

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

На правах рукописи

НГУЕН ЗУЙ КЫОНГ

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА
ЭКСПАНДИРОВАНИЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ
ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА**

Специальность 05.16.05 – Обработка металлов давлением

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
Доцент, кандидат технических наук
Ефремов Дмитрий Борисович

Москва – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	1
ГЛАВА 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	7
1.1 Методы изготовления магистральных труб большого диаметра.....	7
1.2 Производство труб в Российской Федерации и в мире.....	9
1.3 Основные технические требования к трубам большого диаметра.....	11
1.4 Типовые геометрические дефекты при производстве ТБД.....	13
1.4.1 При формовке методом JCOE.....	13
1.4.2 При формовке методом UOE.....	14
1.4.3 При производстве на основе формовки вальцовкой.....	15
1.5 Процесс экспандирования как финишная операция и универсальное средство корректировки изделий тангенциальным растяжением при всех методах формовки магистральных труб большого диаметра.....	16
1.5.1 Понятие процесса экспандирования и его роль в линиях производства прямошовных сварных ТБД.....	16
1.5.2 Гидромеханический экспандер.....	18
1.6 Состояние исследований процесса экспандирования и постановка задач для работы.....	19
ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ И ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ТБД ПРИ ЭКСПАНДИРОВАНИИ.....	23
2.1 Аппроксимация кривой сопротивления деформации трубной стали.....	23
2.2 Анализ напряженно–деформированного состояния с учётом зазоров между сегментами, а также контактного трения между сегментами и внутренней поверхностью трубной заготовки.....	27
2.2.1 Расчетная схема процесса экспандирования и допущения.....	27
2.2.2 Силовые параметры при экспандировании.....	29
2.2.2.1 Дифференциальные уравнения равновесия в зоне сегмента.....	29

2.3.2.2 Дифференциальные уравнения равновесия в зоне зазора.....	31
2.2.2.4 Тангенциальная деформация и толщина стенки трубной заготовки.....	31
2.3.2.5 Граничные условия и общее решение дифференциальных уравнений равновесия.....	32
2.2.2.6 Алгоритм определения параметров процесса экспандирования численным методом.....	34
2.2.2.7 Критерии для оценки степени неравномерности напряжений и деформаций при экспандировании.....	37
2.3 Оценка качества ТБД по степени неравномерности напряжений и деформаций и классификация партий материала для получения продукции с заданными показателями качества.....	41
2.3.1 Разработанная методика оценки качества ТБД по степени неравномерности напряженно-деформированного состояния (НДС) при калибровке труб экспандированием	41
2.3.2 Пример, результаты и обсуждение	45
ГЛАВА 3. ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭКСПАНДИРОВАНИЯ ТРУБНОЙ ЗАГОТОВКИ.....	53
3.1 Физическая модель процесса экспандирования	53
3.1.1 Подготовка к экспериментам	53
3.1.2 Схема экспериментов процесса экспандирования.....	61
3.2 Методика предварительного моделирования процесса экспандирования лабораторных образцов в программном комплексе QForm.....	62
3.3 Результаты и выводы относительно адекватности компьютерного моделирования на основе сравнения с данными, полученными на физической модели процесса экспандирования	64
ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭКСПАНДИРОВАНИЯ ТБД С ПОМОЩЬЮ СОВРЕМЕННЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ МОДЕЛИРОВАНИЙ	70
4.1 Характер моделирования процесса экспандирования ТБД в программном комплексе QForm	70

4.1.1 Программное обеспечение QForm и его пользовательские подпрограммы	72
4.1.2 Создание модели материала для использования в программной среде QForm с помощью пользовательской подпрограммы.....	73
4.1.3 Программирование конвертера компонентов тензоров напряжения и деформации из декартовых координат в полярные.....	74
4.1.4 Разработка метода определения характеристик внешней поверхности ТБД при экспандировании	76
4.1.5 Коэффициент остаточной упругости при экспандировании	78
4.1.6 Метод определения коэффициента обратного пружинения при экспандировании	79
4.1.7 Инструменты и алгоритм исследования при моделировании процесса экспандирования	81
4.2 Влияние ширины стальной полосы, начальной овальности и коэффициента трения на процесс экспандирования	83
4.2.1 При дефекте трубной заготовки в виде «крыши»	84
4.2.2 При дефекте трубной заготовки в виде «яблока»	93
4.2.3 Сравнение характеристик при экспандировании трубных заготовок с дефектами в виде «крыши» и «яблока»	100
4.3 Исследование влияния дисперсии механических свойств на процесс экспандирования	102
4.4 Проектирование программного обеспечения для автоматического расчета параметров процесса экспандирования	107
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	111
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	113
ПРИЛОЖЕНИЯ А. Чертеж экспандера для физического моделирования...	122
ПРИЛОЖЕНИЯ Б. Подпрограмма на языке LUA для добавления кривой сопротивления деформации в препроцессоре программы QForm.....	126

ПРИЛОЖЕНИЯ В. Подпрограмма на языке LUA для получения пользовательских полей из среды QForm в постпроцессоре основной программы.....	127
ПРИЛОЖЕНИЯ Г. Программа расчета параметров процесса экспандирования ТБД 1420x21,6 мм на языке C#	129

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Магистральные трубы большого диаметра должны соответствовать высоким требованиям по геометрии и по свойствам металла. Даже при незначительном отклонении формы поперечного сечения трубы от окружности могут возникать проблемы с качеством сварных швов встык. При всех способах формовки труб контур поперечного сечения в той, или иной мере отличается от правильного круга заданного диаметра, который регламентирован весьма строгими стандартами и ТУ. Сегодня штрипс может поставляться на трубные заводы от разных поставщиков из разных регионов планеты. Исходный металл может выплавляться с существенными отклонениями по химическому составу, прокатываться при разных температурно-скоростных условиях, отличаться структурой и свойствами. Таким образом, на трубные заводы штрипс поступает, имея значительную дисперсию механических свойств, разброс по толщине, поперечную и продольную разнотолщинность.

На линии подготовки кромок и при дальнейших операциях формования трубы возможен учёт только основных констант металла заготовки в виде усреднённых показателей. При всех последующих операциях формовки и при сварке продольным швом добавляются новые источники нестабильности в виде отклонения контура тела от заданной конфигурации.

Экспандирование является ключевой операцией на завершающей стадии производства труб большого диаметра и предназначено для устранения погрешностей, накопленных заготовкой на всех предыдущих переделах.

Однако, механическое экспандирование, применяемое сегодня, имеет ряд принципиальных проблем в виде ограниченного количества сегментов экспандерной головки и необходимости их достаточно большого радиального перемещения, неизбежно также изменение величины контактного трения при экспандировании. Фактором нестабильности формы изделий является дисперсия параметров геометрии контура заготовки для

экспандирования, которая наследует упомянутые выше источники отклонений геометрии и свойств металла. Перечисленные условия экспандирования являются результатом действия факторов длинной технологической цепочки по производству трубной заготовки. Они влияют на геометрию конечного изделия и в целом на качество труб большого диаметра.

Выбранная тема диссертации вызвана актуальностью исследования упругопластической деформации металла при экспандировании заготовок, имеющих типовые дефекты формы, свойственные предыдущим операциям обработки, а также возможностей повышения стабильности производства и качества магистральных труб большого диаметра.

Цель и задачи работы

Целью диссертационной работы являются моделирование и оптимизация процесса экспандирования при производстве труб большого диаметра на базе исследования влияния начальных, граничных условий деформации, а также разброса механических свойств металла и формы заготовок на геометрию изделий.

Для достижения поставленной цели в работе определены следующие задачи:

1. Проведение анализа современных способов производства прямошовных сварных труб большого диаметра (ТБД), изучение ТУ, ГОСТов, характерных дефектов.

2. Разработка математической модели процесса экспандирования, учитывающей наличие контактного деформационного трения, переменных зазоров между сегментами, дисперсию механических свойств металла и геометрии заготовки.

3. Создание физической модели процесса экспандирования в лаборатории и проведение параллельного конечно-элементного моделирования в условиях экспериментов.

4. Установление зависимости неравномерности распределения напряжений и деформаций металла (НРНД) от условий экспандирования.

5. Разработка конечно-элементной модели экспандирования и изучение влияния начальной формы, ширины штрипса, начальной овальности трубной заготовки, коэффициента трения между сегментами и поверхностью трубной заготовки на геометрию ТБД после экспандирования.

6. Создание стохастической модели процесса экспандирования на базе дисперсии механических свойств штрипса, начальных и граничных условий процесса, разработка метода, дающего возможность оценивать стабильность геометрии изделий и повышать качество ТБД.

7. Разработка программного обеспечения для оптимизации параметров процесса экспандирования при производстве труб большого диаметра.

Научная новизна

1. Построена математическая модель для определения напряженно-деформированного состояния металла при экспандировании с учётом количества сегментов экспандерной головки, переменных зазоров между ними, коэффициента контактного трения между сегментами и трубной заготовкой, а также механических свойств материала трубной заготовки.

2. Разработаны критерии неравномерности распределения напряжений и деформаций, характеризующие процесс экспандирования.

3. Разработан ряд подпрограмм на языке LUA для комплекса QForm, позволяющих исследовать влияние фактической исходной геометрии штрипса, начальной овальности трубной заготовки и коэффициента трения на параметры процесса экспандирования.

4. Предложен критерий в виде «коэффициента остаточной эластичности» в качестве показателя стабильности геометрии изделий после их калибровки механическим экспандированием.

5. Разработан метод исследования влияния механических свойств металла на диаметр ТБД и на коэффициент обратного пружинения при экспандировании.

6. Выявлена возможность повышения стабильности геометрии труб путем установки регламента на величину отношения предела текучести к

модулю упругости.

7. Сформировано программное обеспечение на языке C# для автоматического расчета оптимальных параметров процесса экспандирования с целью повышения качества труб большого диаметра после экспандирования.

Методики и методы исследований

Теоретические исследования основаны на фундаментальных положениях обработки металлов давлением, теории дифференциальных уравнений, теории вероятностей и математической статистики.

Использованы специальные программы типа QForm, Autocad, Matlab и др., автором разработан ряд LUA-подпрограмм для расширения функционала программы QForm, анализа и оптимизации операций по производству ТБД.

Практическая значимость работы

1. Разработана математическая модель, позволяющая прогнозировать распределение параметров геометрии и напряженно-деформированного состояния металла применительно к условиям производства ТБД.

2. Предложены методы

- прогнозирования неравномерности напряженно-деформированного состояния металла на основе математической модели процесса калибровки для повышения качества продукции;

- расчёта коэффициента остаточной эластичности как средства оценки стабильности геометрии калибруемой продукции.

Методы могут быть использованы для прогнозирования качества ТБД и упреждающей коррекции технологических параметров производства продукции.

3. На основании компьютерного моделирования установлены закономерности трансформации типовых дефектов формы трубной заготовки при её экспандировании, на основании которых сформированы практические рекомендации.

4. Разработаны подпрограммы на языке программирования LUA в

вычислительной среде QForm-VX8 для расчёта и отображения упругого изменения внешнего контура трубы, полей остаточных напряжений и деформаций, других параметров процесса экспандирования.

5. Изготовленная физическая модель процесса экспандирования, методы измерения, результаты теоретических и экспериментальных исследований используются при выполнении практических и лабораторных занятий студентами бакалавриата и магистратуры на кафедре ОМД НИТУ «МИСиС».

Основные положения, выносимые на защиту

1. Математическая модель для определения параметров напряженно-деформированного состояния при экспандировании;

2. Критерии, оценивающие степень неравномерности распределения параметров напряжений, деформаций при экспандировании, а также математическая зависимость величины этих показателей от числа сегментов экспандерной головки и коэффициента трения;

3. Критерий остаточной эластичности, позволяющей оценить стабильность процесса экспандирования заготовок с исходными дефектами формы;

4. Влияние ширины стального листа, начальной овальности, типа дефектов трубной заготовки и коэффициента трения на параметры процесса экспандирования;

5. Метод стохастического анализа влияния механических свойств и толщины штрипса, граничных условий процесса на геометрические характеристики ТБД после экспандирования.

Степень достоверности и апробация результатов обеспечивается:

1. Использованием современных методов имитационного моделирования, а также лицензионных программных продуктов.

2. Доказанной сходимостью теоретических положений и результатов компьютерного моделирования.

3. Доказанной сходимостью результатов компьютерного моделирования и специальных экспериментов, проведенных в лаборатории кафедры ОМД

НИТУ МИСИС.

4. Автореферат проверен на отсутствие плагиата с помощью сервиса «Антиплагиат» - <http://nitumisis.antiplagiat.ru>.

Публикации

Основные результаты исследований опубликованы в 6 печатных изданиях, из них 5 - рекомендованных ВАК, 2 - входящих в международную базу данных Scopus.

Структура и объём диссертации

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 81 наименования отечественных и зарубежных авторов, 4 приложения. Диссертация изложена на 131 страницах и включает 66 рисунков и 21 таблицу.

ГЛАВА 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Методы изготовления магистральных труб большого диаметра

Трубы большого диаметра проводятся для прокладки магистральных трубопроводов, применяются для транспортировки нефте- и газопроводов, а также в промышленных отраслях и инженерных коммуникациях (рис. 1.1) [1].



а)



б)

Рисунок 1.1 – Способы прокладки магистральных труб

а – надземный тип; б – подземный тип

При производстве труб большого диаметра применяют методы холодной формовки в вальцах и на прессах, данные способы являются устоявшимися и зарекомендовавшие себя годами.

Вальцовая формовка труб представлена на рисунке 1.2а. При формовке в вальцах лист изгибается между тремя или четырьмя валками, которые при формовке осуществляют реверсивное движение. При этом верхний рабочий инструмент может подниматься и опускаться, это дает возможность для быстрой регулировки радиуса кривизны трубной заготовки. После формирования основной части осуществляется догибка прямолинейных концов листа до необходимого диаметра на установке подгибки кромок [1, 3].

Данный процесс имеет следующие преимущество: обеспечивается равномерная кривизна значительной части контура геометрического тела трубы, быстрая переналадка на другой типоразмер трубы.

Недостатки: ограничение по выпуску сортамента труб по причине в ограничении прогиба верхнего вальца.

В настоящее время испытанными способами для изготовления труб большого диаметра является формовка на прессах по схеме UOE и JSOE (рисунки 1.2б, 1.2в, 1.2г).

Формовка трубной заготовки по схеме UOE состоит из трех основных операций (рисунок 1.2б). Первой операцией при формировании листа, является подгибка кромок радиусом готовой трубы на двух формовочных прессах, установленных относительно друг друга в шахматном порядке. После подгибки кромок лист с формованными кромками отправляется на участок предварительной формовки в результате чего получается U-образная форма, далее по рольгангу заготовка отправляется на пресс окончательной формовки, где осуществляется формирования O-образной формы [1, 2].

Процесс формирования полуцилиндрических заготовок аналогичен, за исключением технологического инструмента (штампов) для формовки (рисунок 1.2в). Сформованные полуцилиндры в дальнейшем свариваются технологическим швом в продольном направлении, после чего производится наложения основного внутреннего и наружного сварных швов. Преимущества процесса: высокая производительность 60 труб в час, низкий процент брака [1, 3].

Недостатки: ограничение по диаметру труб, ограничение по толщине стенки до 32 мм, большая масса рабочих частей пресса, высокие энергетические затраты из-за трения в закрытом калибре.

Технология производства труб большого диаметра способом JSOE, была разработана немецкой компанией «SMS MEER», специализирующиеся по производству металлургического оборудования [1, 2, 4].

Процесс формирования заготовки по схеме «JSOE» включает в себя два гидравлических пресса. Первой технологической операцией является подгибка кромок. После подгибки кромок производится пошаговое

формирования с получением J, C, O-образной формы (см. рис. 1.2) и в дальнейшем производится калибровка на экспандере (E) [1, 4].

Основными преимуществами данной схемы являются: быстрый переход на другой типоразмер трубы за счет унифицированного рабочего инструмента, низкие затраты на рабочий инструмент, продолжительного срока службы инструмента, возможности формовки заготовок с толщиной стенки до 48 мм [1].

Недостатком данного метода является: малая часовая производительность (от 8 до 22 шт./час, в зависимости от размеров трубы), профиль сформованной трубы имеет прямолинейные участки.

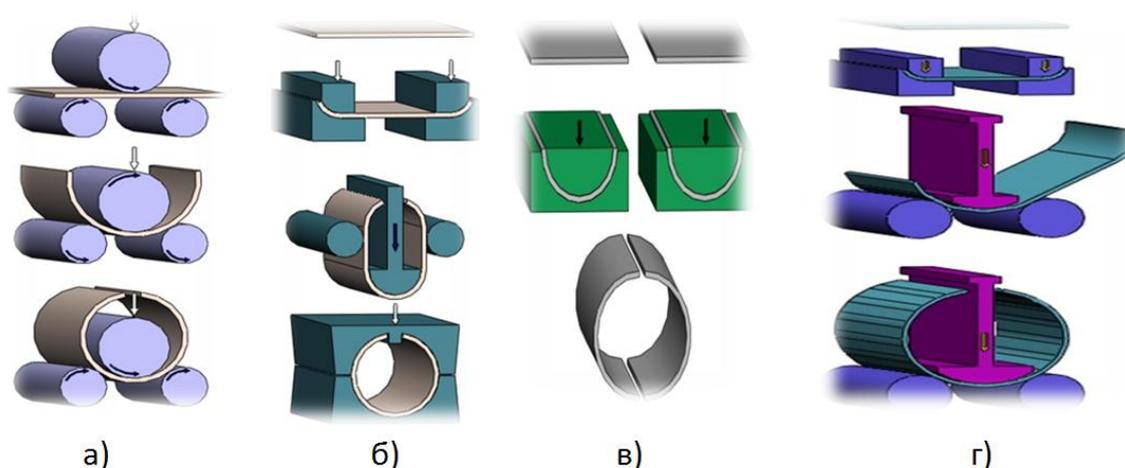


Рисунок 1.2 – Схемы формирования трубной заготовки способами
а – формовка на вальцах (Roll Bending); б – формовка на прессах с одним сварным швом (UOE); в – формовка на прессах с двухшовной сваркой (UOE);
г – шаговая формовка (JCOE)

1.2 Производство труб в Российской Федерации и в мире

В настоящее время на территории Российской Федерации производят трубы большого диаметра, производители представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Предприятия производящие ТБД на территории РФ [1-7]

Компания	Предприятие	Схема формовки	Обозначение оборудования	Диаметр готовой трубы, мм	Толщина стенки, мм
ОМК	АО ВМЗ	UOE	ТЭСА 1020	508-1067	8-32
		JCOE	ТЭСА 1420	508-1422	7-50
ПАО Северсталь	АО ИТЗ	JCOE	ТЭСА 610-1420	610-1420	6,4-38
ПАО ЧТПЗ	-	UOE	ТЭСА 530-820	530-820	7-12
		UOE	ТЭСА 1020-1220	1020-1220	10-22
		JCOE	ТЭСА 530-1420	610-1420	6,4-38
ПАО ТМК	АО ВТЗ	3RB	ТЭСА 530-1420	508-1422	8-42
АО ЗТЗ	-	3RB	ТЭСА 508-1420	530-1420	8-35

Процентное соотношение предприятий по способам производства в России на рисунке 1.3.

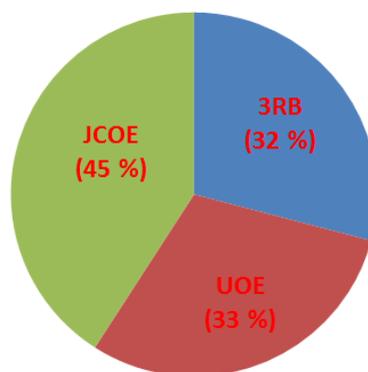


Рисунок 1.3 – Процентное распределение трубных способов в РФ

В мире насчитывается около 56 технологических линий по производству ТБД. Основные производители ТБД, использующие технологическую схему производства разными способами [1-7]:

- JCOE, в мире насчитывается около 20 технологических линий (четыре из которых находятся на территории РФ).

- UOE, в мире насчитывается около 22 технологические линии (три из которых находятся на территории РФ).

- Roll Bending, в мире насчитывается около 14 технологических линий (два из которых находятся на территории РФ).

Процентное распределение предприятий по способу производства в мире представлено на рисунке 1.4.

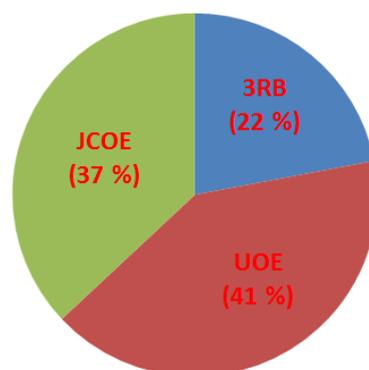


Рисунок 1.4 – Распределение трубных способов формовки в мире

Стоит заметить, что технология формирования способом JCOE широко применяется в следующих странах: Индия, Китай и Россия. Спрос на технологию JCOE связан с резким подъёмом технологического и экономического развития страны, в которых целесообразно водить новые технологии по производству ТБД [1, 3, 4].

В результате проанализированных данных можно сделать вывод о том, что практический опыт применения разных способов производства ТБД имеют свои преимущества и недостатки, но в масштабе мировой экономики, рыночный спрос отдаёт предпочтение толстостенным трубам с повышенным классом прочности которым обладает способ JCOE.

При этом современные вальц-прессы обладают возможностью оперативной перестройки с формовки вальцовкой на JCOE и обратно.

1.3 Основные технические требования к трубам большого диаметра

Параметры труб должны соответствовать требованиям API Spec5L-2000, ISO 3183-2007, DNV, ТУ 14-ЗР-01-93, ТУ 14-3-1573-96, ТУ 15-98, ТУ 100-98.

Отклонение наружного диаметра корпуса труб от номинальных размеров не должно превышать 2,0 мм. Отклонение наружного диаметра концов труб от номинальных размеров на расстоянии не менее 200 мм от их торцов не должно превышать: $\pm 1,5$ мм для труб диаметром менее 1020 мм; $\pm 1,6$ мм для труб диаметром 1020 мм и более [8, 9].

Длина изготавливаемых труб 10,5-12,4 м.

Кривизна труб не должна превышать 1,5 мм на 1 м длины, а общая кривизна – 0,1 % от длины трубы.

Все швы труб свариваются в три слоя: сплошным технологическим швом в среде защитного газа, внутренним и наружным рабочими швами под флюсом.

Высота усиления наружного шва должна находиться в пределах: 0,5-2,0 мм при стенке включительно до 10 мм; 0,5-2,5 мм при стенке более 10 мм.

Ширина усиления сварных швов должна быть в пределах 25 ± 5 мм.

Смещение свариваемых кромок не должно превышать 10 % от номинальной толщины стенки.

Величина растяжения контура при экспандировании труб не должна превышать 1,2 %.

Ширина наружных швов не должна превышать 35 мм, внутренних – 40 мм.

Поперечное сечение трубы должно быть круглым. Отклонение от теоретической окружности по торцам трубы, в том числе и на участках со сварным швом, по дуге периметра трубы с хордой длиной 200 мм не должно превышать 0,15% номинального наружного диаметра трубы, но не более 1,9 мм (в указанную величину не входит фактическое значение высоты усиления сварного шва).

Овальность концов труб (отношение разности между наибольшим и наименьшим диаметром в одном сечении к номинальному диаметру) не должна превышать 0,75% от номинального диаметра, но не более 5,0 мм [8, 9].

Прочностные свойства труб на поперечных образцах характеризуются данными, приведенными в таблице 1.2. Значение временного сопротивления на продольных образцах должно составлять не менее 95% от гарантированного временного сопротивления на поперечных образцах.

Трубы должны быть изготовлены из стали с отношением предела текучести к временному сопротивлению основного металла труб не более 0,80 для нормализованной низколегированной стали; 0,85 - для дисперсионно-твердеющей нормализованной стали; 0,90 - для микролегируемой стали контролируемой прокатки.

Таблица 1.2 – Прочностные свойства труб [8, 9]

Обозначение стали	K52	K55	K60	X60	X65	X70
Временное сопротивление разрыву, Н/мм ²	510-610	540-640	590-690	517-635	531-649	565-683
Предел текучести, Н/мм ²	360-460	390-490	480-580	414-534	448-568	483-603

1.4 Типовые геометрические дефекты при производстве ТБД

1.4.1 При формовке методом JCOE

Некоторые типовые дефекты производства прямошовных сварных труб линии ТЭСА – 1420 представлены на рисунке 1.5.

