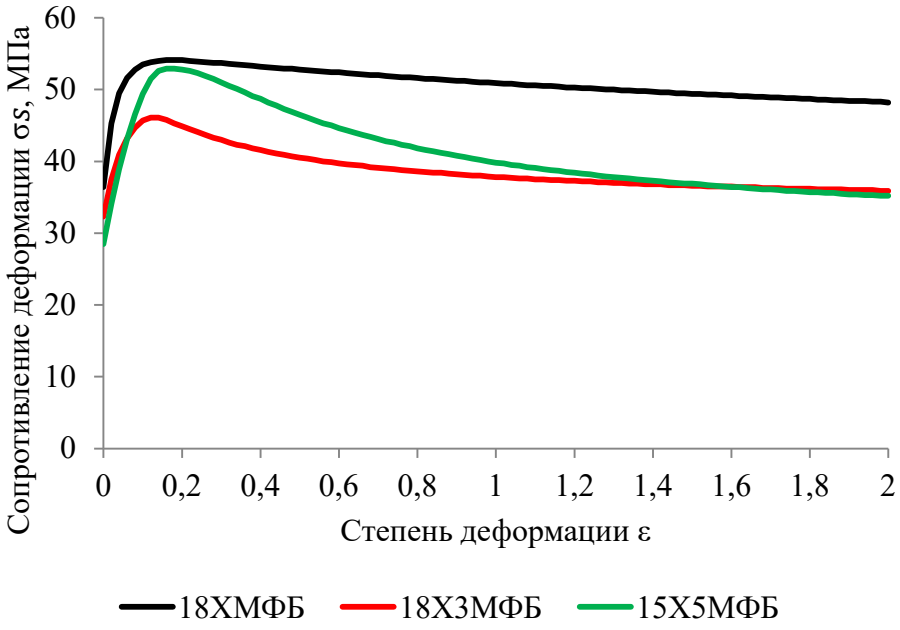


Рисунок 4.7 – Зависимость сопротивления деформации образцов от степени деформации ($T = 1150$ °С; $\dot{\varepsilon} = 0{,}05$)

4.1.3 Экспериментальное определение усилий при наружной высадке концов труб на прессе SMS Meer

В качестве заготовки при определении усилий наружной высадки концов труб служили трубы сортамента 73,02х5,51 мм из стали 15Х5МФБ. Производились замеры давления рабочей жидкости в главном цилиндре высадочного пресса SMS Meer (рис. 4.8). Путем перемножения давления на площадь рабочей поверхности поршня главного цилиндра получали значения усилий.

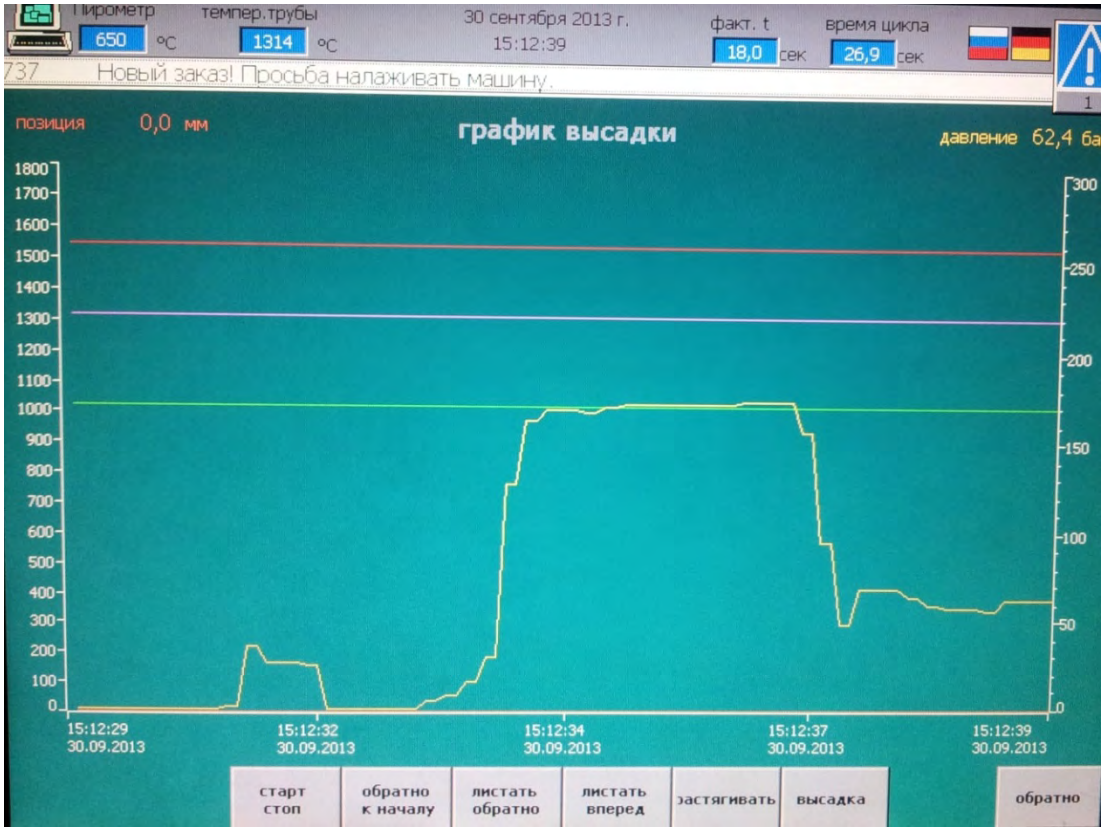


Рисунок 4.8 – Диаграмма измерения давления в рабочем цилиндре высадочного пресса SMS Meer при процессе высадки конца трубы из материала сталь 15Х5МФБ

Исследование величин усилий при наружной высадке концов труб проводилось путем определения следующих статистических данных [91-93]:

1. Среднеарифметическое значение изучаемого параметра:

$$\overline{Y_j} = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} Y_j$$

где Y_j – значение изучаемого параметра в j-ом параллельном опыте;

n – число параллельных опытов.