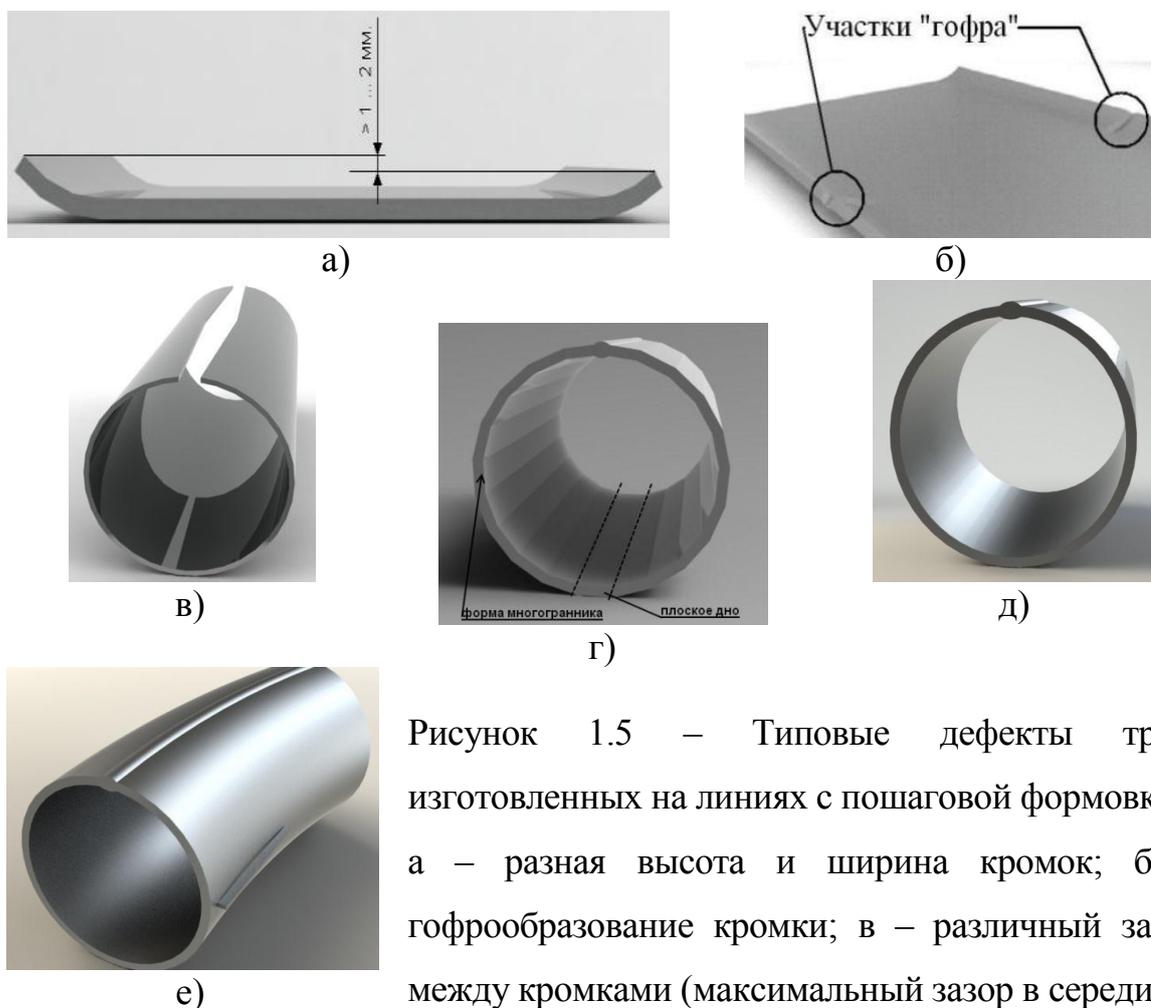


Рисунок 1.5 – Типовые дефекты труб, изготовленных на линиях с пошаговой формовкой
 а – разная высота и ширина кромок; б – гофрообразование кромок; в – различный зазор между кромками (максимальный зазор в середине трубы или на торцах заготовки); г – многогранная форма трубы; плоское дно; д – овальность трубы; е – продольная кривизна трубы.

Основные причины образования типовых дефектов: разброс механических характеристик кромок; смещение листа перед формовкой кромок; интенсивная подгибка на этапе формовки кромок; разные условия пошаговой формовки листа или неправильно подобранные режимы; нарушения работы манипуляторов (подача шагов не по разметке); несинхронная работа плунжерных цилиндров верхней рабочей балки; прогиб нижней балки с бойками; прогиб верхнего пуансона; перекося верхней траверсы относительно оси формовки; перекося нижней балки; несинхронная работа гидропривода верхней балки; разброс свойств листа; параметры горизонтальной овализации профиля заготовки в сборочно-сварочном стане, превышающей допустимые значения, нарушение режимов экспандирования и другие [6].

1.4.2 При формовке методом УОЕ

Некоторые типовые дефекты производства прямошовных сварных труб линии ТЭСА – 1420 представлены на рисунке 1.6.

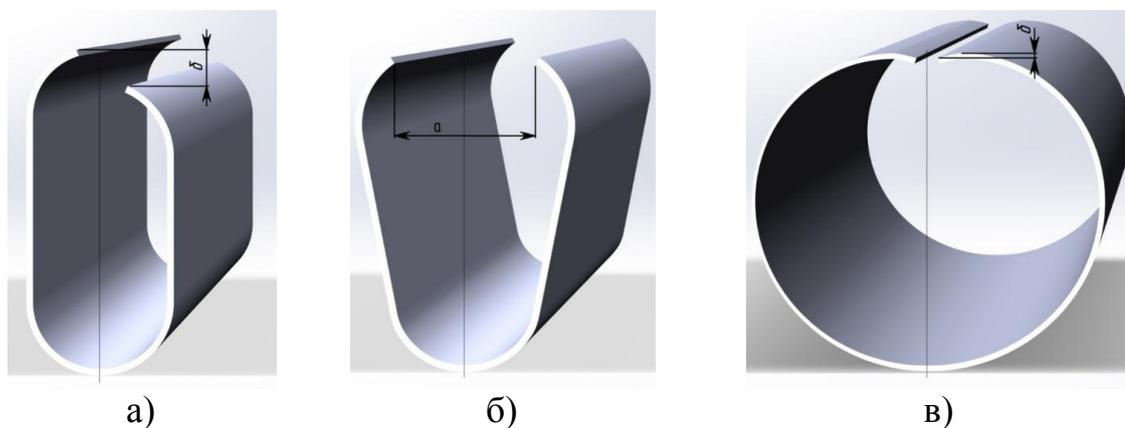


Рисунок 1.6 – Типовые дефекты труб, изготовленных на линиях с УО-образной формовкой

а – разные параметры левой и правой кромки; б – недопустимый зазор между кромками заготовки; в – дефект кромок типа «яблоко» (обратный скос кромок, дефект типа «крыша», здесь не приведён)

Основные причины образования типовых дефектов: разброс механических характеристик листа; некорректная установка листа по оси

пресса предварительной формовки; неправильно подобранные режимы деформации на прессе предварительной; недоформовка периферийных участков профиля боковыми роликами; переформовка кромок на участке кромкогибочных прессов; переформовка боковыми роликами прямолинейных участков профиля; смещения листа перед формовкой кромок и другие [6, 7].

1.4.3 При производстве на основе формовки вальцовкой

На рисунке 1.7 представлены некоторые типовые дефекты присущие способу производства на вальцах.

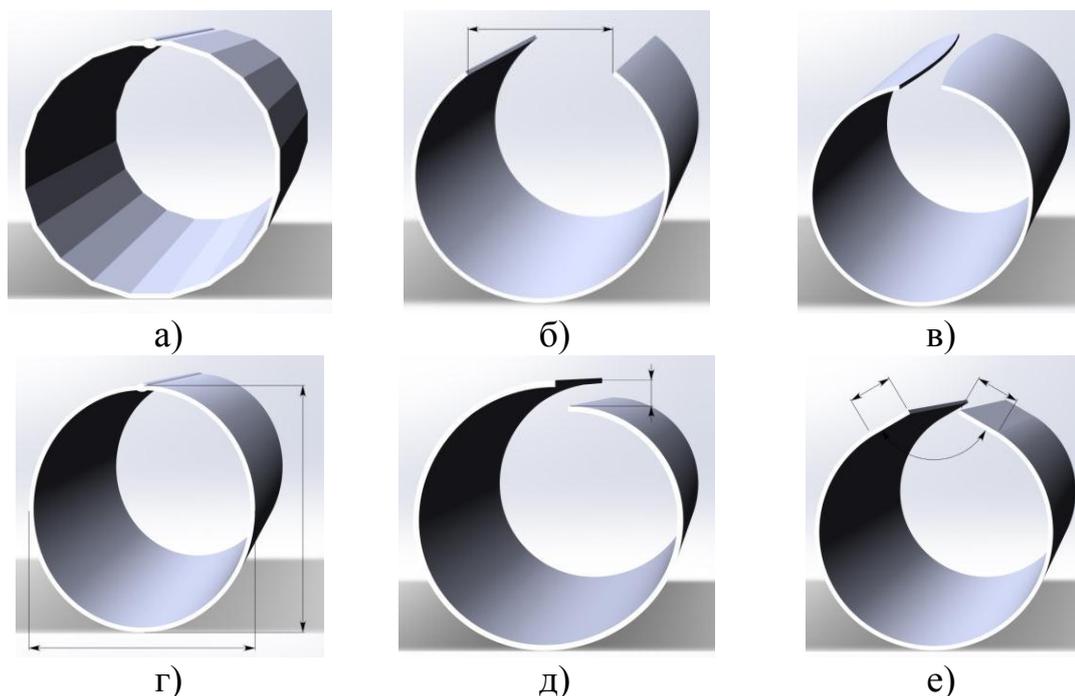


Рисунок 1.7 – Типовые дефекты труб, изготовленных на линиях формовки вальцовкой

а – многогранная форма трубы; б – недопустимый зазор между кромками трубной заготовки; в – неравномерный зазор между кромками трубной заготовки; г – овальность профиля трубной заготовки; д – смещение кромок профиля трубной заготовки по высоте; е – прямолинейность прикромочной зоны перед сваркой

Основные причины образования типовых дефектов: режимы настройки вальцев; неправильная интенсивность режимов гибки; перекос верхнего ролика в сторону переднего или заднего торца трубной заготовки; прогиба роликов с максимальной стрелой по середине или по торцам трубной

заготовки; несимметричность установки нижних опорных роликов; разброс механических свойств листа [6] и другое.

1.5 Процесс экспандирования как финишная операция и универсальное средство корректировки изделий тангенциальным растяжением при всех методах формовки магистральных труб большого диаметра

1.5.1 Понятие процесса экспандирования и его роль в линиях производства прямошовных сварных ТБД

Экспандирование ТБД – это гидравлическая или гидромеханическая калибровка труб путем пластической деформации стенки регламентированным растяжением для получения нормативных геометрических параметров труб [8].

Или: экспандирование – это операция правки и калибровки, исправления формы поперечного сечения и упрочнения труб большого диаметра раздачей внутренним давлением, создаваемым нагнетанием в заглушенную трубу в цилиндрических матрицах жидкости (воды) под давлением, либо протягиванием через трубу короткой оправки, либо специальной разжимной длинной оправкой [10].

Это является окончательной операцией формовки в линиях производства прямошовных сварных труб большого диаметра (см. рис. 1.8) [11].

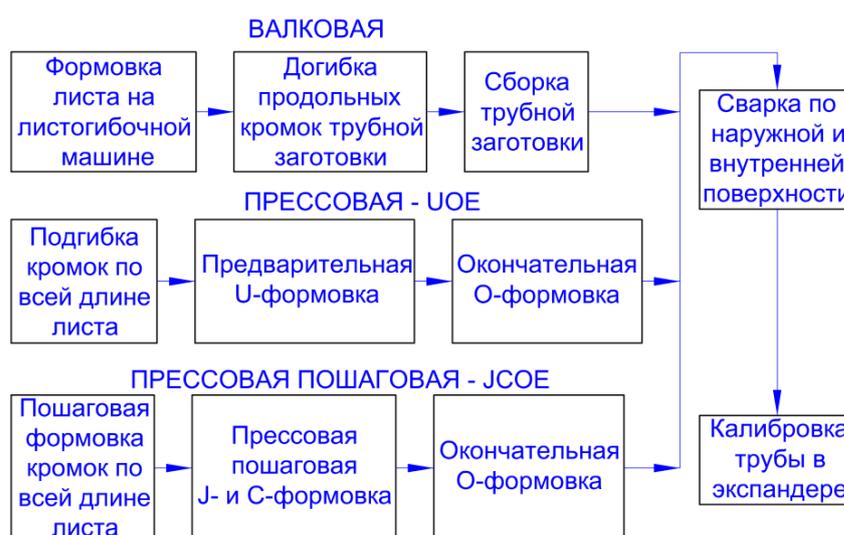


Рисунок 1.8 – Операция экспандирования в линиях производства прямошовных сварных труб большого диаметра

С помощью механического экспандера производится калибровка диаметра трубы и правка трубы в продольном направлении. Кроме калибровки, экспандирование увеличивает предел текучести материала на 5 – 8 % [7]. Дефекты формы ТБД, возникающие в результатах операций формовки перед экспандированием (см. раздел 1.4), также выравниваются после экспандирования. Качество продукции по размерам и по форме повышаются после экспандирования. Схема процесса экспандирования показана на рисунке 1.9.

Таким образом, можно сказать, что основными преимуществами операции экспандирования являются:

- калибровка диаметра трубы после формования если диаметр недостаточен;
- выравнивание дефектов формы (овальности, кривизны тела, ...), возникающих в предыдущих операциях формовки;
- увеличение предела текучести материала примерно на 8 %.

Недостатком данного метода является:

- высокая неравномерность распределения напряжений и также деформаций на стенке трубы. Это может снижать ресурсы и надежность эксплуатации линии труб в море или под землёй.
- уменьшение толщины стенки при больших степенях экспандирования
- дефекты в виде трещины в металлическом материале, возникающие в предыдущих операциях формовки могут увеличиваться при больших степенях экспандирования.



Рисунок 1.9 – Схема процесса экспандирования ТБД

1.5.2 Гидромеханический экспандер

Из документации к экспандеру «труборасширитель FPE010 ТМК WO1972-13» производства Голландии [12]: труборасширитель спроектирован и изготовлен для расширения труб по всей длине, получения точного внутреннего диаметра, унификации технических требований к материалам (вследствие деформации) и выравнивания трубы. Размеры и материал труб должны находиться внутри определенного техническими условиями номенклатурного диапазона, который может обрабатываться труборасширителем.

Поскольку используется холодная деформация трубы, предел текучести материала будет увеличиваться. В процессе расширения также испытывается прочность сварных швов. Поскольку за один раз подвергается расширению определенный отрезок трубы, труба проходит расширительную головку с определенным шагом.

Головка экспандера состоит из набора кольцевых пуансонов (сегментов), которые подвергаются радиальному расширению с помощью пирамидообразного «конуса». Конус входит между пуансонами под действием гидравлического цилиндра (рис. 1.10).

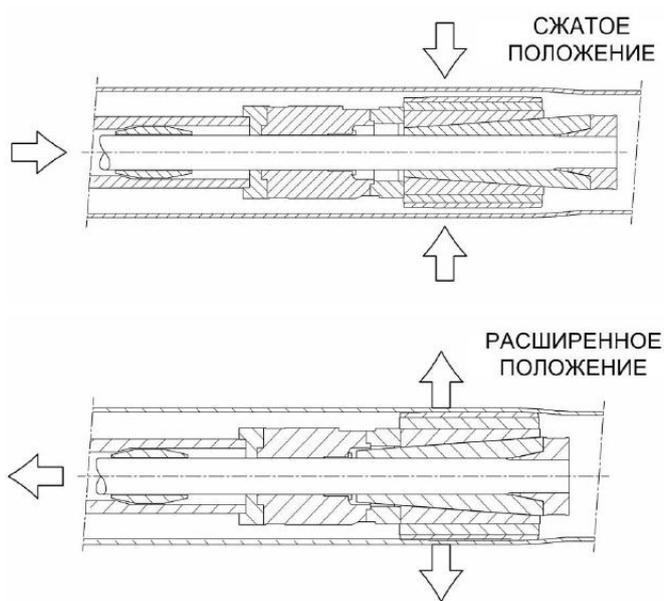


Рисунок 1.10 – Головка экспандера с сегментами для калибровки труб

Основные технические характеристики [12]:

- Длина трубы Мин. 8 000 мм (26,25 футов).
- Макс. 12500 мм (41 футов).
- Диаметр трубы 406,4 – 1 422 мм (16” – 56”).
- Толщина стенки 6,4 – 35 мм (0,25” – 1,378”).
- Марка материала до X100 / API 5L (макс. предел текучести 840 Н/мм²).
- Макс. вес трубы 21 тонна (метрическая).

1.6 Состояние исследований процесса экспандирования и постановка задач для работы

Анализ литературных источников по теме диссертационной работы показал, что значительный вклад в решение задач экспандирования и эффективной эксплуатации механизированного процесса экспандирования в линиях производства прямошовных сварных труб большого диаметра внесли выдающиеся российские ученые: Коликов А.П. [13-19], Самусев С.В. [2, 3, 5, 6, 20-26], Шинкин В.Н. [19, 27, 28], Фрункин Д.Б. [29-31], Романцев Б.А. [16, 26], и др., научные труды которых посвящены решению важнейших задач, связанных с обоснованием конструктивных параметров оборудования современных механизированных комплексов. Однако эта актуальная проблема большой научной и практической значимости содержит ряд нерешенных задач, требующих проведения дальнейших исследований и разработок.

Механическое расширение, или экспандирование, - очень сложная по кинематике операция, поскольку на этот процесс влияет множество факторов. Качество формовки сложно контролировать. Таким образом, было проведено много исследований о механическом расширении. На ранней стадии исследований механическое расширение изучали на базе экспериментов [32, 33]. Хотя результаты полезны для частной задачи, им не хватает универсальности, и их трудно развивать в дальнейшем.

Аналитический метод анализа основан на формализации задачи описания процесса и поведения материалов. Аналитический метод анализа обычно должен быть сформулирован со значительными упрощениями

условий формования, которые, однако, могут значительно повлиять на точность результатов [34-37]. С появлением вычислительной техники большая часть исследований основывалась на методе конечных элементов. Многие иностранные ученые использовали метод конечных элементов, например, Jingda Cai [34], Zhengrong Fu [33], Shuhong Xiao [36], Xuliang Qu [37], G. Palumbo [38], M. D. Herynk [39], Baofeng Guo [40], Qian Liu [41], и другие. Но в их работах отсутствуют математические модели, с помощью которых возможно более полное описание влияния главных параметров, таких как геометрия и механические свойства трубной заготовки, количества сегментов экспандерной головки и коэффициента трения между сегментами и внутренней поверхностью трубной заготовки на напряженно-деформированное состояние, контактное давление, изменение толщины стенки трубной заготовки и изгибающий момент, возникающий на стенке, при экспандировании.

Анализ напряженно-деформированного состояния трубной заготовки при экспандировании выполнен несколькими авторами на основании методик В.И. Феодосьева [42] и М.В. Сторожева [43]. Однако, в этих методах количество сегментов экспандерной головки и коэффициент трения не учитываются, это упрощение является серьёзным недостатком моделей при изучении процесса экспандирования.

На механическом экспандере возможно частичное исправление продольной кривизны труб. Способы исправления кривизны были предложены в различных изобретениях и полезных моделях [44-50]. Кроме кривизны на экспандере осуществляется изменение овальности трубы и придание правильной цилиндрической формы в зоне сварного шва (отклонения от теоретической окружности). Механизм изменения овальности выполняется при помощи изменения позиции опорного ролика. Овальность труб с торцов можно исправить дополнительной операцией с помощью гидравлического домкрата [51].

В настоящей работе установлен ряд направлений исследования, выбраны несколько главных факторов, которые в значительной степени влияют на процессы, протекающие при экспандировании, а также на качество конечной продукции – труб большого диаметра (рисунок 1.11).

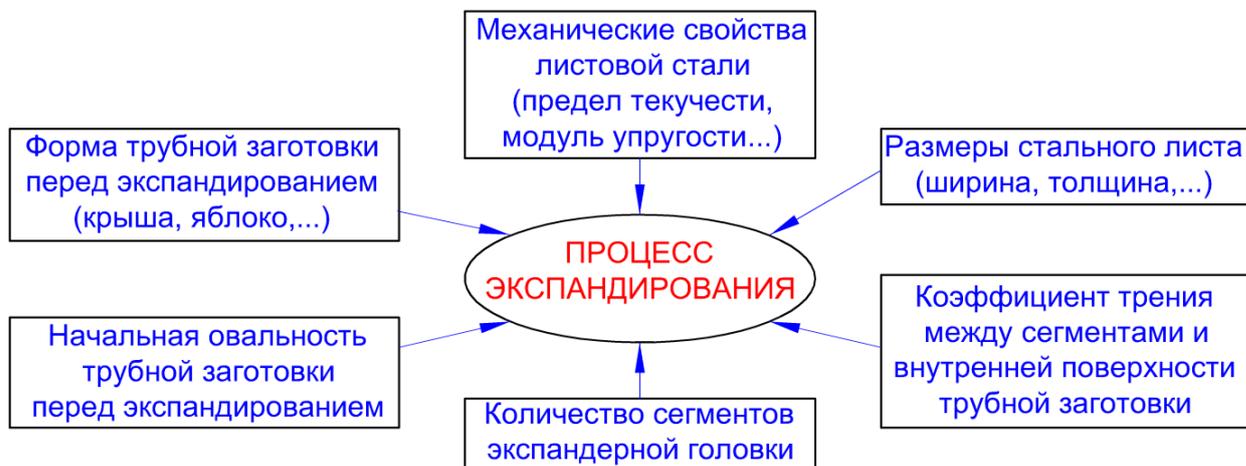


Рисунок 1.11 – Исследованные в работе главные факторы, влияющие на процесс экспандирования

В соответствии с изложенным целью работы является поиск средств повышения качества труб большого диаметра, а также стабильности производства посредством анализа процесса экспандирования исходных заготовок, имеющих асимметричный контур и типовые дефекты формы.

Для достижения этой цели в работе проводился поиск решения следующих задач:

1. Проведение анализа современных способов производства прямошовных сварных труб большого диаметра (ТБД), изучение ТУ, ГОСТов, характерных дефектов.

2. Разработка математической модели процесса экспандирования, учитывающей наличие контактного деформационного трения, переменных зазоров между сегментами, дисперсию механических свойств металла и геометрии заготовки.

3. Установление зависимости показателей неравномерности распределения напряжений и деформаций металла (НРНД) от условий

экспандирования.

4. Разработка стохастической модели процесса экспандирования на базе дисперсии механических свойств штрипса, величины контактного трения, поиск методов оценки качества продукции после экспандирования по показателям неравномерности распределения напряжений и деформаций.

5. Создание физической модели процесса экспандирования в лаборатории и проведение параллельного конечно-элементного моделирования условий экспериментов.

6. Разработка конечно-элементной модели экспандирования для изучения влияния начальной формы, ширины штрипса, начальной овальности трубной заготовки, коэффициента трения между сегментами и поверхностью трубной заготовки на качество ТБД после экспандирования.

7. Исследование влияния механических свойств металла на пружинение и диаметр трубной заготовки после экспандирования и разработка методов определения стабильных условий процесса калибровки труб.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ И ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ТБД ПРИ ЭКСПАНДИРОВАНИИ

2.1 Аппроксимация кривой сопротивления деформации трубной стали

Сопротивление пластической деформации относят к числу наиболее важных характеристик металлов и сплавов. По С.И. Губкину, сопротивление деформации представляет собой интенсивность напряжений, достаточную для осуществления пластической деформации материала при заданных условиях деформирования [52-59]. Кривая сопротивления деформации может быть получена экспериментально и её аналитические выражения определяются путем аппроксимации. Полученные испытания разных сталей и сплавов кривые отличаются видом связи напряжения течения со степенью пластической деформации. В вычислительной теории кривые изменения сопротивления деформации используют для решения задач пластической или упругопластической деформации деформируемых тел. Перевод от диаграммы с условными напряжениями к диаграмме сопротивления деформации показан на рисунке 2.1.

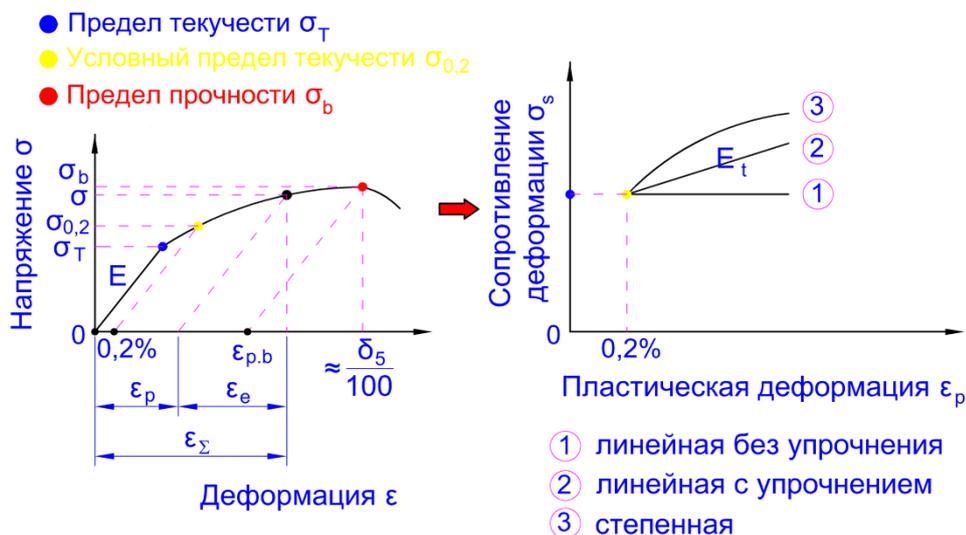


Рисунок 2.1 – Схема перехода от кривой условное напряжение – относительная деформация ($\sigma - \varepsilon$) к диаграмме «сопротивление деформации - степень пластической деформации» ($\sigma_s - \varepsilon_p$)

Механические свойства материала характеризуются модулем упругости E (МПа), пределом текучести σ_T [МПа], условным пределом текучести $\sigma_{0,2}$ [МПа], пределом прочности σ_b [МПа] и относительным удлинением при разрыве δ_5 (%). Считается, что момент разрыва материала очень близок к моменту предела прочности, и предел текучести близок к условному пределу текучести ($\sigma_T \approx \sigma_{0,2}$). Материал для производства ТБД должен обеспечивать по ТУ 14-3-1573-96 величину отношения $\frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_b} \leq 0,9$.