2. Дисперсия опыта по данным n параллельных опытов:

$$S_j^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{j=1}^{n}\left(Y_j - \overline{Y_j}\right)^2$$

3.Ширина доверительного интервала.

$$\Delta Y_j = \pm\frac{t_т S_j}{\sqrt{n}}$$

где $t_т$ – табличное значение критерия Стьюдента при принятом уровне значимости (5%) и числе степеней свободы.

Результаты исследования сведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1 – Сравнение величин усилия высадки, полученных теоретическим и экспериментальным путем

Номер параллельного опыта, п/п	Экспериментальное значение усилия высадки, кН	Среднеарифметическое значение усилия высадки, кН	Ширина доверительного интервала, кН	Расчетное значение усилия высадки, кН	Отклонение расчетной величины от экспериментальной,%
1	1740	1770	±28,49	1750	1,1
2	1790				
3	1680				
4	1770				
5	1790				
6	1710				
7	1750				
8	1760				
9	1720				
10	1690				

Согласно полученным статистическим данным расчетное значение усилия высадки равное 1750 кН находится в доверительном интервале экспериментальных величин [94, 95].

4.2 Разработка технологии и инструмента для наружной высадки концов труб на прессе SMS Meer

4.2.1 Разработка технологии для наружной высадки концов труб

На сегодняшний день технология наружной высадки концов труб на гидравлическом прессе SMS Meer, как уже отмечалось, включает операции: нагрева заготовки в индукторах на определенную длину концевого участка трубы до заданного значения температуры, транспортировки трубы на ось пресса, зажима трубы, собственно высадки, выдачи трубы на приемный стеллаж. Создание математической модели процесса и последующий параметрический анализ позволили выявить ряд зависимостей, позволяющих получить и рекомендовать отдельные технологические решения позволяющие повысить эффективность рассматриваемого процесса.

Высадке концов труб подвергаются горячекатанные трубы, выпускаемые согласно [96]. Согласно [96], отклонения по толщине стенки от номинального значения составляют ±12,5%. В этот диапазон могут на практике входить как утонение и утолщение концов труб, так и разнотолщинность поперечного сечения трубы. Кроме того, возможны ситуации с небольшим превышением максимальных значений толщины стенки трубы, что связано с технологией процесса горячей прокатки, когда присутствуют утолщенные концевые участки труб значительной длины. Согласно проведенному параметрическому анализу выявлено влияние данных факторов на энергосиловые параметры процесса высадки. В результате 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 (15Х5МФБ, 18Х3МФБ и 18ХМФБ) обладают повышенными значениями сопротивления деформации,

поэтому требуется производить нагрев концов труб перед высадкой до максимальных температур и максимально быстро доставлять трубы на ось прессования с целью обеспечения минимальных значений величины сопротивления деформации при собственно процессе высадки. В главе 3 представленной работы определены значения рациональных длин зоны нагрева концов труб, которые обеспечивают минимальные значения усилия высадки при сохранении необходимого качества высаживаемых труб. Применение данных значений на практике позволяет снизить нагрузки на инструмент и оборудование пресса и увеличить срок их службы.

Используемые на сегодня смазки поверхности прессового инструмента и система ее нанесения [97] не обеспечивают снижение показателей трения на границе металла трубы и инструмента до минимально возможных значений, что приводит к повышенным значениям усилия высадки, превышающих в ряде случаев технологические возможности пресса, и, как следствие – ограничение по сортаменту высаживаемых труб и максимально возможным длинам высаженных участков. Как известно [11], для процессов горячей штамповки применяют различные виды смазок (табл. 4.2) и систем их подачи.

Таблица 4.2 – Смазки, применяемые при горячей штамповке

Смазка	Состав смазки	Способ нанесения	Примечание
1	2	3	4
Мазутная	Мазут малосернистый марок 20, 40, 60, 80, 100; высоко-сернистый марок 20, 40-100%	Вручную помазком	Для сложных и ребристых поковок. Не рекомендуется по гигиенически м условиям
	Мазут 97%-4-графит 3%		Для очень сложных поковок. Не рекомендуется по гигиеническим условиям

Продолжение табл. 4.2

1	2	3	4
Древесная	Древесные опилки	Вручную	Для крупных поковок. Не рекомендуется по гигиеническим условиям
Коллоидальный раствор графита в воде (аквадаг)	Коллоидальный графит 1 ч. + вода (15-30) ч.	Механическим распылением	Гигиенична. Хорошо охлаждает фигуру штампа. Сокращает появление разгарных трещин
	Коллоидальный графит 10% + жидкое стекло (15-20)% + вода (или эмульсия 3-5%) + остальное		
Коллоидальный раствор графита в минеральных маслах (ойлдаг)	Масло (15-30) ч. + коллоидальный графит 1 ч.	Помазком вручную или специальным приспо соблением	Выделяет большое количество газов. Хорошо охлаждает фигуру штам-па. Уменьшает склонность к разгарным трещинам
	Масло "Вапор-Т" (ГОСТ 6411-52) 5 0-55% + графит 50-45%		Выделяет большое количество газон. Уменьшает истираемость полости штампа
Эмульсионные	25%-ный эмульсол (88-85% трансформаторного масла + 9,5÷10,5% олеиноной кислоты + 3,6÷6,5% трианоламина)	Механическим распылением	Для поковок средней сложности. Большое газообразование. Повышенные стоимость и расход
	25%-ный эмульсол - 97% + графит (серебристый) 3%		Требует непрерывного перемешива-ния (быстро оседает графит)
	5%-ная эмульсия - 98% + 2% графита (серебристый)		Для поковок средней сложности. Проста в приготовлении, отличается низкой стоимостью

Продолжение табл. 4.2

1	2	3	4
Солевые (расположены в порядке повышения смазывающего воздействия на штамп)	15% NaCl + 85% воды 15% NaCl + 5% NaNO3 + 80% воды + 70% CaCl + 30% NaCl насыщенный раствор 75% CaCl + 25% KCl насыщенный раствор 70% NaCl + 30% BCl насыщенный раствор	Механическим распылением	Хорошо охлаждает фигуру штампа, гигиенична
Литиевая	60% LiCO3+40% LiCl при t=1100+ 1150° С	Механическим распылением в печи при α =0.9	Наносится на заготовку при температуре штамповки до 1000° С, при 1000° С покрытие испаряется
На основе стекла	1 ч. горячей воды + 1 ч. сульфитно-целлюлорный щелок + 1,5 ч. стеклопорошка (10С или 31С)	Обмазка холодной заготовки	На бойки не налипает, обеспечивает безокислительный нагрев

При температурах эксплуатации до 200-300 °С успешно применяют смазки представляющие собой коллоидальный раствор графита в воде [98]. Они гигиеничны, обеспечивают низкие значения сил трения в зоне контакта металла и инструмента. Вместе с тем при более высоких значениях температур вышеуказанные смазки не обеспечивают смачивание поверхности штампов и поэтому применяют масляные или маслографитовые смазки, стеклосмазки, которые в свою очередь являются проблемными с точки зрения работы с ними.

На прессе SMS Meer по рекомендации фирмы производителя прессового оборудования применяется смазка на водной основе Rhenus Thermosyn SGV, содержащая мелкодисперсионный графит, антифрикционные и диспергирующие присадки. Смазка наносится непосредственно перед процессом высадки с помощью форсунок при температуре инструмента при установившемся режиме работы, согласно данным цеха: матриц – 300…380 °С, пуансона –

100…200 °С. При данном способе подачи смазки происходят ее потери до 90% по массе. Кроме того как показывают исследования [99, 100] при высоких температурах поверхности инструмента (свыше 300° С) наблюдается интенсивное выгорание смазочных материалов, представляющих собой коллоидный раствор графита. Таким образом, применяемые на прессе SMS Meer смазки и системы их подачи не выглядят эффективными. При этом согласно тем же исследованиям смазки на основе композиции графита и дисульфида молибдена выгорают меньше, хорошо работают при высоких удельных давлениях в зоне контакта и обеспечивают более низкие значения показателя трения [101-104]. Подытоживая вышесказанное, при наружной высадке концов труб на прессовом оборудовании рекомендуется пересмотреть систему подачи технологической смазки на штамповый инструмент. Наносить смазку требуется после предварительного нагрева поверхности инструмента до 100…150° С, после чего после испарения воды на поверхности штампов и образования плотного и равномерного слоя смазки необходимо производить полировку поверхности инструмента. Через 1-2 часа работы производить повторение операции смазывания. 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. Данный сортамент востребован на рынке трубной продукции и позволяет повысить качество соединяемых участков труб при их эксплуатации. Существующие на сегодня технологические решения подразумевают проведение многостадийных процессов высадки с постепенным достижением требуемых длин и толщины стенки. Высаженные концы труб при этом не обладают высоким качеством поверхности, имеют дефекты, которые требуется удалять при последующей станочной обработке. Вместе с тем промышленные опробования, анализ исследований и рекомендаций, посвященных данной тематике; моделирование, выполненное в рамках данной работы, позволяют рекомендовать проведение одно-

операционной 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.

4.2.2 Разработка инструмента для наружной высадки концов труб

Инструмент для наружной высадки концов труб на высадочном прессе описан в разделе 1.2. Высадочная матрица, формирующая наружную поверхность высаженного конца трубы содержит: цилиндрический участок L_1 и конический участок L_2 – формирующие высаженную часть трубы; конический участок L_3 – формирующий зону за высаженной частью трубы, исключающий на участке трубы за высаженной частью появление явной локальной зоны, выводящей наружный диаметр трубы за пределы плюсовых отклонений (рис. 1.22, *а*).

Калибровка высадочного пуансона, как уже отмечалось в разделе 1.2, формирующая внутреннюю поверхность высаженного конца трубы, состоит из следующих рабочих участков: участка длиной l_1 с диаметрами d_1 и d_2, предназначенного для формирования внутренней поверхности высаженного конца; участка длиной l_2 с диаметрами d_2 и d_3 – обеспечивающего свободное попадание пики пуансона во внутреннее пространство трубы и прохождение стадии расспрессовки в начальный период высадки конца трубы (рис. 1.22, *б*).

Диаметры рабочих участков инструмента определяются в основном требованиями стандартов на трубы с высаженными наружу концами [7, 9]. Что касается длин рассматриваемых рабочих участков матриц и пуансона, то длина цилиндрического участка матрицы L_1 зависит от соотношения наружного и внутреннего диаметров высаженных концов труб, от длины конического участка L_2, от положения пуансона в момент контакта торцевого участка трубы и пуансона. Длина конического участка L_2 определяется стандартами и составляет для [7]: 51 мм, а для [9]: 25 мм.

Для нахождения длины цилиндрического рабочего участка матрицы используем выражение вида

$$L_1 = L_т - L_2 + L_у,$$

где $L_т$ – длина участка трубы в пределах L_1 и L_2 матрицы перед высадкой;

$L_у$ – расстояние от торцевого участка трубы до торцевого участка матрицы после установки трубы (с учетом конструктивных особенностей инструмента принимается $L_у = 95$ мм).