Суммарная деформация на кривой напряжения–деформация выражается формулой: $\varepsilon_\Sigma = \varepsilon_e + \varepsilon_p$, где ε_e – упругая деформация, $\varepsilon_e = \frac{\sigma}{E}$; ε_p – пластическая деформация. Не трудно видеть, что: $\varepsilon_p = \varepsilon_\Sigma - \varepsilon_e = \varepsilon_\Sigma - \frac{\sigma}{E}$.

* При $\sigma = \sigma_{0,2}$ имеем $\varepsilon_p = 0,2\% = 0,002$.

* $\varepsilon_\Sigma = \frac{\delta_5}{100}$ при $\sigma = \sigma_b$, поэтому пластическая деформация в точке предела прочности $\varepsilon_p = \varepsilon_{p.b} = \frac{\delta_5}{100} - \frac{\sigma_b}{E}$.

В теории приняты виды аппроксимации кривой сопротивления деформации $\sigma_s - \varepsilon_p$ (см. рис. 2.1):

* Тип 1:

$$\sigma_s = \sigma_T \text{ (или } \sigma_s = \sigma_{0,2}), \quad (2.1)$$

для всех значений пластической деформации ε_p (нет учета упрочнения материала).

* Тип 2:

$$\sigma_s = \sigma_T + E_t \varepsilon_p, \quad (2.2)$$

где E_t – модуль упрочнения материала, $E_t = \frac{\sigma_b - \sigma_T}{\varepsilon_{p.b}}$.

* Тип 3:

$$\sigma_s = \begin{cases} \sigma_{0,2} & \text{если } \varepsilon_p \leq 0,002 \\ K\varepsilon_p^x & \text{если } \varepsilon_p > 0,002, \end{cases} \quad (2.3)$$

где $x = \frac{\ln\left(\frac{\sigma_b}{\sigma_{0,2}}\right)}{\ln\left(\frac{\varepsilon_{p,b}}{0,002}\right)}$ и $K = \frac{\sigma_{0,2}}{0,002^x}$ (или $K = \frac{\sigma_b}{\varepsilon_{p,b}^x}$).

* Тип 4:

$$\sigma_s = \begin{cases} \sigma_{0,2} & \text{если } \varepsilon_p \leq 0,002 \\ \sigma_{0,2} + E_t \varepsilon_p & \text{если } \varepsilon_p > 0,002, \end{cases} \quad (2.4)$$

где $E_t = \frac{\sigma_b - \sigma_{0,2}}{\varepsilon_{p,b} - 0,002}$.

В настоящей работе кривая сопротивления деформации по типам 1 и 2 используется для теоретических расчетов с целью решения задачи пластической деформации материала при экспандировании трубной заготовки, где механические свойства материала соответствуют требованиям ГОСТ 31447–2012 и ТУ 14–3–1573–96. По типу 3 используется в моделях для конечно–элементного моделирования в среде QForm с помощью подпрограммы на языке LUA. Коэффициенты $\varepsilon_{p,b}$, x , K и E_t определяются по таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Механические свойства и константы кривой сопротивления деформация трубных сталей

Класс прочности	$\sigma_{0,2}$ (МПа)	σ_b (МПа)	δ_5 (%)	E (ГПа)	Расчетные параметры			
					$\varepsilon_{p,b}$	x	K (МПа)	E_t (МПа)
К34	205	335	24	210	0,2384	0,1027	388,2	545,3
К38	235	375	22	210	0,2182	0,0996	436,4	641,6
К42	245	410	21	210	0,2080	0,1109	487,9	793,1
К48	265	471	21	210	0,2078	0,1239	572,2	991,5
К50	345	490	20	210	0,1977	0,0764	554,6	733,6

K52	355	510	20	210	0,1976	0,0789	579,6	784,5
K54	380	530	20	210	0,1975	0,0724	596,1	759,6
K55	390	540	20	210	0,1974	0,0709	605,8	759,8
K56	410	550	20	210	0,1974	0,0640	610,2	709,3
K60	460	590	20	210	0,1972	0,0542	644,3	659,3

Пример уравнения сопротивления деформации без упрочнения, с линейным упрочнения и со степенной зависимостью, полученный для стали К60:

$$\begin{aligned} \sigma_s &= 460, \text{ или} \\ \sigma_s &= 460 + 659,3\varepsilon_p, \text{ или} \\ \sigma_s &= \begin{cases} 460 & \text{если } \varepsilon_p \leq 0,002 \\ 644,3 \cdot \varepsilon_p^{0,0542} & \text{если } \varepsilon_p > 0,002. \end{cases} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Эти уравнения выражены на рисунке 2.2:

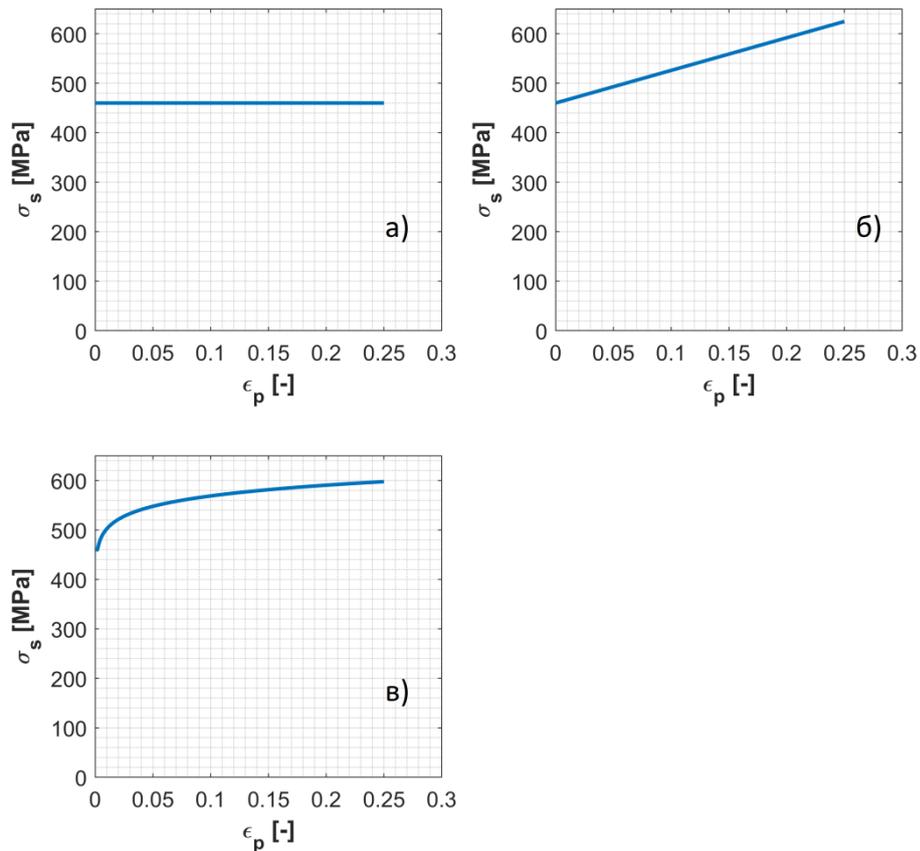


Рисунок 2.2 – Кривые сопротивления деформации для стали К60

а – без упрочнения; б – линейная; в – степенная

2.2 Анализ напряженно–деформированного состояния с учётом зазоров между сегментами, а также контактного трения между сегментами и внутренней поверхностью трубной заготовки

Если радиус геометрической оси стенки превышает 10 толщин стенки трубы, нагруженной радиальной нагрузкой, то труба считается тонкостенной [60]. На этом основании напряженно–деформированное состояние при экспандировании в этом разделе будет рассчитываться как пластическое состояние тонкостенной трубы, нагруженной внутренним давлением. Распределение напряжений и деформаций по толщине стенки такой трубы нельзя считать равномерным; они зависят от расстояния r до оси трубы.

2.2.1 Расчетная схема процесса экспандирования и допущения

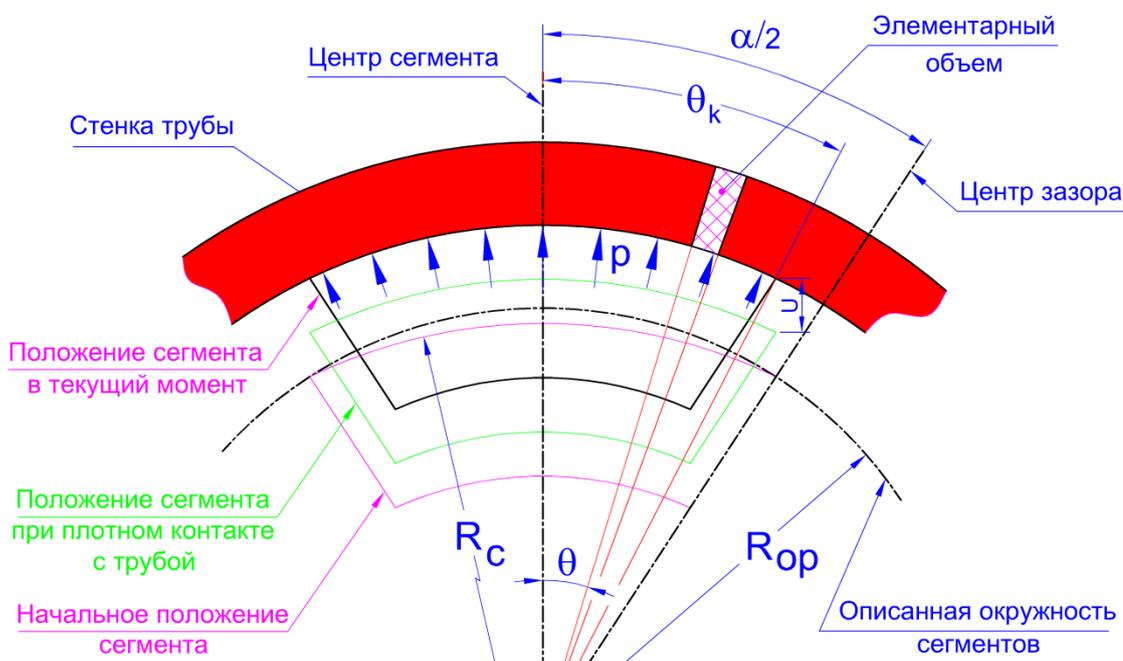


Рисунок 2.3 – Схема расчёта процесса экспандирования

где R_c [мм] – радиус поверхности сегмента; R_t [мм] – внутренний радиус трубной заготовки; R_{op} [мм] – радиус описанной окружности сегментов экспандера; u [мм] – рабочий ход сегментов; θ [рад.] – угловая координата рассматриваемого сечения в текущий момент от относительно центра

сегмента; θ_k [рад.] – угловая координата кромки сегмента, величина θ_k определяется по выражению (2.6):

$$\cos\theta_k = \frac{u + R_t + R_{op} \left(\cos\frac{\alpha}{2} - 1 \right)}{\sqrt{(u + R_t - R_{op})^2 + R_{op}^2 + 2(u + R_t - R_{op})R_{op} \cos\frac{\alpha}{2}}}, \quad (2.6)$$

где α [рад.] – угол между центрами соседних сегментов, равный углу между центрами зазоров. $\frac{\alpha}{2} = \frac{\pi}{n}$ – угол между центром сегмента и центром зазора,

где n – количество сегментов экспандера.

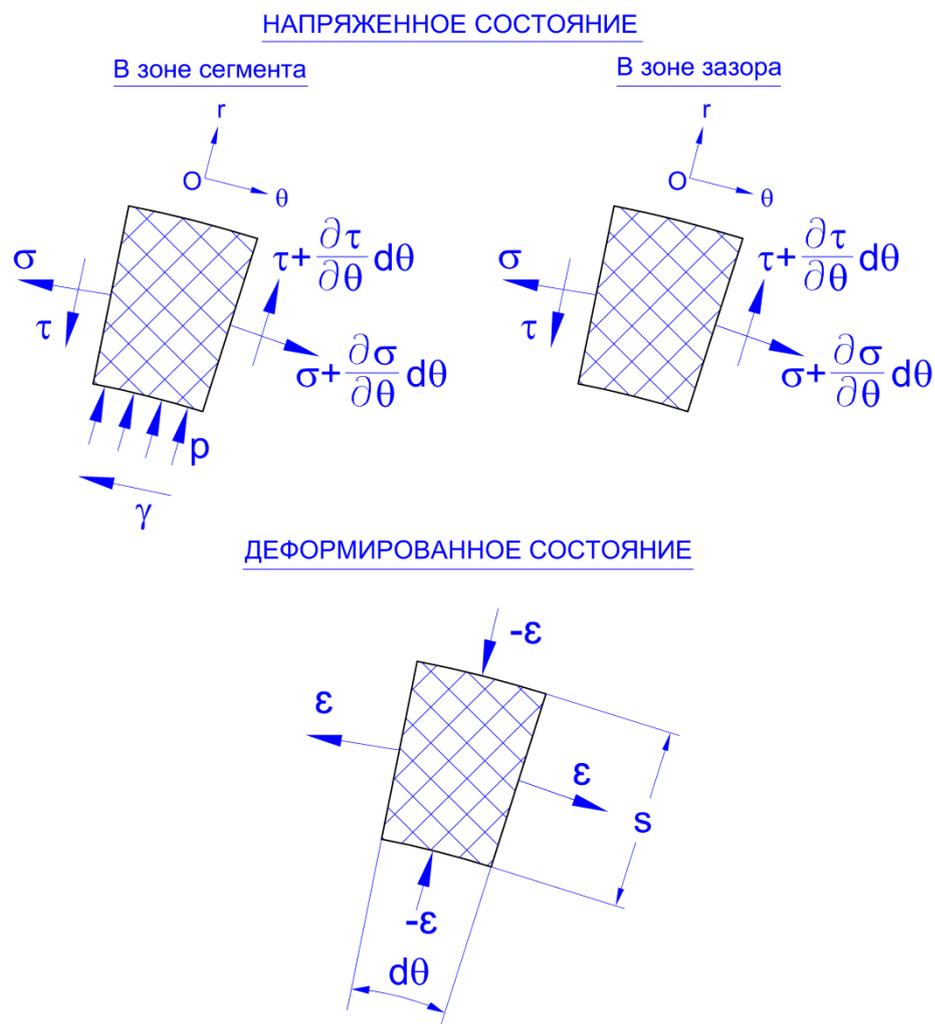


Рисунок 2.4 – Схема напряженно-деформированного состояния элементарного объема при экспандировании трубной заготовки

Обозначим: ε – тангенциальная деформация в элементе; s [мм] – толщина стенки элемента в текущий момент, $s = s_0 e^{-\varepsilon} \approx s_0(1 - \varepsilon)$, s_0 [мм] – начальная толщина стенки трубы; σ [МПа] – тангенциальное напряжение в элементе; τ [МПа] – касательное напряжение в элементе; p [МПа] – давление сегмента на внутренней поверхности трубной заготовки в элементе (контактное давление); γ [МПа] – удельная сила трения сегмента на внутренней поверхности трубы в элементе.

Гипотезы для задачи экспандирования

- В модели принят закон Амонтона–Кулона, согласно которому удельная сила трения γ пропорциональна контактному давлению p с коэффициентом пропорциональности, называемым коэффициентом трения между сегментами экспандера и внутренней поверхностью трубной заготовки μ , т.е. $\gamma = \mu p$.

- Принимаем «плоскую схему» деформации, т.е. деформация вдоль оси трубы ε_z равна нулю. Тогда $\varepsilon_r = -\varepsilon_\theta = -\varepsilon$ (см. рисунок 2.4);

- Материал в пластическом состоянии и течение металла определено по условию пластичности Треска–Сен–Венана;

- Сегменты контактируют с внутренней поверхностью трубы по всему контуру.

2.2.2 Силовые параметры при экспандировании

2.2.2.1 Дифференциальные уравнения равновесия в зоне сегмента

- Выразим сумму сил $\sum F_r$ в радиальном направлении:

$$\begin{aligned} \sum F_r &= pR_c d\theta - \left(\sigma + \sigma + \frac{\partial \sigma}{\partial \theta} d\theta \right) s \cdot \sin \frac{d\theta}{2} + \left(\tau + \frac{\partial \tau}{\partial \theta} d\theta - \tau \right) s \cdot \cos \frac{d\theta}{2} \\ &= pR_c d\theta - \left(2\sigma + \frac{\partial \sigma}{\partial \theta} d\theta \right) s \cdot \sin \frac{d\theta}{2} + s \frac{\partial \tau}{\partial \theta} d\theta \cdot \cos \frac{d\theta}{2}. \end{aligned}$$

Так как угол $\frac{d\theta}{2}$ очень мало ($d\theta \rightarrow 0$), то считаем $\sin \frac{d\theta}{2} \approx \frac{d\theta}{2}$, $\cos \frac{d\theta}{2} \approx 1$,

$\frac{\partial \sigma}{\partial \theta} \frac{d\theta^2}{2} \approx 0$, и $\frac{\partial \tau}{\partial \theta} \frac{d\theta^2}{2} \approx 0$, получим: $\sum F_r = \left(pR_c - s\sigma + s \frac{\partial \tau}{\partial \theta} \right) d\theta$. Поскольку

эта сумма равна нулю, т.е.: $\sum F_r = 0$, то $pR_c - s\sigma + s \frac{\partial \tau}{\partial \theta} = 0$, или:

$$\frac{\partial \tau}{\partial \theta} - \sigma = -p \frac{R_c}{s}. \quad (2.7)$$

- Выразим сумму сил $\sum F_\theta$ в тангенциальном направлении:

$$\begin{aligned} \sum F_\theta &= -\gamma R_c d\theta + \left(\sigma + \frac{\partial \sigma}{\partial \theta} d\theta - \sigma \right) s \cdot \cos \frac{d\theta}{2} - \left(\tau + \frac{\partial \tau}{\partial \theta} d\theta + \tau \right) s \cdot \sin \frac{d\theta}{2} \\ &= -\gamma R_c d\theta + \left(2\tau + \frac{\partial \tau}{\partial \theta} d\theta \right) s \cdot \sin \frac{d\theta}{2} + s \frac{\partial \sigma}{\partial \theta} d\theta \cdot \cos \frac{d\theta}{2}. \end{aligned}$$

Аналогично получим $\sum F_\theta = \left(-\gamma R_c + s\tau + s \frac{\partial \sigma}{\partial \theta} \right) d\theta$, причём эта сумма

равна нулю, т.е.: $\sum F_\theta = 0$, $-\gamma R_c + s\tau + s \frac{\partial \sigma}{\partial \theta} = 0$, или:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial \theta} + \tau = \gamma \frac{R_c}{s}. \quad (2.8)$$

Из уравнений (2.7) и (2.8) получим систему уравнений для зоны сегмента в случае удельной силы трения по закону Амонтона–Кулона $\gamma = \mu p$:

$$\begin{cases} \frac{\partial \tau}{\partial \theta} - \sigma = -p \frac{R_c}{s} \\ \frac{\partial \sigma}{\partial \theta} + \tau = \mu p \frac{R_c}{s} \end{cases}. \quad (2.9)$$

Из (2.9) выразим $\frac{\partial \sigma}{\partial \theta} + \tau = -\mu \left(\frac{\partial \tau}{\partial \theta} - \sigma \right)$, или $-\frac{\partial \sigma}{\partial \theta} + \mu \sigma = \mu \frac{\partial \tau}{\partial \theta} + \tau$.

Полученное дифференциальное уравнение имеет решение:

$$\begin{cases} \sigma = \sigma_c e^{\mu \theta} \\ \tau = \tau_c e^{-\frac{\theta}{\mu}} \end{cases}, \quad (2.10)$$

где σ_c и τ_c , соответственно, нормальное и касательное напряжения в центре сегмента (при $\theta = 0$).

При этом, контактное давление определится формулой (2.11):

$$p = \frac{s}{R_c} \left(\sigma - \frac{\partial \tau}{\partial \theta} \right) = \frac{s}{R_c} \left(\sigma_c e^{\mu \theta} + \frac{\tau_c}{\mu} e^{-\frac{\theta}{\mu}} \right). \quad (2.11)$$

2.3.2.2 Дифференциальные уравнения равновесия в зоне зазора

В этой зоне нормальное давление p равно нулю, поэтому получим уравнение от системы (2.9):

$$\begin{cases} \frac{\partial \tau}{\partial \theta} - \sigma = 0 \\ \frac{\partial \sigma}{\partial \theta} + \tau = 0. \end{cases} \quad (2.12)$$

Из уравнения (2.12) получим $\sigma d\sigma = -\tau d\tau$, или $\int_{\sigma_k}^{\sigma} \sigma d\sigma = \int_{\tau_k}^{\tau} \tau d\tau \rightarrow$

$\sigma^2 + \tau^2 = \sigma_k^2 + \tau_k^2$, здесь σ_k и τ_k , соответственно, нормальное и касательное напряжения у кромки сегментов (на границе между сегментом и зазором, где

при $\theta = \theta_k$, см. рис. 2.3). Обозначив $k = \sqrt{\sigma_k^2 + \tau_k^2}$, получим $\sigma^2 + \tau^2 = k^2$,

тогда решение уравнения (2.12) будет:

$$\begin{cases} \sigma = k \cos \theta \\ \tau = k \sin \theta. \end{cases} \quad (2.13)$$

2.2.2.4 Тангенциальная деформация и толщина стенки трубной заготовки

Из гипотезы выше получим: $\begin{cases} \varepsilon_z = 0 \\ \varepsilon_r = -\varepsilon_\theta = -\varepsilon \end{cases}$, поэтому эквивалентная

пластическая деформация:

$$\varepsilon_p = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_r - \varepsilon_\theta)^2 + (\varepsilon_\theta - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_r)^2} = \frac{2}{\sqrt{3}} \varepsilon.$$

По условию пластичности Треска–Сен–Венана напряжение σ равно сопротивлению деформации σ_s , определенному уравнением (2.3).