Величину $L_т$ определим по формуле

$$L_т = \frac{1}{{D_{нт}}^2 - {d_1}^2}\left[L_в\left({D_1}^2 - {D_{вт}}^2\right) + L_2\left(\left(\frac{D_1 + D_{вт}}{2}\right)^2 - {D_{вт}}^2\right)\right]$$

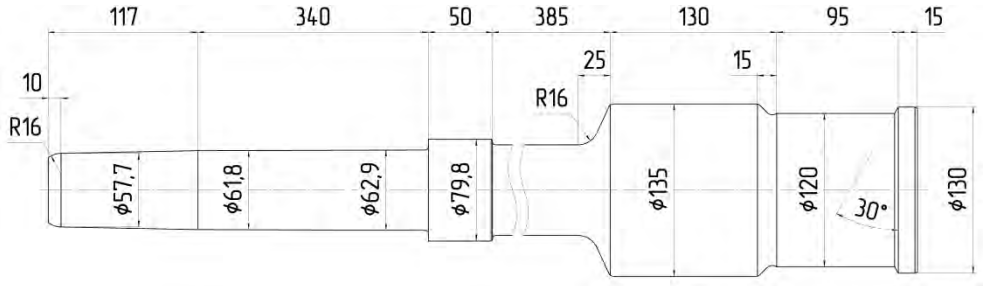
Длина участка l_1 пуансона зависит от максимальной длины высаживаемых концов труб. При крайнем положении пуансона в конце его рабочего хода плоскость, проходящая через тело пуансона с диаметром d_2, должна находиться за плоскостью, проходящей через тело матрицы с диаметром D_2 (на расстоянии 30…50 мм), с целью образования качественной внутренней поверхности высаженного участка трубы. Таким образом, выражение для определения l_1 имеет вид:

$$l_1 = L_в + L_2 + 30 \div 50, \text{ мм}$$

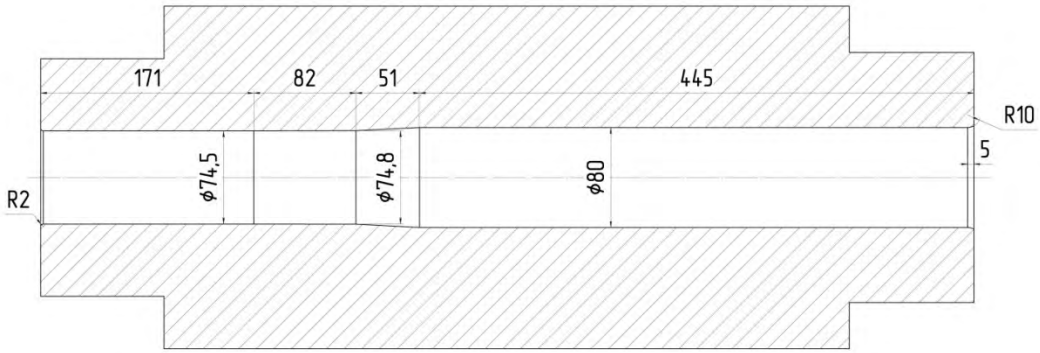
где $L_в$ – длина высаженного участка трубы.

В результате проведенного в работе параметрического анализа процесса наружной высадки концов труб установлено также, что при высадке труб с толщиной стенки, превышающей верхнее отклонение допуска по стандарту, требуется корректировка длины l_1 рабочего участка пуансона. При корректировке достигаются меньшие значения нагрузок, действующих на инструмент и оборудование пресса. Длина участка l_2 (исходя из практических соображений) выбирается из диапазона 100…110 мм.

На рис. 4.9 приведены примеры конструкций матрицы и пуансона, предназначенные для удлиненной высадки концов труб (до 210 мм) типоразмера 73,02х5,51 мм согласно [7].



а



б

Рисунок 4.9 – Компоновка высадочного инструмента для моделирования высадки концов труб с удлиненной высаженной частью
(*а* – пуансон (конусность рабочего участка 1:250); *б* – матрица)

Нормальные условия эксплуатации штампового инструмента подразумевают поддержание температуры штампов не выше 250-400 °С [11]. Нагрев до более высоких температур приводит к самоотпуску штамповых сталей. При этом перепад температур, связанный с нагревом и охлаждением поверхности штампового инструмента в процессе работы, ведет к разгару в поверхностных слоях штампов с появлением сетки. В дальнейшем разгарные трещины являются концентраторами напряжений, что может приводить к разрушению высадочного инструмента. Поэтому обеспечение определенного температурного режима эксплуатации инструмента является актуальным. Для поддержания нормального теплового режима эксплуатации пуансонов и матриц при наружной высадке концов труб рекомендуется предварительный нагрев инструмента до температуры 150-200 °С с применением переносных электрических нагревательных элементов (тэны), с последующим охлажде-

нием поверхности штампов, после каждой прессовки с помощью охлажденного сжатого воздуха, поскольку применение воды при применении инструмента из высоколегированных марок сталей приводит к интенсивному образованию разгарных трещин [21, 105], а охлаждение просто на воздухе не обеспечит достаточного снижения температуры при высокой производительности процесса.

ВЫВОДЫ

1. 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.

2. Экспериментальные исследования по определению усилий процесса наружной высадки концов труб позволяют сделать вывод об адекватности созданной математической модели реальному прототипу.

3. Анализ технологических и технических решений, а также проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволяют определить рациональные параметры технологического процесса наружной высадки концов труб.

4. Исследования процесса удлиненной наружной высадки концов труб позволяют определить геометрию прессового инструмента для данного процесса, а также условия его эксплуатации.

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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненной работы – на сегодняшний день 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 в направлении определения технологических нагрузок, режимов обработки, рациональной геометрии инструмента и параметров оборудования.

В работе проведен анализ известных технологий и устройств для наружной высадки концов труб и показано, что наиболее эффективным методом получения труб с высаженными концами является высадка на гидравлических прессах.

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 ма-

рок 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.

Указанный алгоритм решения задачи по определению формоизменения и энергосиловых параметров процесса наружной высадки концов труб внедрен в учебный процесс подготовки бакалавров и магистров ФГАОУ ВО Ур-

ФУ, обучающихся по направлению 15.03.02 и 15.04.02 «Технологические машины и оборудование». Комплекс проведенных работ по созданию технологии и прессового инструмента для наружной высадки концов труб из коррозионностойких марок сталей стали основой при выдаче рекомендаций, переданных для внедрения на АО «ПНТЗ».

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, 18Х3МФБ 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ANSI/API SPEC 7-1. Specification for rotary drill stem elements. – First edition, March 2006. Effective date: September 2006. – 84 p.

2. ГОСТ 32696-2014. Трубы стальные бурильные для нефтяной и газовой промышленности. Технические условия. – Введ. 2016–01–01. – М.: Стандартинформ, 2015. – 86 с.

3. ANSI/API SPEC 5DP. Specification for drill pipe. – First edition, August 2009. Effective date: August 2010. – 124 p.

4. Данилов А.Ф. Горячая прокатка и прессование труб / А.Ф. Данилов, А.З. Глейнберг, В.Г. Балакин. – М.: Металлургия, 1972. – 576 с.

5. ГОСТ Р 53366-2009. Трубы стальные, применяемые в качестве обсадных или насосно-компрессорных труб для скважин в нефтяной и газовой промышленности. Общие технические условия. – Введ. 2009–07–16. – М.: Изд-во стандартов, 2010. – 195 с.

6. ГОСТ 632-80. Трубы обсадные и муфты к ним. Технические условия. – Введ. 1983–01–01. – М.: Стандартинформ, 2010. – 51 с.

7. ANSI/API SPEC 5CT. Specification for casing and tubing. – Eight edition, July 2005. Effective date: January 2006. – 302 p.

8. Артамонов С.Ю. «Белая скважина» – уникальный для отечественного нефтяного рынка проект, реализуемый группой компаний «Римера» / С.Ю. Артамонов, И.Ю. Гусенков // «Нефтегазовое оборудование. Бюллетень». – 2013. – №1. – С. 39–41.

9. ГОСТ 633-80. Трубы насосно-компрессорные и муфты к ним. Технические условия. – Введ. 1983–01–01. – М.: Стандартинформ, 2010. – 32 с.

10. Ковка и объемная штамповка стали: Справочник в двух томах. 2-е изд., перераб. Т. 1 / А.Н. Брюханов, М.Г. Златкин, С.Б. Кирсанова [и др.]; под ред. М.В. Сторожева. – М.: Машиностроение, 1967. – 436 с.

11. Ковка и объемная штамповка стали: Справочник в двух томах. 2-е изд., перераб. Т.2 / В.А. Бабенко, А.Н. Брюханов, В.Н. Глушков [и др.]; под ред. М.В. Сторожева. – М.: Машиностроение, 1967. – 448 с.

12. Ковка и штамповка: Справочник в 4-х т. Т.2: Горячая объемная штамповка // под ред. Е.И. Семенова. – М.: Машиностроение, 1987. – 592 с.

13. Ткаченко В.А. Трубы для нефтяной промышленности / В.А. Ткаченко [и др]. – М.: Металлургия, 1986. – 256 с.

14. Матвеев Ю.М. Отделка труб / Ю.М. Матвеев, М.Я. Кричевский // под науч. ред. Тихонова Н.А. – М.: Металлургиздат, 1954. – 446 с.

15. Пат. 126333 Япония, МКИ B 21 J 41/00. Способ элетровысадки утолщений на трубных заготовоках / Ода Кэндзи (Япония). – №463353, заявл. 20.03.1970, опубл. 28.10.1973, Бюл. №48-43026 (Япония). – 3 с.

16. Селькин И.Т. Расчет параметров процесса электровысадки / И.Т. Селькин, О.В. Протопопов, А.И. Харченко // Кузнечно-штамповочное производство. – 1973. – №3. – С. 17-18.

17. Селькин И.Т. Расчет несимметричной электровысадки / И.Т. Селькин // Исследование процессов пластического формоизменения металлов. Гл. 4. – М.: Наука, 1974. – С. 152-194

18. Дунаев А.А. Новый метод высадки наружных утолщений на концах труб / А.А. Дунаев // Вестник машиностроения. – 1951. – №3. – С. 110-111.

19. Сериков С.Б. Повышение эффективности процесса свободной высадки / С.Б. Сериков [и др.] // Повышение процессов и оборудования для трубного производства: тематический сборник научных трудов. – М.: Металлургия, 1988. – С. 33-36.

20. Брюханов А.Н. Ковка и объемная штамповка / А.Н. Брюханов. – М.: Машиностроение, 1975. – 408 с.

21. Биллигман И. Высадка и другие методы объемной штамповки: Справочное руководство по штамповке сталей и цветных металлов в холодном и горячем состоянии при серийном и массовом производстве / И. Билли-

гман. – М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1960. – 467 с.

22. Ренне И.П. Новый способ получения заготовок металлоформ для центробежной отливки чугунных труб / И.П. Ренне, В.Я. Мильгевский // Кузнечно-штамповочное производство. – 1976. – №2. – С. 20-22.

23. Золотухин Н.М. Высадка труб / Н.М. Золотухин, В.Я. Мильгевский // Кузнечно-штамповочное производство. – 1961. – №4. – С. 30-31.

24. Закуренков Б.А. К вопросу о получении трубчатых заготовок электровысадкой / Б.А. Закуренков, А.М. Меркулов, Р.А. Кобылин // Технология машиностроения: сб. науч. тр. – Тула, 1974. – Вып. 35. – С. 105-110.