При экспандировании пластическая деформация обычно более 0,2%, поэтому $\sigma = \sigma_s = K\varepsilon_p^x = K\left(\frac{2}{\sqrt{3}}\varepsilon\right)^x$, или:

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{3}}{2} \left(\frac{\sigma}{K}\right)^{\frac{1}{x}}. \quad (2.15)$$

Толщину стенки трубной заготовки определим из выражения:

$$s = s_0(1 - \varepsilon) = s_0 \left[1 - \frac{\sqrt{3}}{2} \left(\frac{\sigma}{K}\right)^{\frac{1}{x}} \right]. \quad (2.16)$$

2.3.2.5 Граничные условия и общее решение дифференциальных уравнений равновесия

Из уравнений (2.10) и (2.13) получим:

$$\text{нормальное напряжение: } \sigma = \begin{cases} \sigma_c e^{\mu\theta} & \text{если } 0 \leq \theta \leq \theta_k \\ k \cos \theta & \text{если } \theta_k < \theta \leq \frac{\alpha}{2} \end{cases}$$

$$\text{касательное напряжение: } \tau = \begin{cases} \tau_c e^{-\frac{\theta}{\mu}} & \text{если } 0 \leq \theta \leq \theta_k \\ k \sin \theta & \text{если } \theta_k < \theta \leq \frac{\alpha}{2} \end{cases}$$

Граничное условие в сечении, соответствующем $\theta = \theta_k$, имеем:

$$\begin{cases} \sigma_k = \sigma_c e^{\mu\theta_k} = k \cos \theta_k \\ \tau_k = \tau_c e^{-\frac{\theta_k}{\mu}} = k \sin \theta_k, \end{cases}$$

т.е. получим:

$$\begin{cases} k = \sigma_c \frac{e^{\mu\theta_k}}{\cos \theta_k} = \tau_c \frac{e^{-\frac{\theta_k}{\mu}}}{\sin \theta_k} \\ \tau_c = \sigma_c e^{\left(\mu + \frac{1}{\mu}\right)\theta_k} \tan \theta_k. \end{cases} \quad (2.17)$$

Заменим (2.17) в (2.10), (2.13) и присоединим выражения (2.11) и (2.14–2.16), получим [59, 61]:

$$\left[\begin{array}{l}
\sigma = \begin{cases} \sigma_c e^{\mu\theta} & \text{если } 0 \leq \theta \leq \theta_k \\ \sigma_c \frac{e^{\mu\theta_k}}{\cos\theta_k} \cos\theta & \text{если } \theta_k < \theta \leq \frac{\alpha}{2} \end{cases} \\
\tau = \begin{cases} \frac{\theta}{\mu} & \text{если } 0 \leq \theta \leq \theta_k \\ \tau_c \frac{e^{\mu\theta_k}}{\sin\theta_k} \sin\theta & \text{если } \theta_k < \theta \leq \frac{\alpha}{2} \end{cases} \\
\varepsilon = \frac{\sqrt{3}}{2} \left(\frac{\sigma}{K} \right)^{\frac{1}{x}} \\
s = s_0 \left[1 - \frac{\sqrt{3}}{2} \left(\frac{\sigma}{K} \right)^{\frac{1}{x}} \right] \\
p = \begin{cases} \frac{s}{R_c} \left(\sigma + \frac{\tau}{\mu} \right) & \text{если } 0 \leq \theta \leq \theta_k \\ 0 & \text{если } \theta_k < \theta \leq \frac{\alpha}{2} \end{cases}
\end{array} \right. \quad (2.18)$$

При $s = s_c$ (т.е. где $\theta = 0$ – в центре сегмента) расчетные параметры определяются по формуле (2.19):

$$\left\{ \begin{array}{l}
\varepsilon_c = \frac{s_c - s_0}{s_0} \\
\sigma_c = K \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \varepsilon_c \right)^x \\
\tau_c = \sigma_c e^{\left(\mu + \frac{1}{\mu} \right) \theta_k} \cdot \tan \theta_k \\
p_c = \frac{s_c}{R_c} \left(\sigma_c + \frac{\tau_c}{\mu} \right).
\end{array} \right. \quad (2.19)$$

2.2.2.6 Алгоритм определения параметров процесса экспандирования численным методом

Делим интервал $[0; \frac{\alpha}{2}]$ на y равномерных интервалов $[\theta_1; \theta_2], [\theta_2; \theta_3], \dots, [\theta_y; \theta_{y+1}]$, где: $\theta_1 = 0$ и $\theta_{y+1} = \frac{\alpha}{2}$. Величина шага углов: $\Delta\theta = \theta_{i+1} - \theta_i = \frac{\alpha}{2y}$, здесь $i = 1 \dots y$.

Блок–схема алгоритма определения расчетных параметров процесса экспандирования представлена на рисунке 2.5:

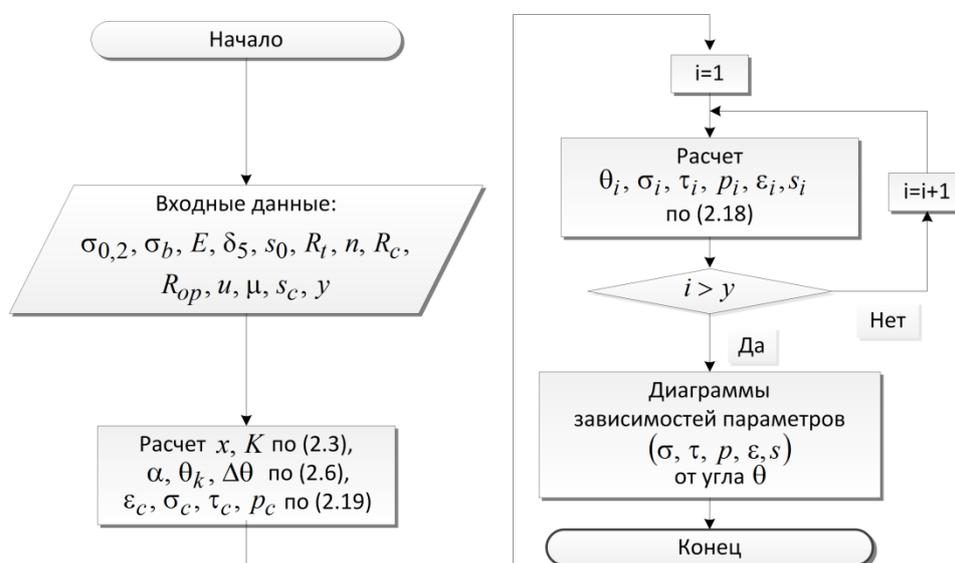


Рисунок 2.5 – Блок-схема определения расчетных параметров экспандирования трубы

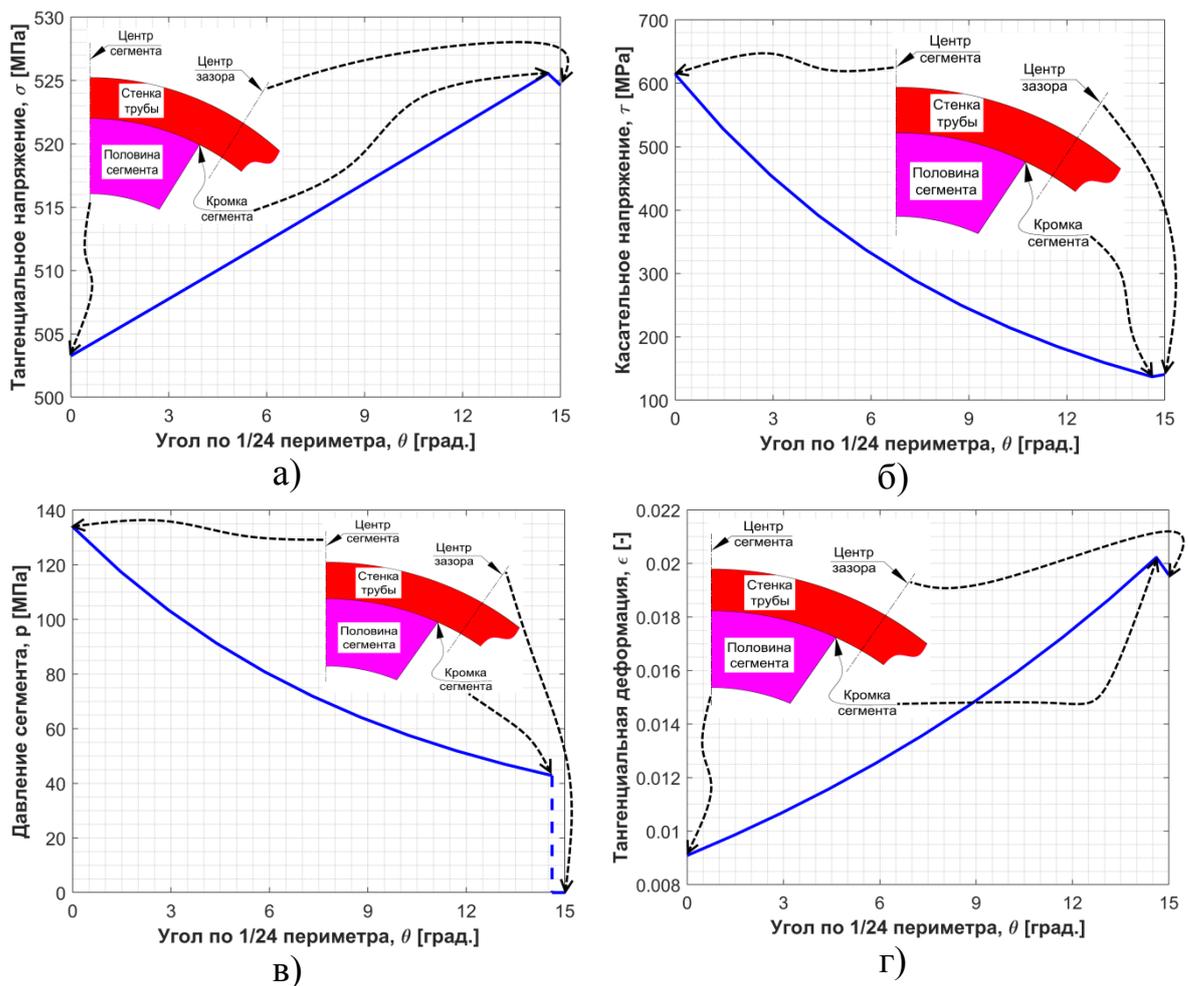
Пример с исходными данными, представленными в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Исходные параметры

№	Название величины	Обозначение	Значение	Единица
1	Предел текучести	$\sigma_{0,2}$	460	МПа
2	Предел прочности	σ_b	590	МПа
3	Модуль упругости	E	$210 \cdot 10^3$	МПа
4	Относительное удлинение при разрыве	δ_5	20	%
5	Начальная толщина	s_0	22	мм

6	Внутренний радиус	R_t	678	мм
7	Число сегментов	n	12	штук
8	Радиус сегментов	R_c	688	мм
9	Радиус описанной окружности сегментов	R_{op}	688	мм
10	Рабочий ход	u	10	мм
11	Коэффициент трения	μ	0,17	-
12	Толщина материала в центре сегментов	s_c	21,8	мм

Кривые изменения тангенциального и касательного напряжений, давления инструмента, тангенциальной деформации и толщины стенки показаны на рисунке 2.6:



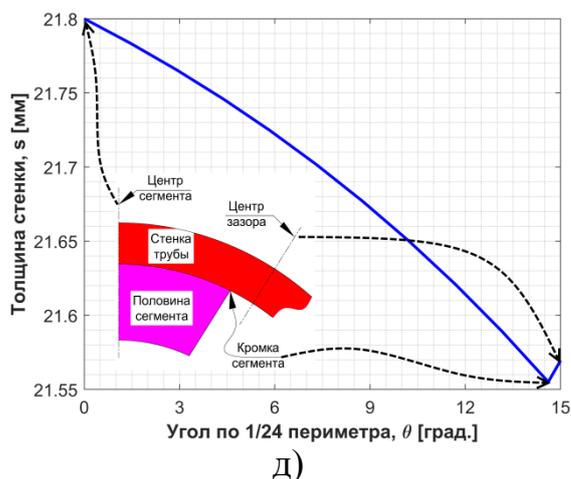


Рисунок 2.6 – Изменение тангенциального (а) и касательного (б) напряжения, давления инструмента (в), тангенциальной деформации (г) и толщины стенки (д)

Из рисунков 2.6б и 2.6д видно, что касательное напряжение и толщина стенки ТБД распределяются по периметру аналогично, их максимальное значение достигается в центре сегментов, а их минимальное значение соответствует кромке сегментов.

Соответственно рисункам 2.6а и 2.6г тангенциальные напряжение и деформация распределяются с увеличением от центра сегмента к его кромке. Поэтому повышенная деформация стенки происходит в зоне кромки и объясняет сильное уменьшение толщины стенки в этой зоне.

На рисунках 2.6в показано уменьшение давления от центра сегментов до их кромки.

Таблица 2.3 – Результаты расчёта силовых параметров процесса экспандирования

№	θ	σ	τ	p	s	ε
	[град.]	[МПа]	[МПа]	[МПа]	[мм]	[-]
1	0,0000	503,2620	614,1276	133,9163	21,8000	0,0091
2	1,4612	505,4486	528,5777	117,5237	21,7833	0,0098
3	2,9223	507,6447	454,9451	103,4272	21,7653	0,0107
4	4,3835	509,8503	391,5698	91,3064	21,7458	0,0116
5	5,8447	512,0655	337,0229	80,8854	21,7246	0,0125
6	7,3058	514,2903	290,0746	71,9269	21,7017	0,0136
7	8,7670	516,5248	249,6663	64,2265	21,6768	0,0147
8	10,2282	518,7690	214,8870	57,6086	21,6499	0,0159
9	11,6893	521,0229	184,9525	51,9215	21,6208	0,0172
10	13,1505	523,2866	159,1880	47,0351	21,5892	0,0187

11	14,6117	525,5602	137,0126	42,8372	21,5550	0,0202
12	14,6893	525,3740	137,7249	0,0000	21,5579	0,0201
13	14,7670	525,1868	138,4369	0,0000	21,5608	0,0200
14	14,8447	524,9987	139,1487	0,0000	21,5637	0,0198
15	14,9223	524,8096	139,8601	0,0000	21,5666	0,0197
16	15,0000	524,6196	140,5714	0,0000	21,5695	0,0196

2.2.2.7 Критерии для оценки степени неравномерности напряжений и деформаций при экспандировании

Введем оценку неравномерности НДС с помощью безразмерных критериев:

- безразмерные напряжения:

$$r_{\sigma} = \frac{\sigma}{\sigma_c} = \begin{cases} e^{\mu\theta} & \text{если } 0 \leq \theta \leq \theta_k \\ \frac{e^{\mu\theta_k}}{\cos\theta_k} \cos\theta & \text{если } \theta_k < \theta \leq \frac{\alpha}{2} \end{cases}.$$

Дифференциал безразмерного напряжения будет:

$$r'_{\sigma} = \frac{dr_{\sigma}}{d\theta} = \begin{cases} \mu e^{\mu\theta} & \text{если } 0 \leq \theta \leq \theta_k \\ -\frac{e^{\mu\theta_k}}{\cos\theta_k} \sin\theta & \text{если } \theta_k < \theta \leq \frac{\alpha}{2} \end{cases}.$$

И схема определения максимального и минимального значений безразмерного напряжения показана в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Способ нахождения экстремальных значений безразмерного напряжения

θ	0	половина сегмента	θ_k	половина зазора	$\alpha/2$
	(центр сегмента)		(кромка сегмента)		(центр зазора)
r'_{σ}		+		-	
r_{σ}	1	$e^{\mu\theta_k}$		$\frac{e^{\mu\theta_k}}{\cos\theta_k} \cos\frac{\alpha}{2}$	

Из этой схемы получим максимальное значение безразмерного напряжения в виде формулы:

$$\begin{cases} r_{\sigma}|_{\min} = \min\left(1; \frac{e^{\mu\theta_k}}{\cos\theta_k} \cos\frac{\alpha}{2}\right) \\ r_{\sigma}|_{\max} = e^{\mu\theta_k}. \end{cases}$$

График изменения безразмерного напряжения r_{σ} представлена на рисунке 2.7:

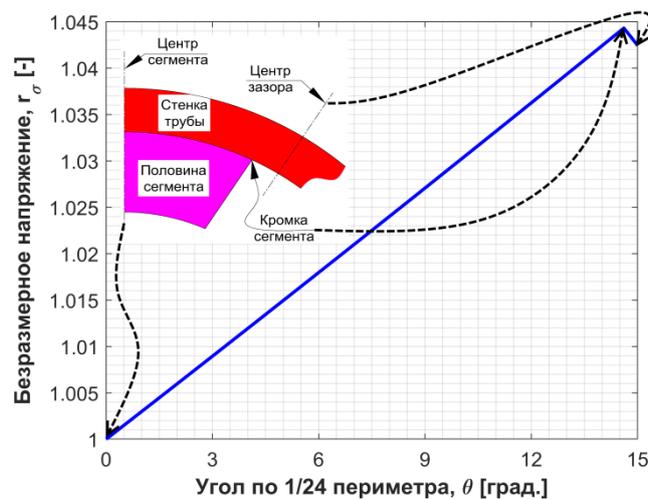


Рисунок 2.7 – Безразмерное напряжение

- безразмерные деформации: $r_{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} = (r_{\sigma})^{1/x}$.

График изменения безразмерной деформации r_{ε} представлен на рисунке 2.8:

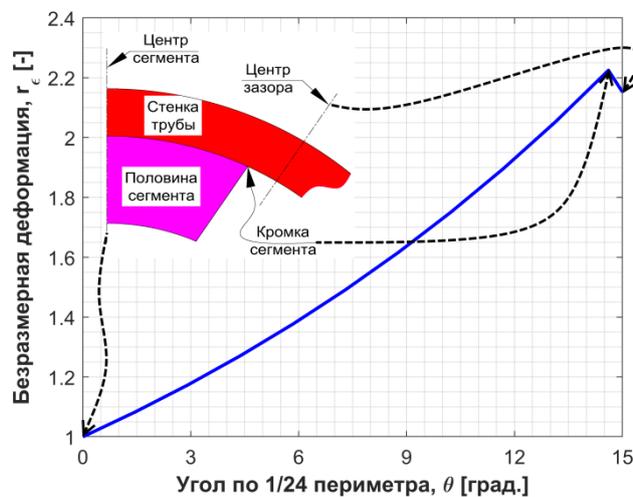


Рисунок 2.8 – Безразмерные деформации

Нетрудно определить экстремальные значения безразмерной деформации:

$$\begin{cases} r_{\varepsilon}|_{\min} = (r_{\sigma}|_{\min})^{\frac{1}{x}} \\ r_{\varepsilon}|_{\max} = (r_{\sigma}|_{\max})^{\frac{1}{x}} = e^{\frac{\mu\theta_k}{x}} \end{cases}$$

Величины $k_{\sigma} = r_{\sigma}|_{\max} = e^{\mu\theta_k}$ и $k_{\varepsilon} = r_{\varepsilon}|_{\max} = e^{\frac{\mu\theta_k}{x}}$ назовём показателями неравномерности напряжений и деформаций соответственно [59-66]. Показатели неравномерности напряжений k_{σ} и деформаций k_{ε} выражают отношения максимальных значений напряжения σ_{\max} и деформации ε_{\max} к минимальным σ_{\min} и ε_{\min} в зоне одного сегмента соответственно, т.е.

$$k_{\sigma} = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}} \text{ и } k_{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{\max}}{\varepsilon_{\min}}.$$

Чем ближе значения этих критериев к единице, тем

более равномерным является распределение НДС по контуру трубы, а также выше используются возможности операции экспандирования для калибровки трубной заготовки по всему её контуру. Наоборот, чем выше коэффициент неравномерности напряжения k_{σ} , тем выше неравномерность распределения напряжений. Между тем, неравномерность напряжений и деформаций может привести к появлению остаточных напряжений, которые значительно ослабляют изделие, в особенности в зоне сварного шва, при воздействии агрессивной среды. Повышенные значения показателя неравномерности деформации k_{ε} при экспандировании свидетельствуют о повышенной вероятности отклонения геометрии трубы от правильной окружности, а значит о сниженном качестве изделий при стыковой сварке труб при монтаже трубопровода. Поэтому с целью повышения качества трубных изделий нужно снизить степени неравномерности напряжения и деформации до минимально возможного уровня.

На основе полученных ранее выражений можно установить, каким образом зависят степени неравномерности напряжения k_{σ} и деформации k_{ε} от коэффициента трения и от количества сегментов экспандера, что показано на рисунках 2.9а и 2.9б.

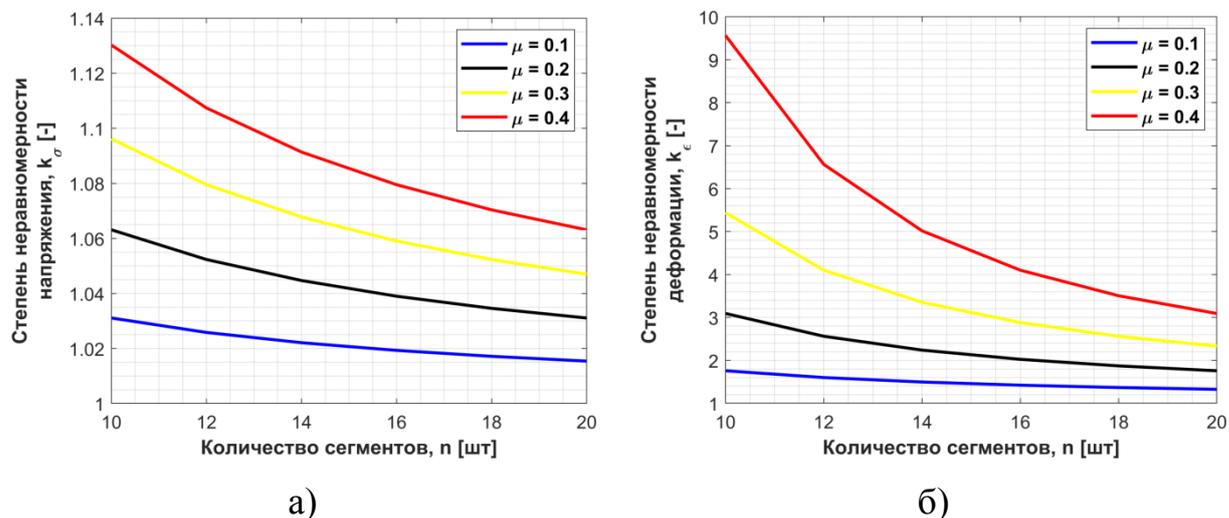


Рисунок 2.9 – Степень неравномерности напряжения (а) и степень неравномерности деформации (б)

Очевидно, что при меньших значениях коэффициента трения, например число сегментов экспандера мало влияет на степени неравномерности напряжения и деформации при $\mu = 0,1$. При высоком контактном трении нужно увеличивать количество сегментов экспандера для снижения степени неравномерности напряжения и деформации для повышения качества ТБД. При ограниченном числе сегментов экспандера в практике обычно снижают коэффициент трения до минимально возможного значения путём выбора рациональных смазок.

2.3 Оценка качества ТБД по степени неравномерности напряжений и деформаций и классификация партий материала для получения продукции с заданными показателями качества

2.3.1 Разработанная методика оценки качества ТБД по степени неравномерности напряженно-деформированного состояния (НДС) при калибровке труб экспандированием

Можно предположить наличие корреляционной связи между качеством труб и показателями неравномерности напряжений и деформаций. На этой основе уровень прогнозируемого качества ТБД предлагается классифицировать по группам, показанным в таблице 2.5, где $[k_{\sigma}]$ и $[k_{\varepsilon}]$ (оба всегда ≥ 1) обозначим как «предельно допустимые значения» величин k_{σ} и k_{ε} соответственно. Критические величины $[k_{\sigma}]$ и $[k_{\varepsilon}]$ можно определить путём сопоставления результатов расчёта или моделирования НДС металла при экспандировании с данными, полученными при сканировании геометрии изделий при поточном производстве труб. Согласно этому, при $k_{\sigma} \leq [k_{\sigma}]$ равномерность распределения напряжений достаточно высока, трубы будут отличаться высокой надёжностью и безопасностью эксплуатации. При $k_{\varepsilon} \leq [k_{\varepsilon}]$ можно ожидать хорошее «геометрическое качество», низкую овальность трубы (см. таб. 2.5).

Таблица 2.5 – Уровень качества ТБД по степеням неравномерности напряжения–деформации

Номер группы	k_{σ}	k_{ε}	Качество продукции	
			Механическое	Геометрическое
1	не более $[k_{\sigma}]$	не более $[k_{\varepsilon}]$	высокое	высокое
2	не более $[k_{\sigma}]$	более $[k_{\varepsilon}]$	высокое	сниженное
3	более $[k_{\sigma}]$	не более $[k_{\varepsilon}]$	сниженное	высокое
4	более $[k_{\sigma}]$	более $[k_{\varepsilon}]$	сниженное	сниженное

Ранее найдены зависимости показателей неравномерности напряжений и деформаций k_{σ} и k_{ε} в стенке трубы от механических свойств материала,

условия трения и других параметров процесса. Они получены из решения системы дифференциальных уравнений равновесия деформируемого тела совместно с условием пластичности металла [59, 61]. Из математического описания эпюр напряжений и деформаций по контуру трубы по всему периметру, учитывающего также наличие зазоров между сегментами при экспандировании, можно выразить:

$$\begin{cases} k_{\sigma} = e^{\mu\theta_k} \\ k_{\varepsilon} = e^{\frac{\mu\theta_k}{x}} \end{cases}, \quad (2.20)$$

где:

$$\begin{cases} \cos\theta_k = \frac{u + R_t + R_{op} \left(\cos\frac{\alpha}{2} - 1 \right)}{\sqrt{(u + R_t - R_{op})^2 + R_{op}^2 + 2(u + R_t - R_{op})R_{op} \cos\frac{\alpha}{2}}} \\ x = \frac{\ln \sigma_b - \ln \sigma_{0,2}}{\ln \left(\frac{\delta_5}{100} - \frac{\sigma_b}{E} \right) - \ln 0,002} \end{cases}. \quad (2.21)$$

Показатели неравномерности напряжений k_{σ} и деформаций k_{ε} представляют собой функции от совокупности аргументов $Q(E, \sigma_{0,2}, \sigma_b, \delta_5, \mu)$. При обследовании партии исходных материалов трубной заготовки, включающей N испытаний перед началом формования штрипса в определенных условиях технологии видно, что значения фактических параметров в совокупности Q при изготовлении подчиняются определенным закономерностям [67-72]. В общем случае характер распределений случайных величин может быть различным. Однако, для разработки метода математического моделирования это не имеет значения. Принципиальным обстоятельством является возможность существования этих закономерностей в реальных производственных условиях. Присутствие влияния значительного количества случайных возмущений ведёт к необходимости изучения рассматриваемых выше переменных как случайных величин. Вид

распределений, являющихся равномерным, нормальным, треугольным (Симпсона) и т.д., зависит от природы материала и от состояния и уровня организации конкретных производств. Кроме рассмотренных числовых характеристик распределений важное значение имеет коэффициент относительной асимметрии λ , который определяет смещение действительного центра группирования каждого из исходных параметров ω от математического ожидания ω_0 (рис. 2.10). Это связано с тем, что их действительные законы распределения, как правило, несимметричны и в производственных условиях коэффициент λ может изменяться в пределах $-0,5...+0,5$ [72].