25. А.с. 502692 СССР. Электровысадочная машина / С.С. Колосовцев, А.Т. Ральников. – МКИ2 В 21J 5/08. // Открытия, изобретения. – 1976. – №6. – С. 4.

26. Бабенко В.А. Объемная штамповка: Атлас схем и типовых конструкций штампов / В.А. Бабенко, В.В. Бойцов, Ю.П. Волик. – М.: Машиностроение, 1982. – 104 с.

27. Адоньев А.И. Особенности проектирования технологического инструмента для высадки бурильных труб на горизонтально-ковочных машинах / А.И. Адоньев, И.А. Соколова, В.А. Орлов // Сталь. – 1988. – №12. – С. 48-51.

28. Козлов И.К. Расчет калибровки инструмента для высадки концов труб на горизонтально-ковочных машинах / И.К. Козлов // Металлургическая и горнорудная промышленность, 1984. – №3. – С. 34-36.

29. ГОСТ 7023-89. Машины горизонтально-ковочные с вертикальным разъемом матриц. Параметры и размеры. – Введ. 1990–01–01. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1998. – 11 с.

30. Ajax. Tube upsetting machines // Bulletin 93A. – Ajax manufacturing company: Clevelend, Ohio – 9 p.

31. Стрижак В.И. Обзорная информация. Черная металлургия: трубное

производство / В.И. Стрижак, Ю.С. Пикинер, И.К. Козлов. – М.: Ин-т «Черметинфрмация», 1981. – Вып. 3. – С. 1-12.

32. Шевченко А.А. Исследование некоторых вопросов процесса высадки труб / А.А.Шевченко, В.И.Стрижак, И.К.Козлов // Производство труб: сборник статей по теории и практике трубного производства. - М.: Металлургия, 1971. - Вып.25. - С.171-175.

33. Ермолов И.В. Методика калибровки матриц для высадки концов бурильных труб / И.В. Ермолов, В.Я. Остренко. // Производство труб: сборник статей по теории и практике трубного производства. – М.: Металлургия, 1970. – Вып. 24. – С. 50-56.

34. Ерпалов М.В. Проблемы и достижения в производстве насосно-компрессорных труб с высаженными концами на ОАО «ПНТЗ» / М.В. Ерпалов [и др.] // IX Конгресс прокатчиков: Материалы Международной конференции. – Череповец, 2013. – С. 170-176.

35. Ерпалов М.В. Проблемы и достижения в производстве насосно-компрессорных труб с высаженными концами на ОАО «ПНТЗ» / М.В. Ерпалов [и др.] // Черные металлы. – 2015. – №2. – С. 28-33.

36. Ерпалов М.В. Проблемы и достижения в производстве насосно-компрессорных труб с высаженными концами на ОАО «ПНТЗ» / М.В. Ерпалов [и др.] // Новые технологии и достижения в металлургии и материаловедении: Материалы XIV Международной научной конференции. – Польша, Ченстохова, 2013. – С. 123-131.

37. Пат. 2414983 С2 Российская Федерация, МПК B21J 13/08, B21J 5/08. Способ высадки концов насосно-компрессорных труб / Брижан А.И. [и др.], заявитель и патентообладатель ОАО «СинТЗ». – №2009109344/02. заявл. 16.03.09, опубл. 27.03.11, Бюл. №9. – 6 с. : ил.

38. Остренко В.Я. Аналитический метод определения силовых и энергетических параметров высадки концов труб / В.Я. Остренко, И.В. Ермолов // Производство труб: сборник трудов ВНИТИ. – М.: Металлургия, 1968. –

Вып. 20. – С. 223-230.

39. Теория обработки металлов давлением: Вариационные методы расчета усилий и деформаций / И. Я. Тарновский [и др.]; под ред. И. Я. Тарновского. – М.: Металлургиздат, 1963. – 672 с.

40. Выдрин А.В. Алгоритмы решения задач механики сплошных сред методом линий скольжения: учебное пособие / А.В. Выдрин. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2002. – 24 с.

41. Выдрин А.В. Математическая модель процесса высадки концов труб / А.В. Выдрин, А.В. Зинченко, Б.В. Баричко // Труды 19 Международной научно-практической конф. «Трубы-2011». – Челябинск: ОАО «РосНИТИ», 2011. – Ч. II. – С. 270-275.

42. Выдрин А.В. Методика определения технологических параметров процесса высадки концов бурильных труб / А.В. Выдрин, Б.В. Баричко, А.В. Зинченко // Сталь. – 2014. – №3. – С. 57-59.

43. Зинченко А.В. Повышение эффективности процесса высадки концов бурильных труб на основе математического и физического моделирования: дис. … канд. техн. наук (05.16.05 – Обработка металлов давлением) / А.В. Зинченко. – Челябинск: ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ», 2013. – 164 с.

44. 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

45. Ерпалов М.В. Совершенствование технологии высадки концов труб нефтяного сортамента на гидравлических прессах: дис. … канд. техн. наук (05.16.05 – Обработка металлов давлением). – Екатеринбург: ФГАОУ ВПО УрФУ, 2015. – 215 с.

46. Унксов Е.П. Инженерная теория пластичности / Е.П. Унксов. – М.: Машгиз, 1959. – 328 с.

47. Теория пластических деформаций металлов / Е.П. Унксов [и др]. – М.: Машиностроение, 1983. – 598 с.

48. Целиков А.И. Теория расчета усилий в прокатных станах / А.И. Целиков. – М.: Металлургиздат, 1962. – 494 с.

49. Целиков А.И. Теория прокатки: Справочник / А.И. Целиков [и др.]. – М.: Металлургия, 1982. – 335 с.

50. Губкин С.И. Пластическая деформация металлов: в 3-х томах / С.И. Губкин. – М.: Металлургиздат, 1960-61. – Т. 1 – 3.

51. Альшевский Л.Е. Тяговые усилия при холодном волочении труб / Л.Е. Альшевский. – М.: Металлургиздат, 1952. – 134 с.

52. Томленов А.Д. Теория пластического деформирования металлов / А.Д. Томленов. – М.: Металлургия, 1972. – 408 с.

53. Томленов А.Д. Механика процессов обработки металлов давлением / А.Д. Томленов. – М.: МАШГИЗ, 1963. – 236 с.

54. Соколовский В.В. Теория пластичности / В.В. Соколовский. – М.: Высшая школа, 1969. – 608 с.

55. Хилл Р. Математическая теория пластичности / Р. Хилл; пер. с англ. – М.: ГИТТЛ, 1956. – 407 с.

56. Смирнов-Аляев Г.А. Сопротивление материалов пластическим деформациям / Г.А. Смирнов-Аляев. – М.: Машгиз, 1961. – 296 с.

57. Сторожев М.В. Теория обработки металлов давлением / М.В. Сторожев, Е.А. Попов. – М.: Машиностроение, 1971. – 424 с.

58. Перлин И.Л. К выводу формулы Зибеля при осаживании круглого цилиндра / И.Л. Перлин // Вестник машиностроения. – 1958. – №2. – С. 44-45.

59. Выдрин В.Н. Процесс непрерывной прокатки / В.Н. Выдрин, А.С. Федосиенко, В.М. Крайнов. – М.: Металлургия, 1970. – 286 с.

60. Выдрин В.Н. Теоретические основы ассиметричной прокатки в гладких валках / В.Н. Выдрин, В.Я. Тумаркин // Теория и технология прокатки: сб. ст. – Челябинск: ЧПИ, 1968. – С. 47-57.

61. Колмогоров В.Л. Напряжения. Деформации. Разрушение / В.Л. Колмогоров. – М.: Металлургия, 1970. – 230 с.

62. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением / В.Л. Колмогоров. – М.: Металлургия, 1986. – 688 с.

63. Пластическое формоизменение металлов / Г.Я. Гун [и др]. – М.: Металлургия, 1983. – 416 с.

64. Гун Г.Я. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением / Г.Я. Гун. – М.: Металлургия, 1983. – 352 с.

65. Зенкевич О. Конечные элементы и аппроксимация / О. Зенкевич, К. Морган; пер. с англ. Б.И. Квасова; под ред. Н.С. Бахвалова. – М.: Мир, 1986. – 318 с.

66. Zienkiewicz O. Finite Element Method: fifth edition / O. Zienkiewicz, R. Taylor. – Butterworth and Heinemann, 2000. – V. 1 – 3.

67. Kobayashi S. Metal forming and the finite-element method / S. Kobayashi, S.-I. Oh, T. Altan. – Oxford University press, Inc., 1989. – 377 p.

68. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы / Р. Галлагер; пер. с англ. В.Н. Картвелишвили; под ред. Н.В. Баничука. – М.: Мир, 1984. – 428 с.

69. Деклу Ж. Метод конечных элементов / Ж. Деклу. – М.: Мир, 1976. – 96 с.

70. Норри Д. Введение в метод конечных элементов / Д. Норри, Ж. де Фриз. – М.: Мир, 1981. – 304 с.

71. Чигарев А.В. ANSYS для инженеров: Справ. пособие / А.С. Кравчук, А.Ф. Смалюк. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 512с.

72. Каплун А.Б. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство / А.Б. Каплун, Е.М. Морозов, М.А. Олферьева. – М.: Едиториал, УРСС, 2003. – 272 с.

73. Биба Н.В. Расчёт инструмента и технологии прессования профилей с помощью программы QForm / Н.В. Биба, А.И. Лишний, С.А. Стебунов // Цветные металлы. – 2009. – №10. – С. 83-87.

74. Практическое руководство к программному комплексу DEFORM-

3D: учебное пособие / В.С. Паршин [и др]. – Екатеринбург: УрФУ, 2010. – 266 с.

75. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд. – М.: Мир, 1979. – 392 с.

76. Karamyshev A.P. 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.

77. Nekrasov I. The Features of Metal-Forming Processes Modeling / I. Nekrasov, A. Fedulov, A. Karamyshev, V. Parshin, A. Dronov, V. Khorev // ICRISET2017. International Conference on Research and Innovations in Science, Engineering & Technology. Selected Papers in Engineering. V. 1 – Kalpa Publications in Engineering. – 2017. – P. 499-506.

78. Некрасов И.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 «Роснити». – 2016. – С. 120-122.

79. Некрасов И.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 РАН. – 2017 – №1(2). – С. 265-269.

80. Некрасов И.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. Некрасов И.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 РАН. – 2017 – №1(2). – С. 265-269.

81. Некрасов И.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 МГТУ им. Г.И. Носова – 2016 – Т.14, №4. – С. 57-60.

82. Карамышев А.П. 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.

83. Карамышев А.П. 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. – 2016 – №9. – С. 22-24.

84. Инатович Ю.В. Методы расчета инструмента для прессования металлов: Учебное пособие. 2-изд.. стереотип / Ю.В., Инатович, Ю.Н.Логинов. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2005. – 70 с.

85. Щерба В.Н. Прессование алюминиевых сплавов/ В.Н. Щерба. – М.: Интермет Инжиниринг, 2001. – 768 с.

86. Коновалов А.В. Исследование сопротивления деформации сталей 18ХМФБ и 18Х3МФБ 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.

87. Konovalov A.V. 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.

88. Коновалов А.В. Вязкопластическая модель сопротивления металла высокотемпературной деформации / А.В. Коновалов // Металлы. – 2005. – №5. – С. 94-98.