Для определения показателей неравномерности напряжений и деформаций $(k_\sigma, k_\varepsilon)$ при экспандировании предложен метод математического моделирования, показанный на блок-схеме алгоритма расчёта (рис. 2.11). Здесь предусмотрено, что входные величины являются случайными переменными со своими параметрами распределения. В данном примере рассмотрим 5 параметров в совокупности Q с их интервалами: $E = \bar{E} \pm \Delta E$; $\sigma_{0,2} = \bar{\sigma}_{0,2} \pm \Delta\sigma_{0,2}$; $\sigma_b = \bar{\sigma}_b \pm \Delta\sigma_b$; $\delta_5 = \bar{\delta}_5 \pm \Delta\delta_5$; $\mu = \bar{\mu} \pm \Delta\mu$ и законами распределения, включая совокупность коэффициентов относительной асимметрии $\lambda = (\lambda_E, \lambda_{\sigma_{0,2}}, \lambda_{\sigma_b}, \lambda_{\delta_5}, \lambda_\mu)$.

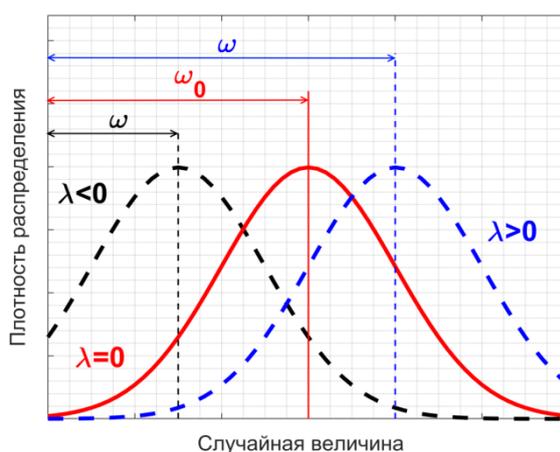


Рисунок 2.10 – Описание коэффициента относительной асимметрии

По результатам моделирования качество ТБД может быть классифицировано по группам как данным характеристикам в таблице 2.5.

Кроме того, для количественной оценки существования связи между изучаемыми совокупностями случайных величин может быть использован коэффициент корреляции r , который подвержен влиянию асимметрии и может меняться от 0 до ± 1 . Чем ближе значение коэффициента к единице (неважно, с каким знаком), тем с большей уверенностью можно утверждать, что между двумя рассматриваемыми совокупностями переменных существует линейная связь. Если окажется, что $r = \pm 1$, то имеет место случай чисто функциональной зависимости (т.е. реализуется идеальная взаимосвязь). Зная коэффициент корреляции, можно дать качественно-количественную оценку тесноты связи. Характеристика силы связи по шкале Чеддока при величине коэффициента парной корреляции r : до 0,3 – очень слабая (практически отсутствует); 0,3...0,5 – слабая; 0,5...0,7 – заметная; 0,7...0,9 – сильная и 0,9...0,99 – очень сильная [71]. Далее, рассмотрим зависимость степеней неравномерности напряжения-деформации ($k_{\sigma}, k_{\varepsilon}$) от исходных параметров $Q(E, \sigma_{0,2}, \sigma_b, \delta_5, \mu)$. Коэффициенты корреляции степеней неравномерности напряжения $r_{\sigma p}$ и деформации $r_{\varepsilon p}$ определяются формулой (2.22), где p может быть параметром E ; $\sigma_{0,2}$; σ_b ; δ_5 или μ :

$$\left\{ \begin{array}{l} r_{\sigma p} = \frac{N \sum_{i=1}^N k_{\sigma i} p_i - \left(\sum_{i=1}^N k_{\sigma i} \right) \left(\sum_{i=1}^N p_i \right)}{\sqrt{\left[N \sum_{i=1}^N k_{\sigma i}^2 - \left(\sum_{i=1}^N k_{\sigma i} \right)^2 \right] \left[N \sum_{i=1}^N p_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N p_i \right)^2 \right]}} \\ r_{\varepsilon p} = \frac{N \sum_{i=1}^N k_{\varepsilon i} p_i - \left(\sum_{i=1}^N k_{\varepsilon i} \right) \left(\sum_{i=1}^N p_i \right)}{\sqrt{\left[N \sum_{i=1}^N k_{\varepsilon i}^2 - \left(\sum_{i=1}^N k_{\varepsilon i} \right)^2 \right] \left[N \sum_{i=1}^N p_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N p_i \right)^2 \right]}} \end{array} \right. \quad (2.22)$$

Коэффициенты корреляции $r_{\sigma p}$ и $r_{\varepsilon p}$ отображают влияние модуля упругости, предела текучести, предела прочности, относительного удлинения, модуля упрочнения и коэффициента трения на степени неравномерности напряжения–деформации и также на качество ТБД. Результат расчёта может быть основой для формулировки технологических коммендаций о контроле партии исходных материалов с целью достижения продукции хорошего качества после экспандирования. Проиллюстрируем использование этой методики конкретным примером ниже.

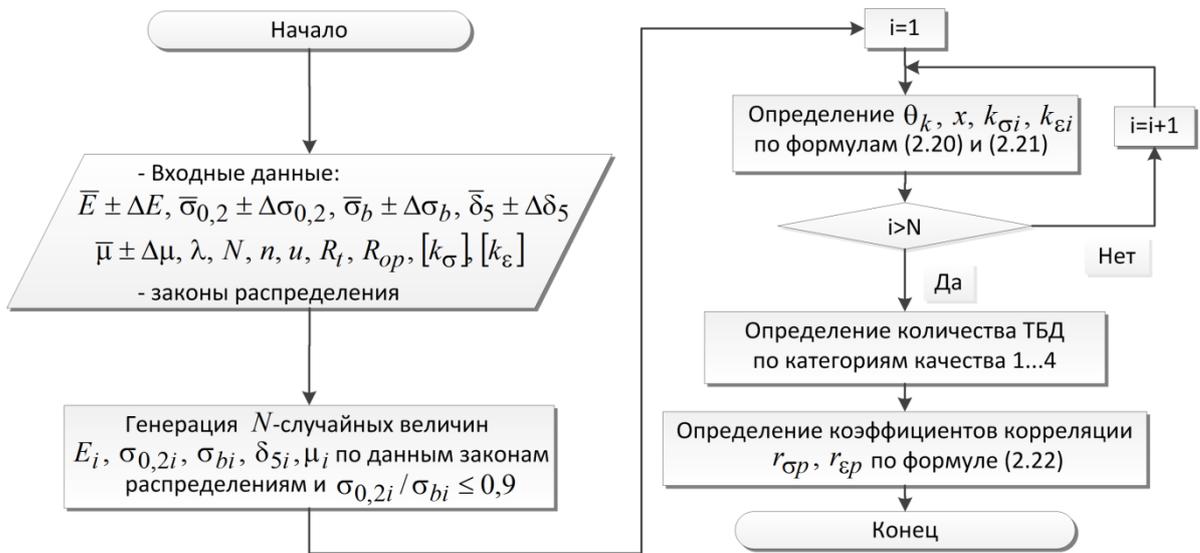


Рисунок 2.11 – Блок схемы алгоритма определения показателей неравномерности напряжений и деформаций при экспандировании

2.3.2 Пример, результаты и обсуждение

Объект – производство труб с наружным диаметром 1420 мм и толщиной стенки 22 мм из стали марки 10Г2ФБЮ класса прочности К60 по ТУ 14-3-1573. Экспандер с радиусом описанной окружности сегментов в сомкнутом состоянии $R_c = 688$ мм; рабочий ход сегментов $u = 20$ мм и число сегментов $n = 12$. Полагаем, что численные значения предельных показателей неравномерности НДС выявлены ранее: $[k_{\sigma}] = 1,07$ и $[k_{\varepsilon}] = 20$. Допустим также, что имеется массив данных по входному контролю штрипса, т.е. известны значения механических свойств, а также

коэффициента трения сегментов по внутренней поверхности трубной заготовки. Представим результат обработки этих данных в виде матрицы со случайными величинами, имеющими известные законы и параметры распределения, которые в конечном виде представлены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Результаты испытаний механических свойств металла, коэффициента трения и их распределения

Случайная величина	Интервал величины	Закон распределения	Коэффициент относительной асимметрии λ	
			λ_1	λ_2
E [ГПа]	210 ± 5	Симпсона	0	0,12
$\sigma_{0,2}$ [МПа]	519 ± 59	Нормальный	0	-0,15
σ_b [МПа]	649 ± 59	Нормальный	0	0,30
δ_5 [%]	20 ± 1	Непрерывный равномерный	0	-0,20
μ [-]	$0,27 \pm 0,10$	Нормальный	0	-0,35

Положим, что надо оценить качество партии труб после экспандирования, получаемых из 10000 листов стали К60. Распределения исходных данных показаны на рисунке 2.12 при генерации $N=10000$ случайных наборов аргументов $Q(E, \sigma_{0,2}, \sigma_b, \delta_5, \mu)$, причём имеется возможность учесть и коэффициент асимметрии λ (см. таб. 2.6). При $\lambda = \lambda_1$ в нашем примере исходные параметры распределяются симметрично (рис. 2.12а), а при $\lambda = \lambda_2$ (рис. 2.12б) центры распределения модуля упругости E и предела прочности σ_b смещаются в сторону больших величин, а предела текучести $\sigma_{0,2}$, относительного удлинения δ_5 и коэффициента трения μ - в сторону меньших значений. Генерация приведённых ниже гистограмм сделана программой в среде MATLAB по алгоритму, представленному на рисунке 2.12.

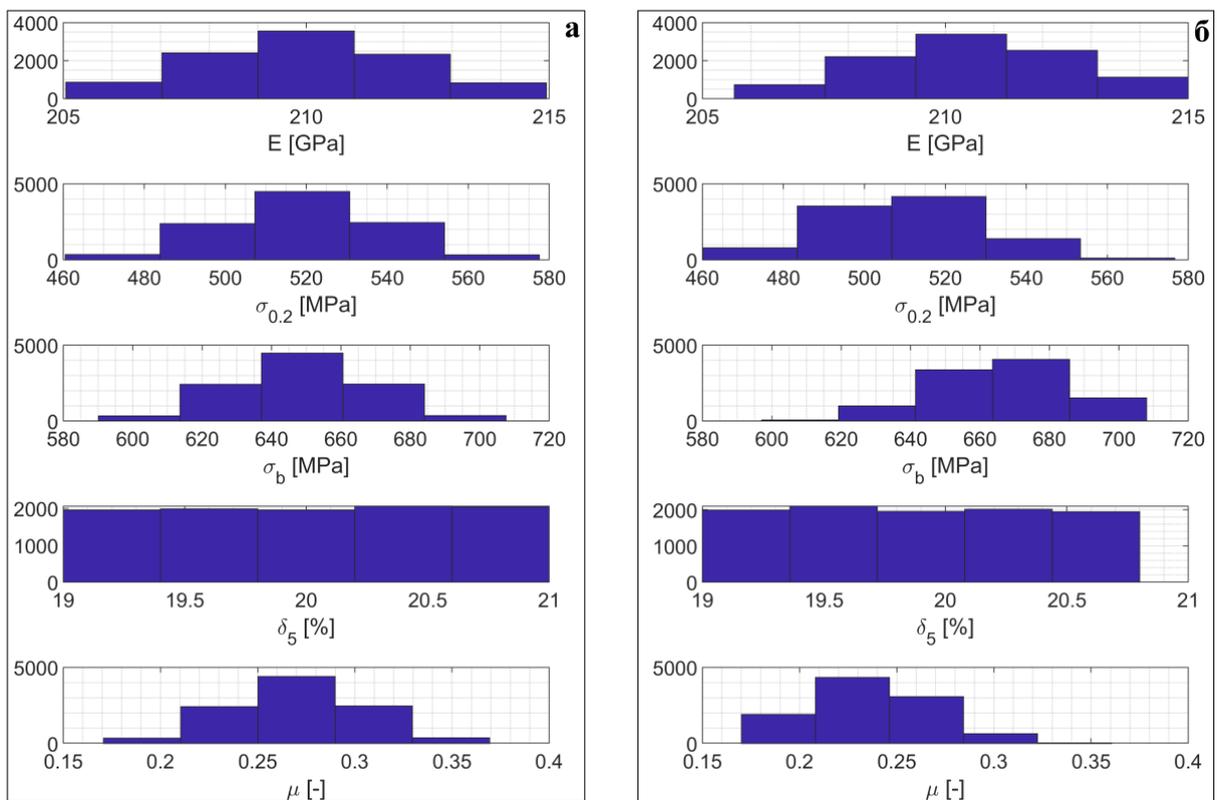


Рисунок 2.12 – Гистограммы распределения механических свойств и коэффициента трения для 10000 наборов исходных параметров по заданным законам распределения

а – при $\lambda = \lambda_1$; б – при $\lambda = \lambda_2$

Наличие исходных данных в виде случайных величин даёт возможность прогнозировать качество труб посредством определения показателей неравномерности напряжений и деформаций (k_σ, k_ε) при экспандировании, которые в этом случае можно выявить также как случайные величины. Результаты моделирования параметров НДС представлены на рисунке 2.13 и в таблице 2.7.

Когда значения входных параметров сконцентрированы в основном в области центра распределения ($\lambda = \lambda_1$), число деталей группы 1 (группа высокого качества) составляет около 52% от общего объёма продукции, на долю изделий групп 2, 3, 4 (групп сниженного качества) также приходится

большой объем, около 48% (рис. 2.13а). Наиболее низкое качество имеют изделия группы 4, но их доля составляет только 0,22%.

Можем установить, например, что партия изделий в целом считается «хорошей», если количество изделий сниженного качества составляет менее 20% от общего объема продукции. В нашем примере с преобладанием ассиметричного характера распределения параметров свойств и коэффициента трения полученная партия труб большого диаметра после экспандирования теоретически не соответствует этому уровню качества.

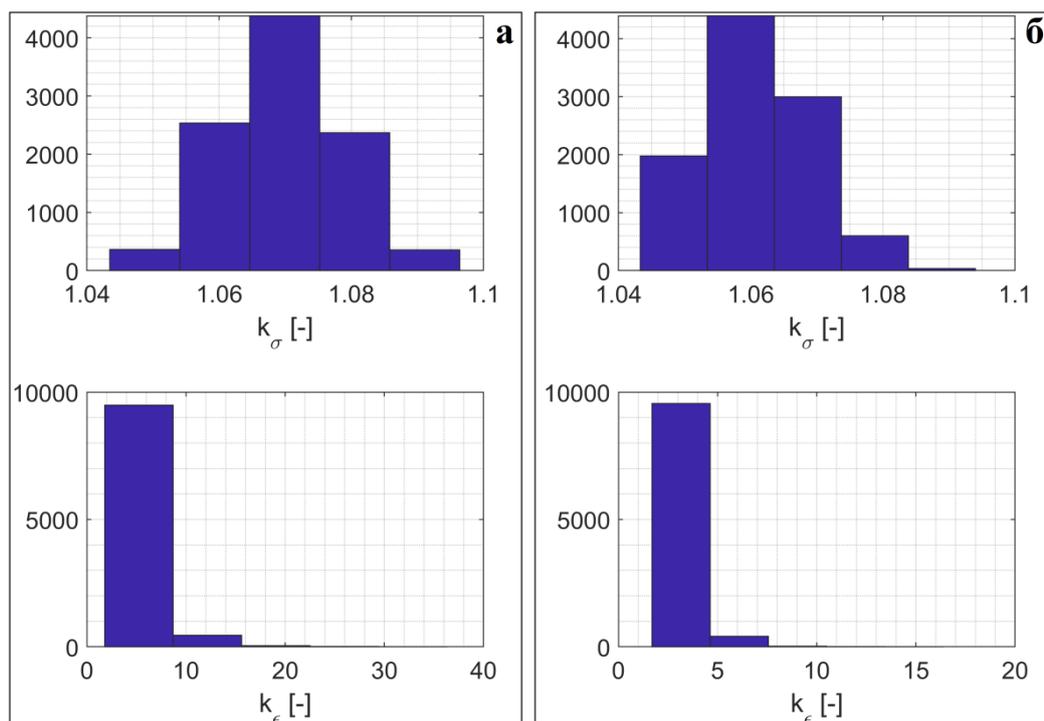


Рисунок 2.13 – Распределение степеней неравномерности напряжения и деформации при экспандировании

а – для $\lambda = \lambda_1$; б – для $\lambda = \lambda_2$

При ассиметричном характере распределений ($\lambda = \lambda_2$) со сдвигом в сторону меньших значений $\sigma_{0,2}$, δ_5 , μ и больших E , σ_b , число деталей группы повышенного качества 1 составляет около 86%, а в группу пониженного качества 2, 3, 4 попадает только около 14% (рис. 2.13б). На

основе принятого норматива в 20 % данная партия может считаться соответствующей требуемому качеству.

Кроме того, из таблицы 2.7 можно выявить корреляцию показателей неравномерности НДС с данными по контролю механических свойств и условий контактного трения. Так, коэффициент трения существенно влияет на показатель неравномерности деформаций при экспандировании и, соответственно, на эффективность калибровки и выравнивание геометрии труб. При высоком значении коэффициента трения часть контура труб будет недостаточно деформироваться, калиброваться с остаточной овальностью. Неравномерное распределение деформаций по контуру трубы, как показано ниже, может быть определено с помощью координатной сетки, нанесённой тонким лазерным лучом. Отсюда вытекает необходимость контроля условий трения, качества смазочных материалов и способа их подачи, чтобы улучшить качество продукции.

Из таблицы 2.7 также следует, что предел текучести и прочности значительно влияют на показатели неравномерности деформации, с увеличением предела текучести и уменьшением предела прочности величина степени k_{ϵ} увеличивается, т.е. снижается геометрическое качество труб. А модуль упругости и относительное удлинение очень слабо влияют на показатели неравномерности деформации и геометрию труб.

Из приведенного примера можно сделать заключение, что для повышения равномерности проработки металла при экспандировании и соответствующего повышения качества труб целесообразно иметь сниженные (в пределах поля допуска) значения предела текучести, увеличенные значения предела прочности и модуля упругости, а также обеспечивать хорошие условия трения в процессе экспандирования.

Таким образом, рассмотренная методика позволяет оценивать результаты контроля механических свойств металла перед экспандированием и технологической смазки, связывать эти данные с качеством труб посредством

определения показателей неравномерности напряжений и деформаций при экспандировании, которые в свою очередь характеризуют эффективность заключительной операции калибровки труб большого диаметра.

Таблица 2.7 – Результаты моделирования для классификации и оценки качества партии из 10000 труб

I. Степени неравномерности напряжения-деформации				
Номер группы	k_{σ}	k_{ε}	Количество деталей при	
			$\lambda = \lambda_1$	$\lambda = \lambda_2$
1	не более 1,07	не более 20	5159	8638
2	не более 1,07	более 20	0	0
3	более 1,07	не более 20	4819	1362
4	более 1,07	более 20	22	0
II. Коэффициенты корреляции степеней неравномерности				
Параметр P	напряжения $r_{\sigma P}$		деформации $r_{\varepsilon P}$	
	Величина	Оценка	Величина	Оценка
E	0	-	-0,0180	Очень слабая
$\sigma_{0,2}$	0	-	0,5594	Заметная
σ_b	0	-	-0,4542	Слабая
δ_5	0	-	0,0227	Очень слабая
μ	1	Идеальная взаимосвязь	0,3789	Слабая

Выводы по главе 2

1. На базе уравнений механики разработаны математические зависимости распределения напряжений, деформаций, и энергосиловых параметров по контуру трубы при экспандировании, учитывающие наличие сегментов экспандера и их количество, наличие зазоров между сегментами, а также условия трения (отличается от известных методик как В.И. Феодосьева и М.В. Сторожева,...).

2. Установлен метод оценки взаимосвязи показателей неравномерности напряжений и деформаций при экспандировании с размерами сегментов, трубы, с механическими свойствами металла и контактным трением сопрягаемых поверхностей сегментов с трубной заготовкой. Чем ближе значения этих

критериев к единице, тем более равномерным является распределение НДС по контуру трубы. В этом случае выше используются возможности операции экспандирования для калибровки трубной заготовки по всему её контуру. Наоборот, чем выше коэффициент неравномерности напряжения, тем выше неравномерность распределения напряжений. Между тем, неравномерность напряжений и деформаций может привести к появлению остаточных напряжений, которые значительно ослабляют изделие, в особенности в зоне сварного шва, при воздействии агрессивной среды. Повышенные значения показателя неравномерности деформации при экспандировании свидетельствуют о повышенной вероятности отклонения геометрии трубы от правильной окружности, а значит о сниженном качестве изделий при стыковой сварке труб при монтаже трубопровода. Поэтому с целью повышения качества трубных изделий нужно снизить степени неравномерности напряжения и деформации до минимально возможного уровня.

3. Наличие математического выражения для определения показателей неравномерности НДС при экспандировании трубных заготовок позволяет классифицировать трубы большого диаметра по качеству. Основой для этой классификации является гипотеза о том, что наивысшее качество ТБД обеспечивается при равномерном распределении деформаций и напряжений по окружности трубы, когда принятые показатели неравномерности напряжений и деформаций близки к единице.

4. В описанном выше примере принятие исходной партии материала с повышенными значениями предела прочности, модуля упругости, и с меньшими значениями предела текучести, а также экспандирование с минимальными значениями коэффициента трения способствуют повышению качества труб большого диаметра.

5. Разработанный алгоритм моделирования учитывает вероятностный характер исходных данных в виде показателей механических свойств материала и коэффициента контактного трения. Использование генерации случайных чисел с заданными законами распределения выполнено преобразование

исходных данных в искомое распределение показателей неравномерности НДС при экспандировании, которое является мерой эффективности этого процесса калибровки и стабильности качества продукции.

ГЛАВА 3. ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭКСПАНДИРОВАНИЯ ТРУБНОЙ ЗАГОТОВКИ

3.1 Физическая модель процесса экспандирования

Для исследования процесса экспандирования в лабораторных условиях изготовлена специальная 8–сегментная экспандерная головка из инструментальной стали. Были подготовлены трубные образцы для проведения опытов с образцами из стали, меди и алюминиевого сплава средней прочности. В качестве оптимального модельного материала был взят алюминиевый сплав АД31. Этот материал позволяет исследовать процесс деформации в широком диапазоне изменения граничных условий, на поверхности образцов из этого сплава можно наносить высококонтрастную координатную сетку.

3.1.1 Подготовка к экспериментам

Материалы для физической модели в виде трубных заготовок: алюминиевый сплав АД31, химический и механические свойства которого представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Химический состав и механические свойства алюминиевого сплава АД31

Химический состав в % по ГОСТу 4784-97					
Fe	Si	Mn	Cr	Ti	Примесей
≤ 0,5	0,2...0,6	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,15	Прочие, каждая 0,05; всего 0,15
Al	Cu	Mg	Zn		
97,65...99,35	≤ 0,1	0,45...0,9	≤ 0,2		
Механические свойства при температуре 20 ⁰ С по ГОСТу 18482-79					
Модуль упругости E [МПа]	Предел текучести $\sigma_{0,2}$ [МПа]		Предел прочности σ_b [МПа]		Относительное удлинение при разрыве δ_5 [%]
71000	60		130		12

Координатная сетка на наружной поверхности трубных заготовок нанесена лазерной гравировкой (широкие возможности лазерной обработки известны).

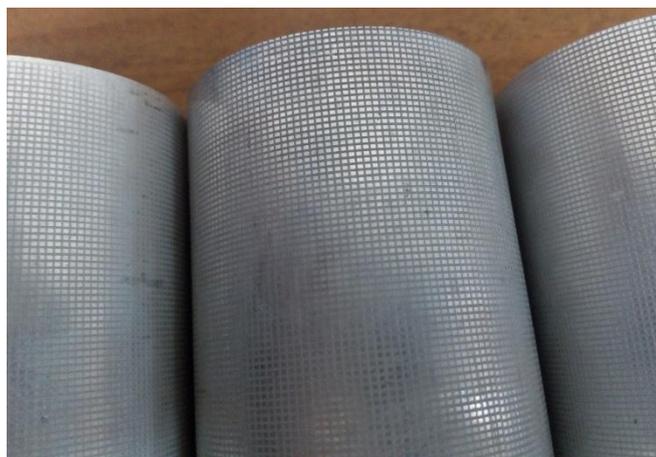


Рисунок 3.1 – Трубные заготовки после лазерной гравировки

12 образцов в виде трубных заготовок $\phi 60 \times 3$ выбраны из алюминиевого сплава АД31, в том числе 4 образца для экспандирования без смазки, 4 образца для экспандирования со смазкой и 4 образца для экспандирования со смазкой после дробеструйной обработки (ДО) на внутренней поверхности;

Проектирование и изготовление экспандерной головки: 8–сегментная экспандерная головка состоит из пирамиды 1, сегментов 2 и буфера 3 (см. приложение А).

Оснастка после изготовления представлена на рисунке 3.2:



Рисунок 3.2 – Изготовленный инструмент для физического моделирования процесса экспандирования

Методика определения коэффициента трения: наиболее распространенными методами экспериментального определения фактора трения m являются опыты по осадке кольцевых заготовок.

Методика определения факторов трения заключается в проведении экспериментальных исследований с использованием смазки при заданных условиях деформирования (температура, давление, скорость скольжения, материал), близких к практическим. Опытные значения фактора трения используются при компьютерном моделировании в качестве одного из граничных условий.

Метод RCT предполагает осадку кольцевой заготовки с заранее определенным соотношением начальных наружного, внутреннего диаметров и высоты. В технической литературе [73-77] рекомендуются соотношения 6:3:2, 6:3:1, 6:3:0.5. Заготовку осаживают на величину до 60% и определяют величину относительного уменьшения внутреннего диаметра.

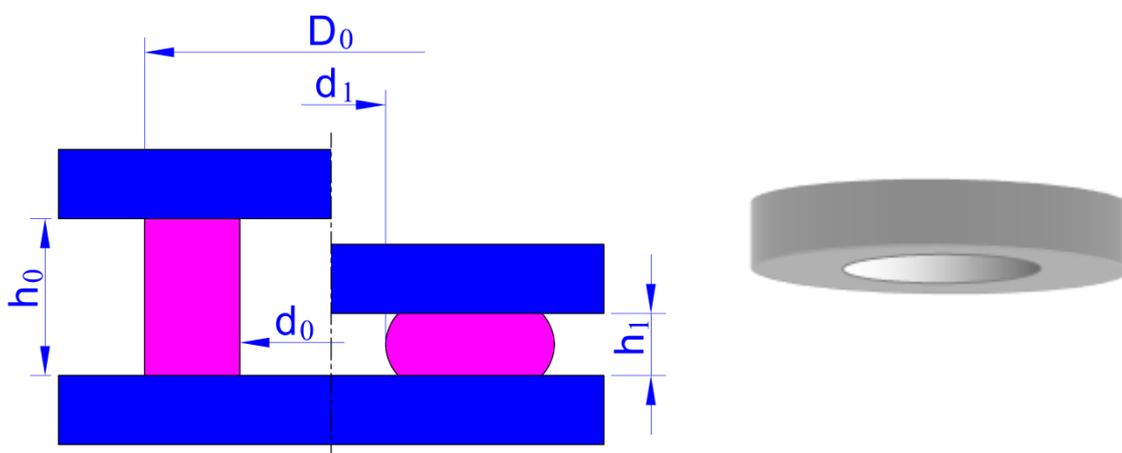


Рисунок 3.3 – Схема экспериментов для определения коэффициента трения с использованием осадки образцов

В зависимости от качества смазки внутренний диаметр может как увеличиться (при хорошей смазке), так и уменьшиться.

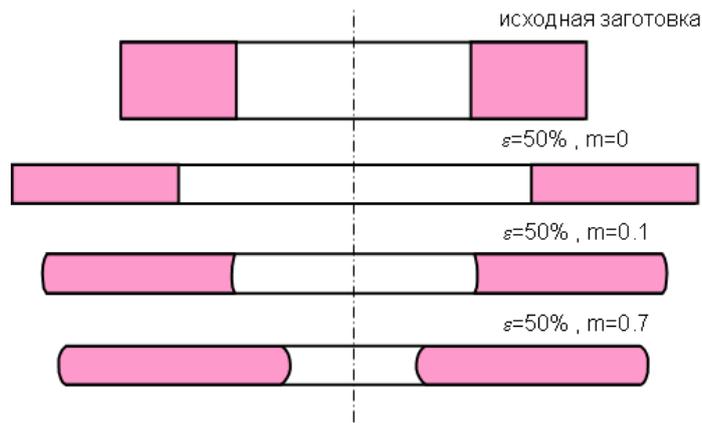


Рисунок 3.4 – Особенность деформации образцов при осадке с разными факторами трения

В качестве оценочных значений факторов трения можно использовать калибровочные графики, полученные на основе аналитических методов. На рисунке приведены калибровочные графики для соотношения 6:3:1 [73].

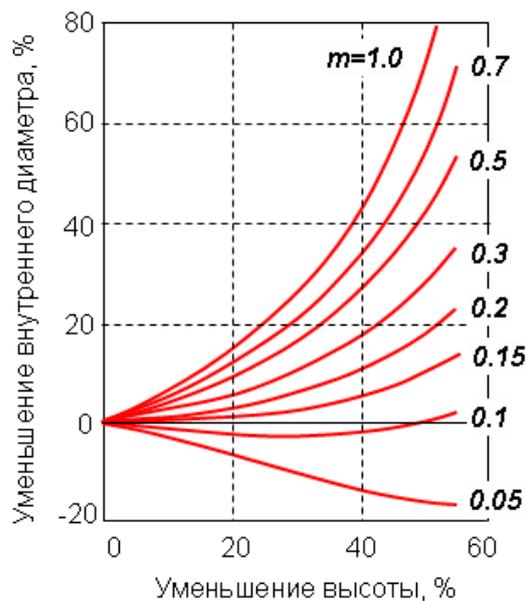


Рисунок 3.5 – Диаграмма определения фактора трения для соотношения размеров заготовки $D_0 : d_0 : h_0 = 6:3:1$

Как показали более глубокие исследования [77], значения фактора трения зависят от свойств деформируемого материала, температуры испытаний и теплообмена с инструментом и окружающей средой, поэтому

калибровочные графики следует получать моделированием в QForm VX 8.2 при конкретных условиях, соответствующих эксперименту.

Коэффициент трения μ определится по формуле $\mu = \frac{m}{\sqrt{3}}$. В качестве технологической смазки, используемой в физическом моделировании, использовалось машинное масло.

Эксперименты по определению коэффициента трения сделаны на лабораторной установке ОМД–3 на кафедре ОМД в НИТУ МИСиС. Размеры образцов при определении коэффициентов трения представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Размеры образцов при определении коэффициентов трения для алюминиевого сплава АД31

Наружный диаметр D_0 , мм	Внутренний диаметр d_0 , мм	Высота h_0 , мм	Примечание
42,0	21,0	7,0	$D_0 : d_0 : h_0$ равно 6:3:1

Измеряемые величины в экспериментах для определения коэффициента трения:

$$\Delta d = \frac{d_1 - d_0}{d_0} \cdot 100 \text{ – уменьшение внутреннего диаметра, \%};$$

$$\Delta h = \left| \frac{h_1 - h_0}{h_0} \right| \cdot 100 \text{ – уменьшение высоты заготовки, \%};$$

m – фактор трения; μ – коэффициент трения; μ_{tb} – среднее значение коэффициента трения.

Результаты измерений фактора и коэффициента трения из АД31 в разных условиях поверхности представлены на рисунке 3.6 и в таблице 3.3.

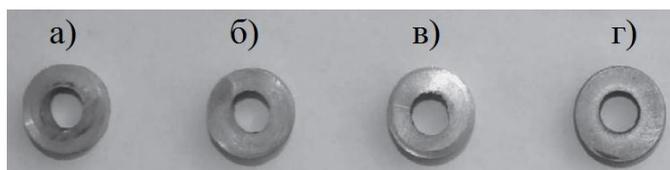


Рисунок 3.6 – Фото образцов при определении коэффициента трения

а – перед экспериментом; б – без смазки;

в – со смазкой; г – со смазкой после ДО

Таблица 3.3 – Измерение коэффициента трения между инструментом и алюминиевого сплава в разных состояниях поверхности

Состояние поверхности	№	Измеряемые величины								
		d_0	d_1	h_0	h_1	Δd	Δh	m	μ	μ_{tb}
Без смазки	1	21,0	17,7	7,0	4,8	15,8	31,2	0,452	0,261	0,26
	2	21,0	17,5	7,0	4,7	16,6	32,1	0,454	0,262	
	3	21,0	17,6	7,0	4,8	16,0	31,2	0,450	0,260	
	4	21,0	17,5	7,0	4,7	16,6	32,1	0,454	0,262	
	5	21,0	17,7	7,0	4,8	15,8	31,2	0,452	0,261	
Со смазкой	1	21,0	17,9	7,0	4,5	14,9	35,4	0,315	0,182	0,18
	2	21,0	18,0	7,0	4,5	14,5	35,4	0,312	0,180	
	3	21,0	17,9	7,0	4,5	14,9	35,4	0,315	0,182	
	4	21,0	17,9	7,0	4,5	14,9	35,4	0,315	0,182	
	5	21,0	17,8	7,0	4,6	15,2	36,3	0,315	0,182	
Смазка после ДО	1	21,0	18,6	7,0	4,3	11,2	38,1	0,225	0,130	0,13
	2	21,0	18,7	7,0	4,4	11,0	37,5	0,227	0,131	
	3	21,0	18,7	7,0	4,4	11,0	37,5	0,227	0,131	
	4	21,0	18,7	7,0	4,4	11,0	37,5	0,227	0,131	
	5	21,0	18,6	7,0	4,3	11,2	38,1	0,225	0,130	

Оборудования для экспериментов: В НИТУ МИСиС имеются условия для проведения, как лабораторных, так и промышленных испытаний процессов производства бесшовных труб. Испытания механических свойств металлов на растяжение проведены на испытательной машине Zwick Roell 200кН с применением экстензометра (рис. 3.7).



Рисунок 3.7 – Испытательная машина Zwick Roell 200кН

Лабораторная установка ОМД–3 [78] представляет собой комплекс «гидропресс-компьютер» с программированием перемещений и записью индикаторных диаграмм (рис. 3.8). На этом прессе эксперименты по экспандированию трубных заготовок. Сбор данных осуществляется устройством, интегрированным в систему управления прессом, а их обработка и визуализация осуществляется посредством персонального компьютера.



Рисунок 3.8 – Комплектность гидравлического пресса ОМД–3

Комплектность гидравлического пресса включает [78]: настольный гидравлический пресс, насосная станция, набор штампов и заготовок, набор измерительного инструмента, персональный компьютер и программное обеспечение.

Таблица 3.4 – Основные технические данные гидравлического пресса

№	Название характера	Значение
1	Номинальное усилие, кН	100
2	Скорость ползуна, не менее, мм/сек	5
3	Ход ползуна, мм	100
4	Производительность, л/мин	3,6
5	Максимальное давление, МПа	12
6	Габаритные размеры, мм (ДхВ)	80x120

Измерения габаритов тела проводились микрометром и штангенциркулем с глубиномером. Класс точности 1. Диапазоны измерения: 0...150 мм.

Периметр контура измерялся рулеткой.

3.1.2 Схема экспериментов процесса экспандирования

В лабораторных опытах использовался 8-сегментный инструмент и пуансон с наклонными контактными плоскостями (рис. 3.11), скорость опускания пуансона (п.2) $v = 1$ мм/с. Рабочий ход сегментов (п.3) будет u по радиальному направлению; трубная заготовка будет экспандирована на поверхности буфера 4.

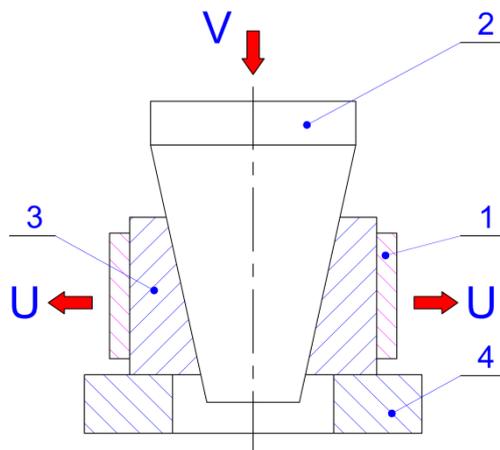


Рисунок 3.11 – Конструкция физического моделирования процесса экспандирования

1 – трубная заготовка; 2 – пирамида (пуансон);

3 – сегменты головки; 4 – буфер

Настройка физической модели на гидравлическом прессе ОМД-3 представлена на рисунке 3.12:

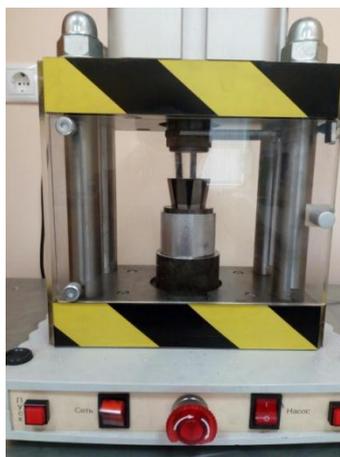


Рисунок 3.12 – Физическое моделирование процесса экспандирования на прессе ОМД-3 100 кН

3.2 Методика предварительного моделирования процесса экспандирования лабораторных образцов в программном комплексе QForm

Параллельно с физическим экспериментом проведено конечно-элементное моделирование процесса экспандирования образцов идентичных тем, которые по режимам, совпадающим с условиями лабораторного эксперимента. Целью являлась здесь проверка точности и возможная настройка параметров компьютерного моделирования. 2D-геометрические модели заготовки и инструмента построены на программном обеспечении AutoCad 2014.

Аппроксимированная кривая сопротивления деформации σ_s [МПа] для алюминиевого сплава АД31 определена испытаниями растяжений образцов на машине Zwick Roell 200кН с использованием уравнения (2.3) в главе 2, для алюминиевого сплава АД31:

$$\sigma_s = \begin{cases} 60 & \text{если } \varepsilon_p \leq 0,002 \\ 194,8\varepsilon_p^{0,1895} & \text{если } \varepsilon_p > 0,002 . \end{cases}$$

График кривой сопротивления деформации для добавления в данные программного комплекса QForm представлен на рисунке 3.13:

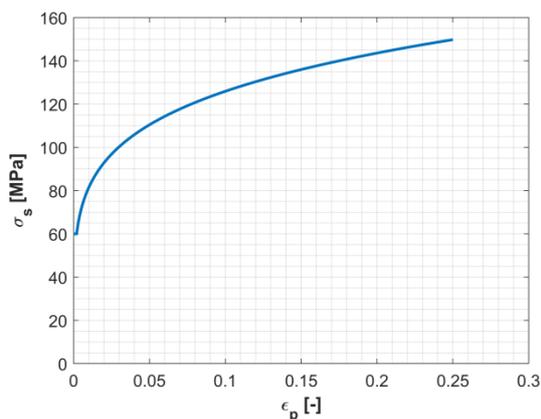


Рисунок 3.13 – Кривая сопротивления деформации для сплава АД31

Коэффициенты трения для моделирования по закону Кулона даны в таблице 3.4. Используется адаптивная сетка для моделирования по алгоритму программы QForm, проведена генерация мелкой сетки для повышения точности и сходимости решения. Максимальный размер элемента конечно-элементной сетки 0,3мм. Материал сегментов – сталь 9ХВГ, инструмент принят жестким телом. Условие остановки в моделировании выбрано соответственно времени движения сегментов в физическом моделировании.

Компьютерное моделирование процесса экспандирования с полями интенсивности напряжения и тангенциальной деформации для трубной заготовки показано на рисунке 3.14.

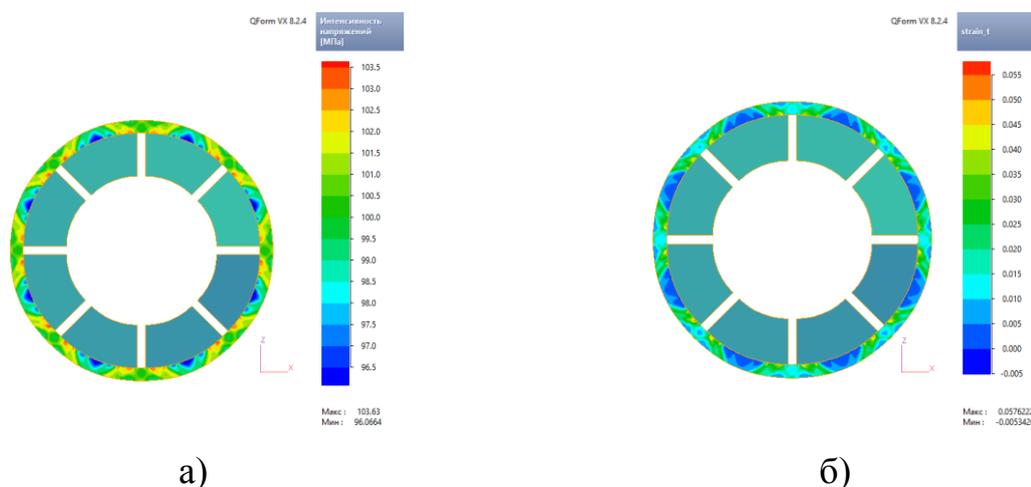


Рисунок 3.14 – Поля интенсивности напряжения (а) и тангенциальной деформации (б) при экспандировании на трубную заготовку из АД31

Периметр и суммарная деформация наружного контура после экспандирования при моделировании рассчитывались с использованием пользовательской подпрограммы в среде QForm на языке LUA [73].

3.3 Результаты и выводы относительно адекватности компьютерного моделирования на основе сравнения с данными, полученными на физической модели процесса экспандирования

С каждым рабочим ходом сегментов экспандера u , периметр наружной контура образцов определен до и после экспандирования (C_1 и C_2) для физического и компьютерного моделирований. Суммарная тангенциальная деформация по контуру выражается формулой: $\varepsilon_{\theta}^{\Sigma} = \frac{C_2 - C_1}{C_1} \cdot 100\%$. При моделировании исходный периметр наружного контура трубной заготовки $C_1 = \pi \cdot 60 = 188,4$ мм.

Отличие компьютерного моделирования от физического определится выражением $\Delta\varepsilon_{\theta} = \frac{\left| \left(\varepsilon_{\theta}^{\Sigma} \right)_M - \left(\varepsilon_{\theta}^{\Sigma} \right)_Э \right|}{\left(\varepsilon_{\theta}^{\Sigma} \right)_Э} \cdot 100\%$, где: $\left(\varepsilon_{\theta}^{\Sigma} \right)_M$ и $\left(\varepsilon_{\theta}^{\Sigma} \right)_Э$ - суммарная тангенциальная деформация, полученная при компьютерном и физическом моделировании соответственно.

Результаты компьютерного моделирования (Мод.) и физического моделирования (Эксп.) при экспандировании для трубных образцов из алюминиевого сплава АД31 представлены в таблиц 3.5; в виде графика они показаны на рисунке 3.15.

Таблица 3.5 – Параметры наружной поверхности трубной заготовки из АД31 после экспандирования

№	u , мм	C_2 , мм		$\varepsilon_{\theta}^{\Sigma}$, %		$\Delta\varepsilon_{\theta}$, %	Примечание
		Мод.	Эксп.	Мод.	Эксп.		
1	0,5	191,9	191,6	1,86	1,72	7,91	Без смазки ($\mu = 0,26$)
2	1,0	193,7	193,4	2,81	2,66	5,80	
3	1,5	196,9	197,5	4,51	4,82	6,34	
4	2,0	201,1	201,7	6,74	7,04	4,26	
5	2,5	203,1	203,6	7,80	8,05	3,15	

6	0,5	191,4	191,1	1,59	1,46	8,99	Со смазкой ($\mu = 0,18$)
7	1,0	193,4	193,0	2,65	2,47	7,43	
8	1,5	196,6	196,3	4,35	4,22	3,19	
9	2,0	199,6	200,2	5,94	6,28	5,45	
10	2,5	202,7	203,1	7,59	7,81	2,83	
11	0,5	191,0	190,8	1,38	1,27	8,52	Смазка после “ДО” ($\mu = 0,13$)
12	1,0	193,2	192,8	2,55	2,34	8,82	
13	1,5	196,2	195,8	4,14	3,93	5,41	
14	2,0	199,3	198,9	5,79	5,55	4,37	
15	2,5	202,1	1201,2	7,27	6,81	6,72	

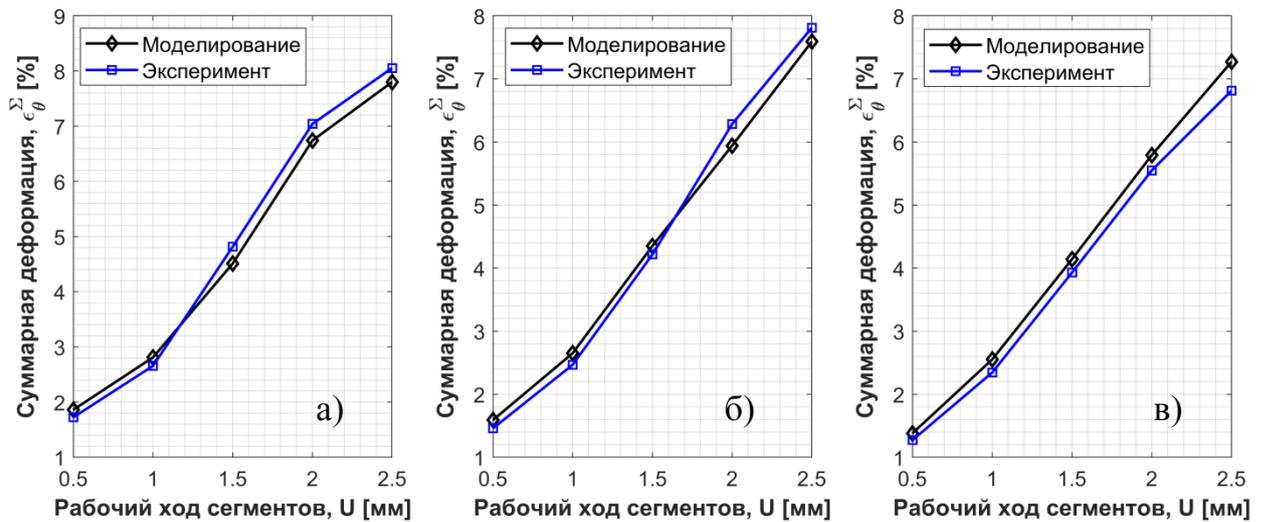


Рисунок 3.15 – График суммарной деформации при экспандировании
трубной заготовки из АД31 в разных условиях трения
а – при $\mu = 0,26$; б – при $\mu = 0,18$; в – при $\mu = 0,13$

Схема измерений тангенциальной деформации на наружной поверхности
трубной заготовки после экспандирования представлена на рисунке 3.16.

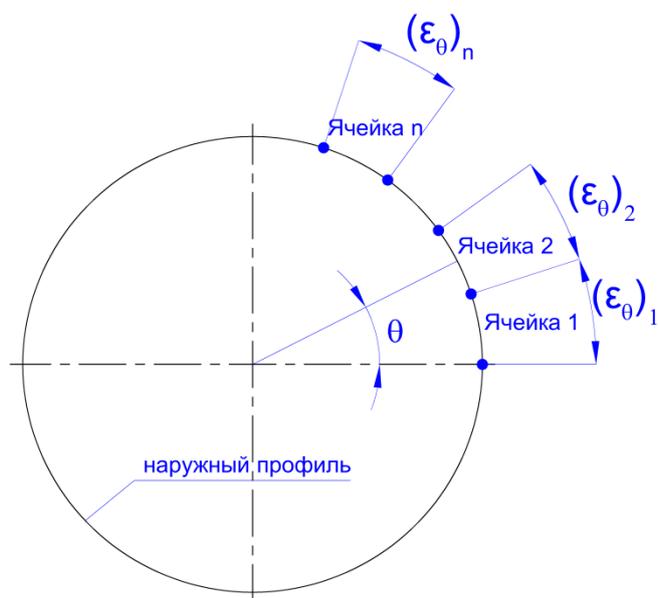


Рисунок 3.16 – Схема измерений тангенциальной деформации на наружной поверхности трубной заготовки после экспандирования
 Сетка до и после экспериментов процесса экспандирования показана на рисунке 3.17.