89. Коновалов А.В. Вязкопластическая модель сопротивления деформации стали 08Х18Н10Т при температуре горячей деформации / А.В. Коновалов, А.С. Смирнов // Металлы. – 2008. – №2. С. 55-59.

90. Коновалов А.В. Идентификация модели сопротивления деформации металлов по результатам испытаний на сжатие образцов / А.В. Коновалов, А.С. Смирнов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов.Т.76 – 2010. – № 1. С. 53-56.

91. Ивашев-Мусатов О.С. Теория вероятностей и математическая статистика / О.С. Ивашев-Мусатов. – М.: Наука, 1979. – 256 с.

92. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А.А. Спиридонов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.

93. Крупкина Т.В. Математическая статистика: Курс лекций / Т.В. Крупкина, А.К. Гречкосеев. – Красноярск: ИПК СФУ, 2009. – 189 с.

94. Михайленко А.М. Обработка опытных данных. Статистические гипотезы и выводы: учебное пособие / А.М. Михайленко, А.Р. Бондин. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2003. – 90 с.

95. Вентцель Е.С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М.: Академия, 2003. – 464 с.

96. ГОСТ 8732-78. Трубы стальные бесшовные горячедеформированные. Сортамент. – Введ. 1979–01–01. – М.: Стандартинформ, 2007. – 11 с.

97. Выбор, испытания и применение технологических смазок для

штамповки: Метод. рекомендации / Науч.-произв. об-ние по кузнеч.-прессовому оборуд. и гибким произв. системам для обраб. давлением НПО "ЭНИКмаш"; исполн. Г. К. Санакоев [и др.]. – Воронеж: НПО "ЭНИКмаш", 1988. – 65 с.

98. Грудев А.П. Теория прокатки / А.П. Грудев. – М.: Металлургия, 1988. – 240 с.

99. Петров А.Н. Повышение стойкости штампов при горячей штамповке путем изыскания оптимальных технологических смазок на водной основе: дис. … канд. техн. наук (05.03.05 – Процессы и машины обработки давлением) / А.Н. Петров. – М.: МАМИ, 1988. – 91 с.

100. Петров А.Н., Комплексное исследование коллоидно-графитовых смазочных материалов на водной основе / А.Н. Петров, П.А. Петров, М.А. Петров // Материалы международной научно-технической конференции ААИ «Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров», посвященной 145-летию МГТУ «МАМИ». – С. 98-106.

101. Грудев А.П. Трение и смазки при обработке металлов давлением: справочник / А.П. Грудев, Ю.В. Зильберг, В.Т. Тилик. – М.: Металлургия, 1982. – 312 с.

102. Леванов А.Н. Контактное трение в процессах обработки металлов давлением / А.Н. Леванов [и др.]. – М.: Металлургия, 1976. – 416 с.

103. Крагельский И.В. Трение и износ / И.В. Крагельский. – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.

104. Кузнецов В.И. Оценка влияния выбора технологической смазки на силовые параметры высадки концов бурильных труб / В.И. Кузнецов [и др.] // Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия». – М.: Черметинформация, 2010. – №1. – С. 61–62.

105. Технологии заготовительных производств. Т. III-2 / И.Л. Акаро [и др.]; под общ. ред. В.Ф. Мануйлова // Машиностроение. Энциклопедия / Ред. совет: К.В. Фролов (пред.) [и др.] / М.: Машиностроение, 1996. – 736 с.

Акционерное общество «Первоуральский новотрубный завод»

623100, Россия, Свердловская область, г. Первоуральск, ул. Торговая, 1
ОКПО 00186619, ОГРН 1026601503840, ИНН/КПП 6625004271/997550001

+7 3439 27 77 77
chelpipe.ru

ПНТЗ

14.03.2018 № П-ИСХ-000205
На №_____от_____

Проректору по науке
ФГАОУ ВО УрФУ
В.В. Кружаеву

Об использовании научно-технических разработок

Уважаемый Владимир Венедиктович!

Результаты теоретических и экспериментальных исследований, выполненных Уральским Федеральным Университетом и представленных в диссертационной работе Дронова Алексея Ивановича на соискание ученой степени кандидата технических наук «Исследование и разработка технологии и инструмента для наружной высадки концов насосно-компрессорных труб из коррозионностойких сталей», представляют несомненный интерес для выпуска насосно-компрессорных труб, который осуществляет АО «Первоуральский новотрубный завод».

Научно-исследовательская работа Дронова А.И., начатая в 2013 году, послужила основой для освоения технологии наружной высадки насосно-компрессорных труб с удлиненной высаженной частью, а также из низкоуглеродистых хромированных сталей, обладающих повышенной прочностью и износостойкостью.

Благодаря комплексу мер, в том числе описанных в работе Дронова А.И., объем производства НКТ с высаженными концами труб увеличен с 2013 года в несколько раз, составил по итогам 2017 года 30,5 тыс. тн., выручка от реализации которых составила 1,85 млрд. руб.

Приоритетным для АО «ПНТЗ» является повышение качества выпускаемых труб при увеличении долговечности оборудования и инструмента, на которых осуществляется выпуск данного вида продукции. Анализ результатов

математического моделирования процесса наружной высадки концов насосно-компрессорных труб, изложенный в диссертационной работе Дронова А.И., позволяет осуществить процесс высадки при рациональных режимах нагружения оборудования для наиболее востребованного сортамента насосно-компрессорных труб.

Также необходимо отметить, что рекомендации, связанные с ведением процесса высадки рекомендованы к внедрению в технологические инструкции по эксплуатации высадочного пресса SMS Meer.

Заместитель генерального директора по повышению операционной эффективности бизнеса М.М. Лямина