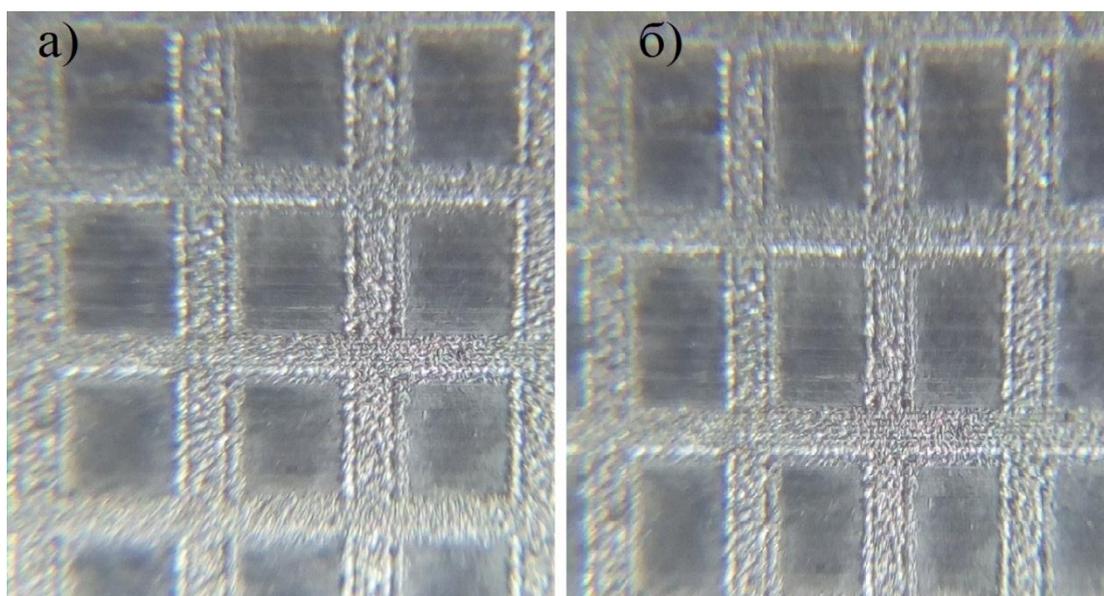


Рисунок 3.17 – Изменение размеров сеток на наружном профиле трубной заготовки

а – перед экспандированием; б – после экспандирования

Регистрация значений тангенциальной деформации после экспандирования из физического моделирования для некоторых образцов

представлена в таблице 3.6; их сравнения с компьютерным моделированием показаны на рисунке 3.18.

Таблица 3.6 – Результаты измерений тангенциальной деформации после экспандирования по 1/8 наружного периметра ($0..45^0$)

Номер ячейки	Угол θ , град.	Тангенциальная деформация ε_θ для образцов из таблицы 3.5			
		1	4	6	9
1	0,9574	0,0118	0,0336	0,0344	0,0181
2	2,8723	0,0139	0,0452	0,0394	0,0203
3	4,7872	0,0127	0,0335	0,0379	0,0205
4	6,7021	0,0154	0,0613	0,0379	0,0209
5	8,6170	0,0161	0,0671	0,0499	0,0226
6	10,5319	0,0207	0,0866	0,0524	0,0253
7	12,4468	0,0197	0,0719	0,0452	0,0271
8	14,3617	0,0212	0,0894	0,0522	0,0260
9	16,2766	0,0246	0,1074	0,0536	0,0275
10	18,1915	0,0204	0,0881	0,0393	0,0242
11	20,1064	0,0188	0,1098	0,0444	0,0217
12	22,0213	0,0204	0,0715	0,0404	0,0185
13	23,9362	0,0186	0,1004	0,0350	0,0187
14	25,8511	0,0230	0,0795	0,0414	0,0226
15	27,7660	0,0214	0,1068	0,0497	0,0256
16	29,6809	0,0226	0,0865	0,0533	0,0237
17	31,5957	0,0217	0,0723	0,0559	0,0274
18	33,5106	0,0186	0,0638	0,0495	0,0275
19	35,4255	0,0196	0,0530	0,0450	0,0222
20	37,3404	0,0175	0,0487	0,0394	0,0237
21	39,2553	0,0141	0,0456	0,0395	0,0238
22	41,1702	0,0130	0,0378	0,0400	0,0226
23	43,0851	0,0127	0,0305	0,0440	0,0197
24	45,0000	0,0131	0,0413	0,0400	0,0199

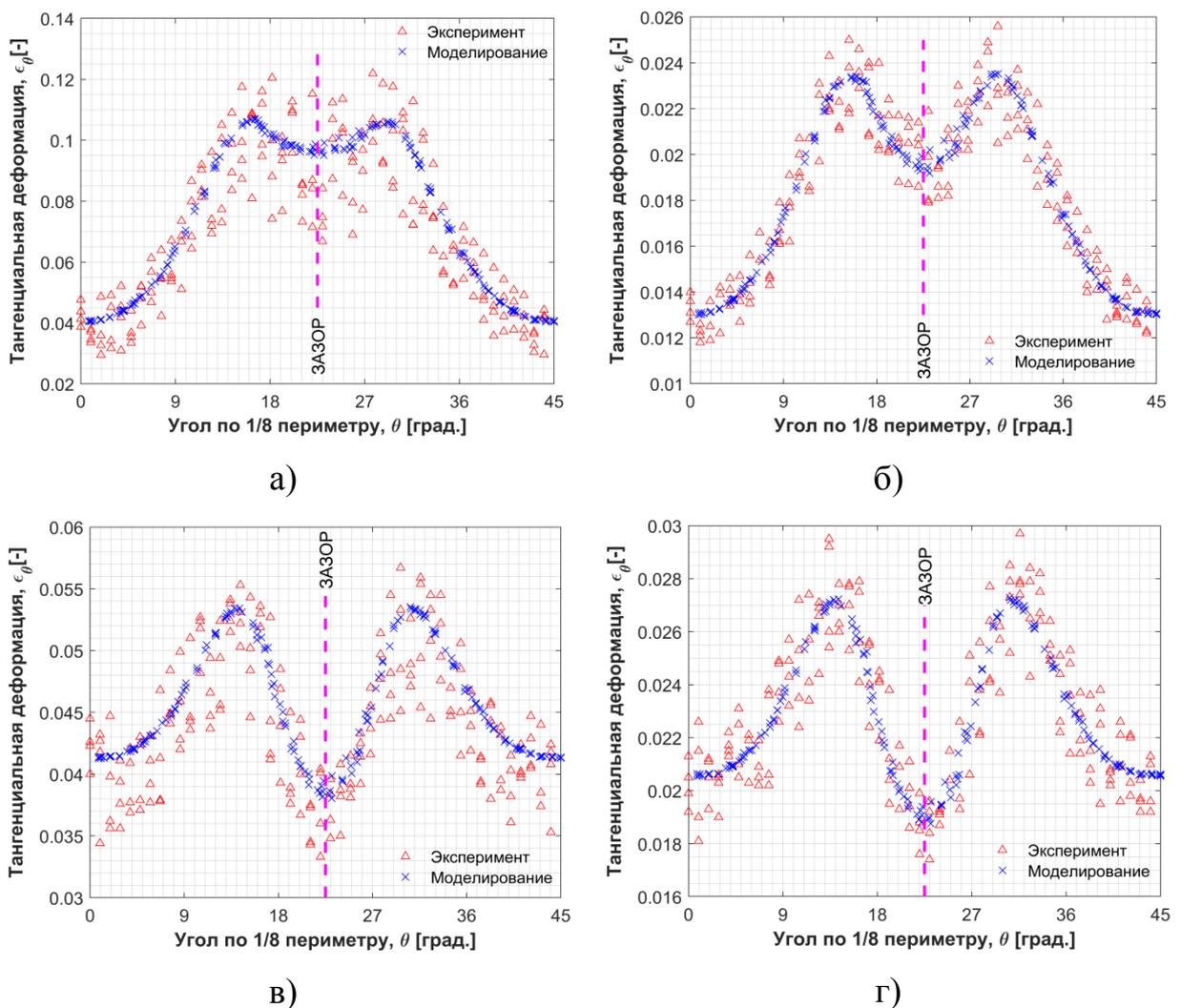


Рисунок 3.18 – Распределение тангенциальной деформации на наружной поверхности трубной заготовки из АД31 по экспериментальным данным и результатам моделирования (табл. 3.5)

а – образец №1; б – образец №4; в – образец №6; г – образец №9

Полученные отклонения не более 9%, это показывает, что применение QForm позволяет с приемлемой точностью прогнозировать НДС при экспандировании трубной заготовки. Полученное незначительное отличие позволяет положительно оценить возможность применения программного комплекса QForm для моделирования процесса экспандирования трубных заготовок. На этой основе можно допустить, что процесс экспандирования труб большого диаметра можно исследовать ниже только с помощью среды QForm с приемлемой точностью, избегая дорогостоящих промышленных экспериментов.

Выводы по главе 3

1. Спроектирована и изготовлена оснастка в виде головки экспандера, которая установлена на гидравлическом прессе ОМД–3 для исследования течения металла трубной заготовки при экспандировании.

2. Проведены эксперименты для определения коэффициента трения в различных условиях трения. Использование смазки и также дробеструйная обработка поверхности (перед операциями формовки) позволяют существенно снижать контактное трение при экспандировании, что положительно скажется на качестве ТБД.

3. Проведены эксперименты образцов с координатными сетками в лабораторных условиях с целью исследования процесса экспандирования и определения локальных тангенциальных деформаций.

4. Полученные отличия компьютерного моделирования от физического (3–9) % показывают, что применение QForm позволяет с приемлемой точностью прогнозировать локальные значения параметров НДС при экспандировании трубной заготовки.

ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭКСПАНДИРОВАНИЯ ТБД С ПОМОЩЬЮ СОВРЕМЕННЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ МОДЕЛИРОВАНИЙ

4.1 Характер моделирования процесса экспандирования ТБД в программном комплексе QForm

В настоящее время метод конечных элементов (МКЭ) широко применяется в инженерной практике в различных областях человеческой деятельности. Это самый популярный метод решения задач обработки металлов давлением проблем штамповки, специальных задач прокатки и прессования. МКЭ – это численный метод, основанный на определенных предположениях, в следствии чего при постановке задачи, задании исходных данных, составлении уравнений и их решении возникают погрешности. Этот метод, наряду с методом верхних оценок, основан на использовании вариационных принципов механики сплошных сред.

Метод основан на разбиении области течения на ряд элементарных многоугольных областей (конечных элементов (КА)), вершины которых образуют узлы. Непрерывное поле скоростей заменяется их дискретными значениями в узловых точках, определяемых с использованием принципов механики сплошной среды. Основная идея МКЭ заключается в том, что любая непрерывная функция может быть аппроксимирована рядом более простых функций, каждая из которых определяется на одной (области). Например, при кусочно-линейной аппроксимации непрерывной функции одной переменной область определения функции делится на несколько участков, каждый из которых заменяет действительную функцию прямой, проходящей через граничные точки. Коэффициенты, определяющие уравнения этих прямых, зависят от значений функции на границах участков. Таким образом, непрерывная функция заменяется набором значений в отдельных точках, и поведение функции между точками определяется приближенно. В то же время необходимо соблюдать, чтобы новые функции удовлетворяли определенным условиям совместности на его границе [79].

Увеличение количества участков увеличивает точность аппроксимации. В этом случае для составления разрешающей системы уравнений используется вариационный метод: речь идет о нахождении таких значений неизвестных функций в узлах конечных элементов, которые были бы наилучшим приближением истинного распределения искомой функции. Задача решается путем минимизации некоторого функционала, связанного с физической сущностью задачи. Дифференциальные уравнения в частных производных, описывающие движение и состояние среды, аппроксимируются конечноразностными, образуя систему алгебраических уравнений для каждого узла. Решением определяющей системы уравнений получают значения узловых неизвестных, а затем, используя полиномы, определяют распределение неизвестной функции по всей области. Этот процесс обеспечивает комплексные решения, которые отвечают требованиям равновесия и совместимости, и учитывают упругие и пластические деформации, а также реальные свойства материала, включая его способность к деформационному упрочнению, для решения проблемы [65, 79].

Для задач пластичности скорости большого (но ограниченного) количества материальных точек неизвестны. Эти скорости рассчитываются путем решения системы алгебраических уравнений, которые автоматически генерируются по определенному алгоритму. Коэффициенты в полученной системе уравнений зависят от свойств материала, координат отслеживаемых материальных точек, истории нагружения и граничных условий.

В упрощенном виде метод конечных элементов – это метод решения задач математической физики, основанный на представлении анализируемого объекта в виде совокупности малых по размеру областей (конечных элементов - КЭ), в каждой из которых искомую функцию аппроксимируют полиномами низких степеней.

Решение задач с помощью МКЭ требует больших объемов вычислений и реализуется лишь на ЭВМ (особенно в случае пространственной постановки задачи и при значительных размерах заготовки и больших

конечных деформациях). МКЭ реализуется в различных пакетах программ моделирования процессов пластической деформации, таких как DEFORM, SuperForge, ANSYS/LS-DYNA, QForm и других [79].

В настоящее время программы, основанные на методе конечных элементов, широко применяются во всем мире. Решены всевозможные технологические и научные задачи по расчету как напряженно-деформированного, так и температурного состояния заготовки и изделия. Существующее стандартное математическое обеспечение дает возможность применять МКЭ для решения разных задач и в области прессования. Моделирование процесса пластической деформации, основанное на МКЭ, позволяет проверить, отработать и оптимизировать технологические процессы непосредственно на компьютере. Благодаря этому существенно сокращаются сроки выпуска продукции, повышается ее качество и снижается себестоимость [79].

4.1.1 Программное обеспечение QForm и его пользовательские подпрограммы

В 2011-ом году коллективом разработчиков программного обеспечения QForm было принято решение создать абсолютно новую программу с более удобным и быстрым интерфейсом, с более эффективными и точными методами решения. Была поставлена задача сформировать гибкую структуру, которая бы позволяла быстро совершенствовать программу и расширять область ее применения. При создании новой программы был использован двадцатилетний опыт разработки, были учтены современные требования и тенденции развития рынка. Удобство, гибкость, скорость и функциональность новой программы высоко оценили все пользователи. Круг решаемых задач существенно расширился, а работа в программе стала значительно быстрее и проще. Интерфейсная часть и расчетное ядро стали работать независимо. Новая структура данных позволила эффективно управлять большими массивами данных.

Актуальная версия QForm – это программный комплекс, отвечающий самым современным требованиям в области моделирования процессов формоизменения металла. С помощью QForm могут быть эффективно исследованы практически все известные технологические процессы обработки металлов давлением, включая процессы штамповки, свободнойковки, прокатки, раскатки, экструзии профилей и многие другие специальные процессы формоизменения металла.

В настоящей работе комплекс QForm используется для описания процесса экспандирования труб большого диаметра.

В версиях комплекса появилась возможность создания пользователем дополнительных подпрограмм. Пользовательские подпрограммы в QForm предназначены для расчета полей, которых изначально нет в списке полей QForm, и для расширения возможностей задания напряжений текучести в заготовке. Пользовательские подпрограммы могут быть следующих видов:

- Постпроцессорные (выполняются после моделирования);
- Процессорные (выполняются во время моделирования): зависящие только от стандартных полей; зависящие от стандартных и пользовательских полей.

Так же, как и стандартные поля, пользовательские поля рассчитываются в каждом узле и отображаются стандартными средствами просмотра.

4.1.2 Создание модели материала для использования в программной среде QForm с помощью пользовательской подпрограммы

При моделировании процессов ОМД самая важная характеристика является кривой сопротивления деформации материала заготовки, представленной в главе 2. Операция экспандирования ТБД проводится в холодном состоянии, поэтому сопротивление деформации σ_s только зависит от степени пластической деформации ε_p и может выражаться формулой:

$$\sigma_s = \begin{cases} \sigma_{0,2} & \text{если } \varepsilon_p \leq 0,002 \\ K\varepsilon_p^x & \text{если } \varepsilon_p > 0,002 . \end{cases} \quad (4.1)$$

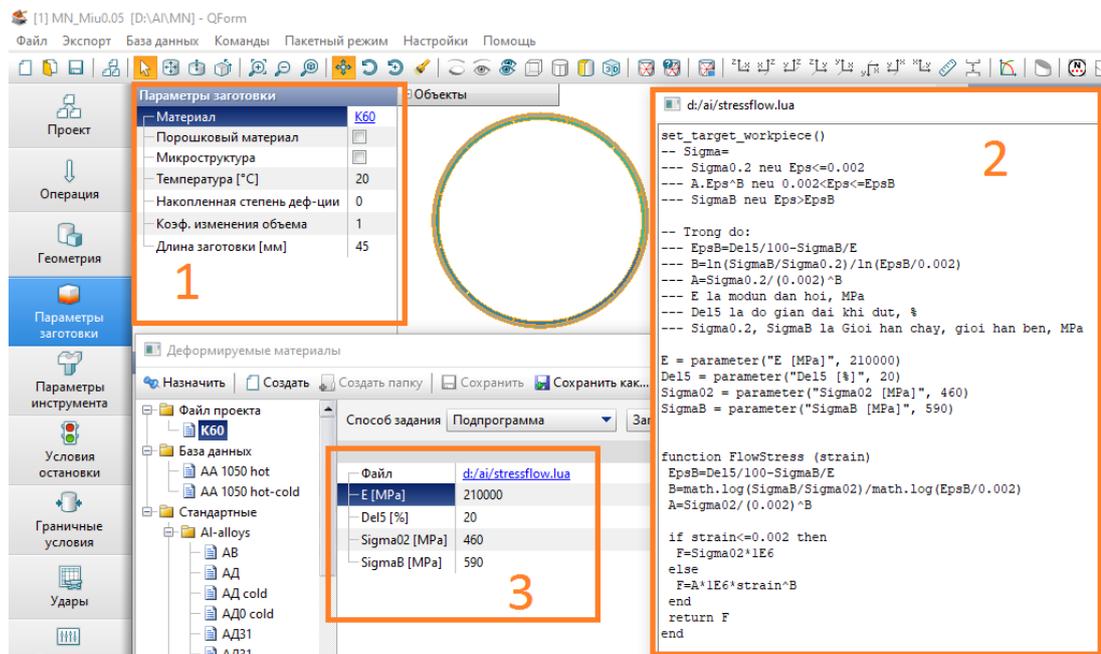


Рисунок 4.1 – Добавление кривой сопротивления деформации в QForm с помощью пользовательской подпрограммы
 1 – загрузка из файла LUA; 2 – код подпрограммы;
 3 – параметры материала после добавления

4.1.3 Программирование конвертера компонентов тензоров напряжения и деформации из декартовых координат в полярные

В программном обеспечении QForm-2D по умолчанию система декартовых координат Oxz используется для отображения компонентов тензоров напряжения как $(\sigma_{xx}, \sigma_{zz}, \sigma_{zx})$ и деформации $(\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{zz}, \varepsilon_{zx})$. Но для задачи деформации при экспандировании трубной заготовки удобнее пользоваться компонентами тангенциальных напряжения (σ_{θ}) и деформации (ε_{θ}) во всех точках тела, поэтому эти компоненты нужно конвертировать из декартовых координат в полярные, они определяются следующими формулами [27]:

$$\begin{cases}
 \sigma_r = \sigma_{xx} \cos^2 \theta + \sigma_{zz} \sin^2 \theta + 2\sigma_{zx} \sin \theta \cos \theta \\
 \sigma_\theta = \sigma_{xx} \sin^2 \theta + \sigma_{zz} \cos^2 \theta - 2\sigma_{zx} \sin \theta \cos \theta \\
 \sigma_{r\theta} = (\sigma_{zz} - \sigma_{xx}) \sin \theta \cos \theta + \sigma_{zx} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \\
 \varepsilon_r = \varepsilon_{xx} \cos^2 \theta + \varepsilon_{zz} \sin^2 \theta + 2\varepsilon_{zx} \sin \theta \cos \theta \\
 \varepsilon_\theta = \varepsilon_{xx} \sin^2 \theta + \varepsilon_{zz} \cos^2 \theta - 2\varepsilon_{zx} \sin \theta \cos \theta \\
 \varepsilon_{r\theta} = (\varepsilon_{zz} - \varepsilon_{xx}) \sin \theta \cos \theta + \varepsilon_{zx} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta),
 \end{cases}
 \quad (4.2)$$

где: $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_{r\theta}$ - радиальное, тангенциальное и касательное напряжения точки в полярных координатах;

$\varepsilon_r, \varepsilon_\theta, \varepsilon_{r\theta}$ - радиальная, тангенциальная и касательная деформации точки в полярных координатах;

θ - угол рассматриваемой точки с осью Ox .

Для преобразования координат в рамках настоящей работы подготовлена подпрограмма на языке LUA для постпроцессорной стадии расчёта НДС (выполняется после QForm-моделирования). Добавление кодов подпрограммы в комплекс QForm представлено на рисунке 4.2:

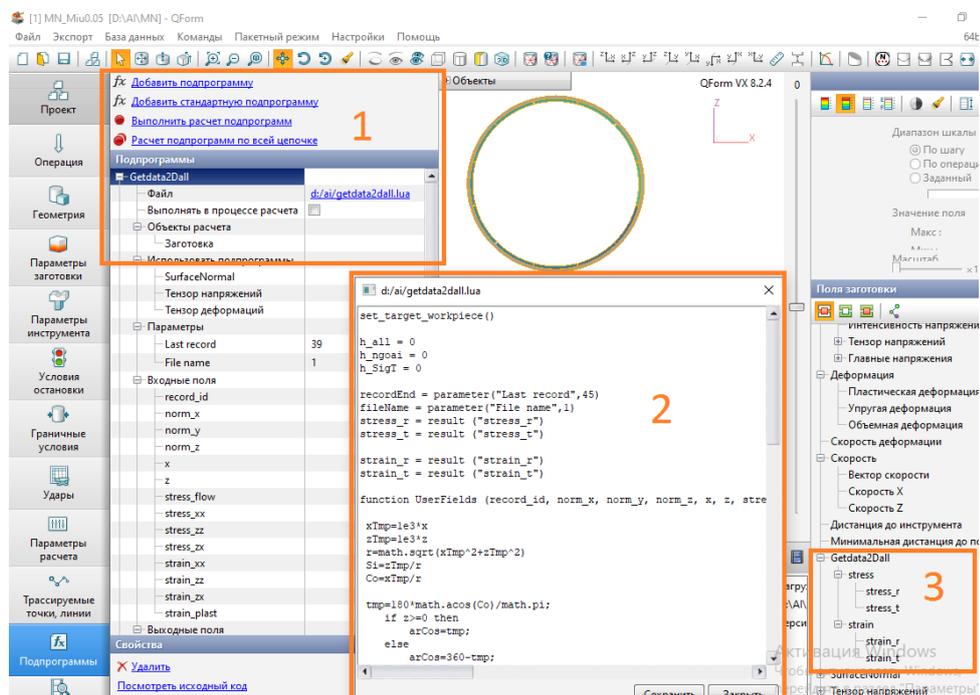


Рисунок 4.2 – Добавление подпрограммы для преобразования координат в комплексе QForm

1 – загрузка из файла LUA; 2 – код подпрограммы;

3 – поля напряжений и деформаций в полярных координатах

4.1.4 Разработка метода определения характеристик внешней поверхности ТБД при экспандировании

Решение задачи деформации при экспандировании выполняется методом 2D-конечных элементов в среде QForm, где построением сетки нужно обеспечить точность и сходимость решения. В созданной сетке есть два типа узлов: внутри и на поверхности заготовки. Поверхностные узлы сетки будут образовывать геометрическую форму ТБД. В программном комплексе QForm нормальные векторы на внутренних узлах всегда равны вектору нуля $\vec{0}$ и будут отличаться только, если узлы находятся на поверхности заготовки (внутренней или внешней). Представлен следующий метод определения координат узлов на внешней поверхности [80].

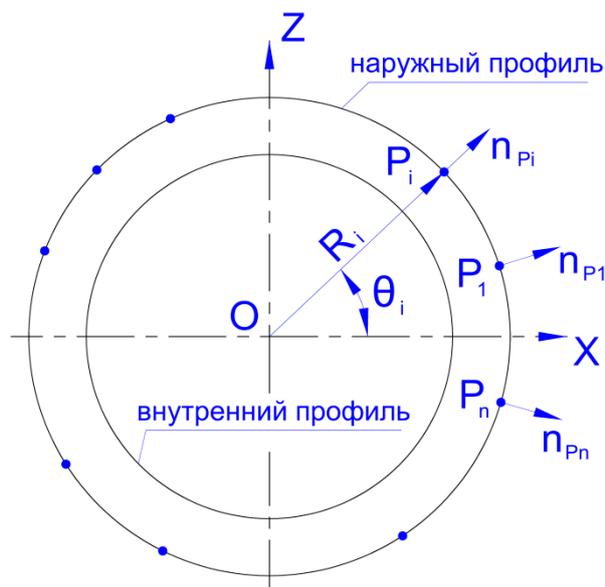


Рисунок 4.3 – Схема определения координат узлов на внешней поверхности

На рисунке 4.3, а показаны координаты поверхностных узлов $P_i(x_i, z_i)$ и нормальные векторы в них $\vec{n}_{P_i}(n_{xi}, n_{zi})$, где $i = 1..N$, а N – количество узлов на внешней поверхности на каждом шаге времени деформации. Видно, что, когда скалярное произведение векторов \vec{OP}_i и \vec{n}_{P_i} больше нуля или $\vec{OP}_i \cdot \vec{n}_{P_i} = x_i n_{xi} + z_i n_{zi} > 0$, то эти узлы находятся на внешней поверхности

заготовки, в остальных случаях – на внутренней. Необходимо учитывать, что подпрограмма на языке LUA предназначена для расчета пользовательских полей, которых изначально нет в списке полей QForm и может быть выполнена после моделирования.

Пользовательские поля рассчитываются в каждом узле и отображаются стандартными средствами просмотра или сохраняются. Поэтому координаты узлов внешней поверхности для всех этапов деформации после моделирования процесса экспандирования выполнены подпрограммой и записаны в файл данных. Некоторый код MATLAB используется для обработки этого файла и вычислений для получения геометрических параметров внешней поверхности трубы, таких как:

- радиус в i -ом узле равен $R_i = \sqrt{x_i^2 + z_i^2}$;

- угол узла P_i определяется формулой $\theta_i = \arctan\left(\frac{z_i}{x_i}\right)$;

- диаметр по направлению $D \approx 2R_i$;

- овальность $\Delta = D_{\max} - D_{\min}$, здесь D_{\max} и D_{\min} , соответственно, максимальное и минимальное значения наружных диаметров D , измеренных по радиальным направлениям поперечного сечения трубной заготовки;

- периметр всей внешней поверхности в рассматриваемый момент процесса деформации $C = \sum_{i=1}^N \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2}$, с гипотезой $x_{N+1} = x_1$

и $z_{N+1} = z_1$;

- номинальный диаметр трубной заготовки в рассматриваемый момент процесса деформации $D_n = \frac{C}{\pi}$;

- степень экспандирования в рассматриваемый момент процесса деформации рассчитывается по формуле $\varepsilon_{ex} = \frac{C - C_0}{C_0} 100\%$, где C_0 –

периметр исходной заготовки (значение диаметра исходной заготовки будет

$$D_{n0} = \frac{C_0}{\pi}).$$

4.1.5 Коэффициент остаточной упругости при экспандировании

Введём один показатель процесса экспандирования, отражающий наличие зон, где правка тангенциальным растяжением недостаточна для выравнивания формы тела. Безразмерную величину ξ можем назвать «коэффициент остаточной упругости/эластичности» сечения тела при экспандировании ($0 \leq \xi \leq 1$): $\xi = \frac{S_e}{S_\Sigma} \approx \frac{n_e}{n_\Sigma}$, где: S_e – площадь упругих зон в поперечном сечении заготовки; S_Σ – суммарная площадь поперечного сечения; n_e – количество узлов сетки, где эквивалентное напряжение не превышает предел текучести $\sigma_{0,2}$ (см. рис. 4.4, $\sigma_{0,2} = 460$ МПа для стали К60), здесь материал находится в «упругой» области, включая также узлы, в которых может быть пластическая деформация равна нулю; n_Σ – количество всех узлов в поперечном сечении тела. Коэффициент ξ определен подпрограммой на языке *LUA* для комплекса *QForm* с определением числа узлов n_e и n_Σ [81].

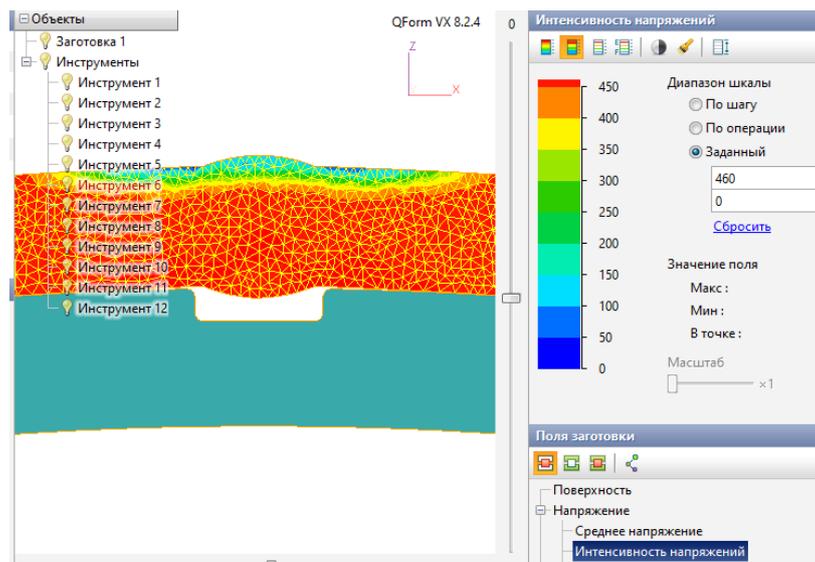


Рисунок 4.4 – Схема мелких сеток для определения коэффициента остаточной упругости при экспандировании

К завершению процесса экспандирования некоторые зоны заготовки могут оставаться ещё в упругом состоянии, поэтому они могут «стремиться» к исходной геометрии заготовки и поэтому искажать форму ТБД после разгрузки. Можно ожидать, что чем меньше величина ξ , тем более предсказуемо калибруется заготовка и совершеннее в целом процесс экспандирования.

4.1.6 Метод определения коэффициента обратного пружинения при экспандировании

На рисунке 4.5, после завершения операции экспандирования происходит обратное пружинение стенки трубы, причём она несколько уменьшается в диаметре. Диаметр трубы перед разгрузкой D_{nt} уменьшается до размера D_n (до номинального диаметра ТБД). Коэффициент пружинения

λ_D выражается формулой $\lambda_D = \frac{D_n - D_{nt}}{D_{nt}} 100\%$. Нетрудно видеть, что

коэффициент пружинения λ_D всегда меньше нуля. Он зависит сильно от механических свойств материала, которые используются для изготовления ТБД, и влияет на отклонение формы и также на размеры ТБД. При определенном режиме экспандирования чем величина λ_D больше, тем диаметр ТБД больше. Например, при изготовлении труб с диаметром 1420 мм, предельное отклонение по наружному диаметру от номинальных размеров должно соответствовать указанным в ГОСТ 31447–2012, что не превышает ± 3 мм, т.е. диаметр ТБД должен быть в интервале $[D_n] = (1417...1423)$ мм. Полагая, что с фиксированным ходом сегментов экспандера (степень экспандирования ε_{ex} фиксирована) диаметр трубных заготовок только достигает до $D_{nt} = 1424$ мм, потом заготовки разгружаются. Если $\lambda_D > -0,7\%$ то полученный диаметр $D_n > 1423$ мм, т.е. размер ТБД превышает допуска; если $\lambda_D < -4,9\%$ то $D_n < 1417$ мм, то есть получим размер меньше минимально допустимого значения. Поэтому нужное

значение коэффициента пружинения должно быть в интервале $\lambda_D = (-4,9...-0,7) \%$, в разделе 4.3 влияние факторов материала (как предел текучести $\sigma_{0,2}$ и модуль упругости E) на коэффициента пружинения будет исследовано с целью поиска их оптимальных характеристик для получения диаметра ТБД, соответствующего требованиям стандартов по геометрическим размерам ТБД.

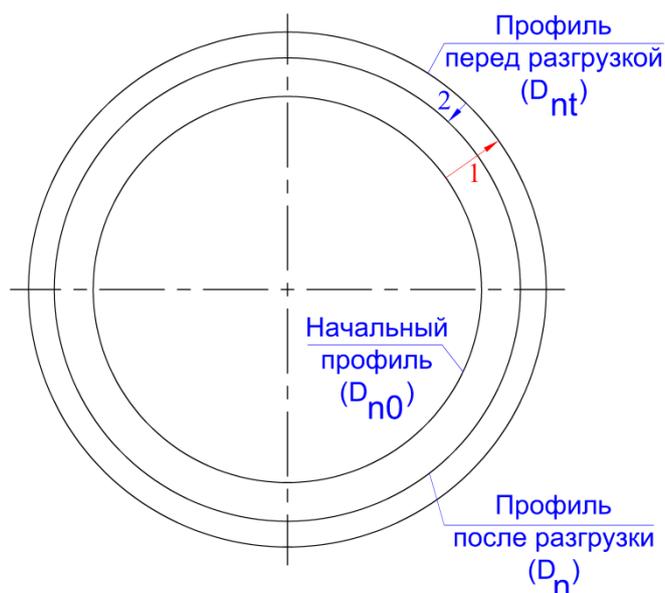


Рисунок 4.5 – Пружинение наружной поверхности трубной заготовки при экспандировании

1 – стадия расширения; 2 – стадия разгрузки (обратное пружинение стенки)

Пластическая деформация при экспандировании выражением $\varepsilon = \frac{D_n - D_{n0}}{D_{n0}} 100\%$ отличается от степени экспандирования (ε_{ex}). Величина ε по ГОСТ 31447–2012 должна не превышать 1,2 %. Степень экспандирования ε_{ex} является деформацией в момент перед разгрузкой, поэтому она может быть превышать 1,2 %, из-за пружинения пластическая деформация ε определяется после разгрузки и меньше степени экспандирования ε_{ex} . Т.е. кроме зависимости от размеров заготовки

пластическая деформация при экспандировании зависит также от механических свойств материала, влияющих на коэффициент пружинения, их исследование представлено в разделе 4.3.

4.1.7 Инструменты и алгоритм исследования при моделировании процесса экспандирования

а) При исследовании процесса экспандирования используются параметры:

Δ_0 – начальное значение овальности (овальность исходной трубной заготовки перед экспандированием).

B_0 – ширина стального листа (или длина средней линии в сечении), используемого для изготовления труб, с допущением, что длина средней линии сечения и толщина полосы считаются практически неизменяемыми при операциях формовки до экспандирования.

μ – коэффициент трения между внешней поверхностью сегментов экспандера и внутренней поверхности трубной заготовки.

σ_{itb} – средняя интенсивность напряжения во всех точках в теле при экспандировании в последнем шаге процесса деформации (перед разгрузкой). Она после экспандирования характеризуется увеличением предела текучести материала на величину, определяемую выражением

$$\eta = \frac{\sigma_{itb} - \sigma_{0,2}}{\sigma_{0,2}} 100\%, \text{ на Загорском трубном заводе } \eta = (5..8) \% [7].$$

p – среднее давление сегмента экспандера на внутренней поверхности трубной заготовки при экспандировании.

σ_{isurf} – интенсивность напряжения на наружной поверхности трубной заготовки в момент перед разгрузкой.

$\sigma_{\theta surf}$ – остаточное тангенциальное напряжение после экспандирования (после разгрузки).

б) Используемые инструменты:

- Программный комплекс AutoCAD 2014 для построения геометрических моделей;
- Программный комплекс QForm используется для решения задачи деформации при экспандировании ТБД;
- Язык LUA для написания пользовательских подпрограмм, которые используются для добавления кривой сопротивления деформации (препроцессор) и также для обработки данных после моделирования (постпроцессор);
- Программный язык MATLAB для обработки полученных данных моделирования с целью получения информации о процессе экспандирования (размеры, овальность, коэффициент остаточной эластичности, коэффициент пружинения,...);
- Программное обеспечение OriginPro 2016 версией 64 bit для регресса данных, которые получены пользовательской подпрограммой после моделирования (постпроцессор);
- Программный язык C# используется для проектирования специально программного обеспечения, которое рассчитает автоматически параметры процесса экспандирования.

в) Методика моделирования:

При моделировании процесса экспандирования выбрана задача упруго-пластической деформации. 2D–геометрическая модель трубной заготовки с исходными размерами построена в программном комплексе AutoCad. Материал заготовки с законом сопротивления деформации σ_s , который определяется выражением (4.1) и добавлен в QForm пользовательской подпрограммой. Адаптация и генерация сетки с максимальным размером элемента 2 мм в среде QForm.

Рассматривается экспандерная головка, которая состоит из 12 сегментов. 2D–геометрическая модель головки экспандера также построена в AutoCad. Использован существующий алгоритм адаптации сетки для экспандера. Материал сегментов - сталь 9ХВГ и при моделировании инструмент

считается недеформируемым. Скорость перемещения сегментов по радиальному направлению 1 мм/с.

Общие настройки: сегменты не сводят в контакт; закон трения выбран по Кулону с коэффициентом трения μ ; интегральный шаг по умолчанию; условие останковки конечно-элементного моделирования выбрано с гарантией, что после разгрузки диаметр ТБД удовлетворяет заданному размеру изделия.

г) Алгоритм для расчета параметров процесса экспандирования:

На основе данных анализов выше алгоритм построен для определения параметров, характеризующих процесс экспандирования:

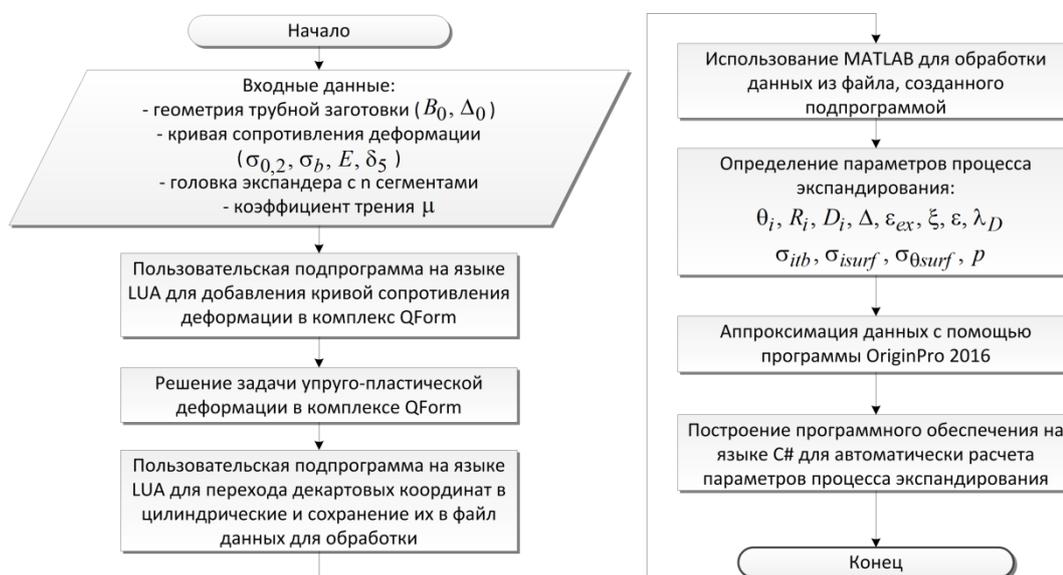


Рисунок 4.6 – Блок-схема алгоритма определения параметров процесса экспандирования

4.2 Влияние ширины стальной полосы, начальной овальности и коэффициента трения на процесс экспандирования

Начальные форма (тип формы, овальность Δ_0) и размеры (ширина стальной полосы B_0) трубной заготовки, условие трения между инструментом и заготовкой (коэффициент трения μ) представляют собой главные факторы, влияющие на процесс экспандирования, который включает параметры как овальность после экспандирования Δ , пластическая деформация ϵ , средняя интенсивность напряжения в теле σ_{ib} , коэффициент остаточной эластичности

ξ и среднее давление сегмента на заготовку p . В разделе исследованы 2 типа формы трубной заготовки в виде крыши и яблока как типовых дефектов формы перед экспандированием в современной линии производства труб большого диаметра. Ниже даны результаты моделирования экспандирования ТБД с диаметром 1420 мм и толщиной 21,6 мм в качестве примера, для экспандера с 12 сегментами при фиксированном рабочем ходе.

4.2.1 При дефекте трубной заготовки в виде «крыши»

Трубная заготовка с дефектом в виде крыши, изготавливаемая из стальных полос с разными шириной, начальной овальностью и коэффициентом трения, для экспандирования, из которого получены ТБД 1420x21,6 мм представлена на рисунке 4.7.

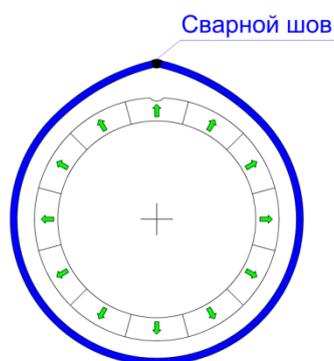


Рисунок 4.7 – Схема трубной заготовки в виде крыши перед экспандированием

Проведены 27 вариантов моделирования с 9 разными трубными заготовками при 3х разных режимах трения ($\mu = 0,05; 0,15; 0,25$). Данные обработаны по алгоритму, который представлен на блок-схеме алгоритма (см. рис. 4.6), показаны в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Данные моделирования процесса экспандирования
трубной заготовки в виде крыши

№	Входные параметры			Расчетные параметры				
	B_0 [мм]	Δ_0 [мм]	μ [-]	Δ [мм]	ε [%]	σ_{itb} [МПа]	ξ [-]	P [МПа]
1	4343,6	5,8	0,05	3,2	1,092	508,45	0,0012	18,644
2	4346,1	9,7	0,05	3,4	1,043	507,06	0,0022	18,607
3	4348,4	13,5	0,05	3,5	0,993	505,59	0,0027	18,581
4	4356,4	5,8	0,05	3,2	0,818	500,47	0,0032	18,410
5	4358,7	9,7	0,05	3,5	0,770	498,46	0,0036	18,379
6	4361,0	13,5	0,05	3,6	0,721	496,61	0,0030	18,000
7	4369,0	5,8	0,05	3,2	0,547	489,44	0,0075	18,063
8	4371,2	9,7	0,05	3,6	0,499	486,68	0,0140	17,954
9	4343,6	13,5	0,05	3,8	0,451	483,67	0,0125	17,835
10	4343,6	5,8	0,15	3,4	1,094	507,73	0,0026	18,772
11	4346,1	9,7	0,15	3,7	1,044	506,56	0,0027	18,803
12	4348,4	13,5	0,15	3,9	0,993	505,27	0,0029	18,792
13	4356,4	5,8	0,15	3,4	0,818	500,18	0,0041	18,613
14	4358,7	9,7	0,15	3,7	0,770	498,31	0,0034	18,576
15	4361,0	13,5	0,15	4,1	0,720	496,33	0,0033	18,670
16	4369,0	5,8	0,15	3,5	0,547	489,11	0,0064	18,425
17	4371,2	9,7	0,15	3,8	0,501	485,87	0,0078	18,094
18	4343,6	13,5	0,15	3,9	0,453	482,29	0,0090	18,000
19	4343,6	5,8	0,25	3,7	1,094	507,28	0,0041	19,031
20	4346,1	9,7	0,25	4,0	1,044	505,83	0,0033	18,980
21	4348,4	13,5	0,25	4,3	0,994	504,13	0,0034	18,892
22	4356,4	5,8	0,25	3,7	0,819	499,44	0,0047	18,766
23	4358,7	9,7	0,25	3,9	0,772	496,99	0,0043	18,576
24	4361,0	13,5	0,25	4,4	0,722	495,52	0,0036	18,658
25	4369,0	5,8	0,25	3,8	0,548	487,77	0,0064	18,481
26	4371,2	9,7	0,25	4,2	0,502	484,83	0,0247	18,302
27	4343,6	13,5	0,25	4,5	0,452	481,87	0,0209	18,188

Аппроксимация данных таблицы 4.1 выполнена с помощью программного обеспечения OriginPro 2016. Определены модели изменения параметров процесса экспандирования как функции, зависящей от исходной ширины стального листа B_0 (мм), начальной овальности заготовки Δ_0 (мм) и коэффициента трения μ при дефекте заготовки в виде крыши (таблица 4.2).

Таблица 4.2 – Формулы получены с использованием аппроксимации

Формула	Единица	R^2 (*)
$\frac{\Delta}{\Delta_0} = 0,84564(0,68406\mu + 0,79233)\left(\frac{1000\Delta_0}{B_0}\right)^{-0,83249}$	–	0,995
$\varepsilon = -21,52669\frac{B_0}{1000} + 94,59875$	%	≈ 1
$\sigma_{itb} = 11,87504(-0,63122\mu + 42,65182)\varepsilon^{0,05689}$	МПа	0,998
$\xi = 0,07783(0,06921\mu + 0,01690)\varepsilon^{-2,48165}$	–	0,711
$p = 2,849(0,30406\mu + 3,03938)(2,13434\varepsilon + 0,04783)$	МПа	0,940
(*) Множественный коэффициент детерминации		

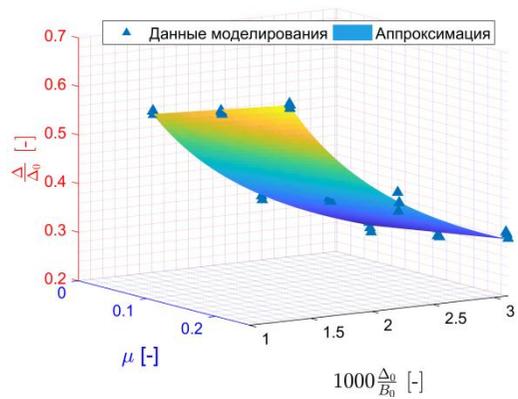
Эти параметры показаны также на рисунке 4.8. Из формул в таблице 4.2 и графиков на рисунке 4.8 видно, что:

- С увеличением величины ширины стального листа (B_0) пластическая деформация (ε) уменьшается (см. рис. 4.8б). Уменьшение пластической деформации приводит к уменьшению интенсивности напряжения (σ_{itb} , см. рис. 4.8в) и давления (p , см. рис. 4.8д), но к увеличению коэффициента остаточной эластичности (ξ , см. рис. 4.8г), при этом овальность (Δ , см. рис. 4.8а) меняется немного от начального состояния (Δ_0). Поэтому эффективность операции экспандирования будет слабо при ширине стального листа близкой к размеру изделия. Причина этой проблемы может быть из-за заготовки еще в упругом состоянии или из-за пружинения материала после разгрузки экспандера от заготовки. Чтобы повысить эффективность процесса экспандирования в этом случае, нужно увеличивать рабочий ход экспандера или уменьшать ширину листа на рациональное значение.

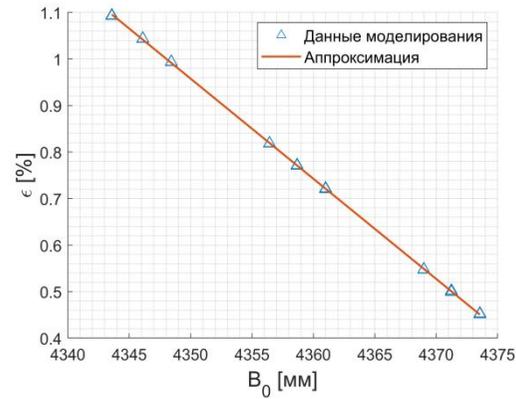
А если сильно уменьшать ширину стальной полосы, то требуемая сила для инструмент увеличивать, это не рекомендует для экспандера, который имеет гидравлическую систему внутри его.

- Овальность (Δ) ТБД уменьшается сильно увеличением отношения начальной овальности (Δ_0) к ширине листа (B_0), т.е. при увеличении $\frac{\Delta_0}{B_0}$ величина овальности ТБД уменьшается сильно от начальной овальности (см. рис. 4.8a).

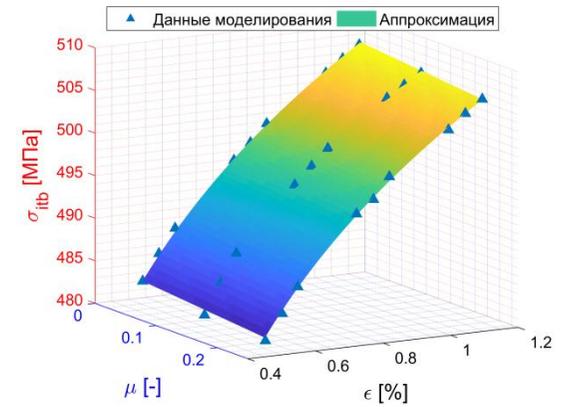
- С увеличением трения интенсивность напряжения (σ_{itb}) уменьшается (т.е. механические свойства труб после экспандирования с большим трением не лучше чем с маленьким), но овальность (Δ), коэффициента остаточной эластичности (ξ) и давления (p) вместе увеличивают. Поэтому увеличение трения при экспандировании не повышает качество ТБД как механические свойства и геометрия изделий. Кроме этого, в анализах главы 2 увеличение трения еще подтвердилось увеличением неравномерности распределения напряжения и деформации. Надо снижать трение хорошими смазками при экспандировании.



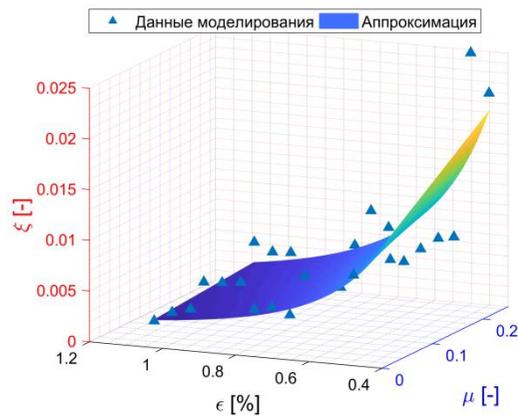
а)



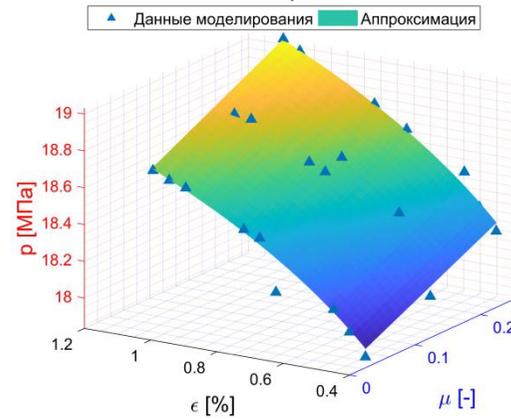
б)



в)



г)



д)

Рисунок 4.8 – Связи параметров процесса экспандирования с шириной стального листа, начальной овальностью и коэффициентом трения при трубной заготовке в виде крыши
 а – овальность; б – пластическая деформация; в – средняя интенсивность напряжения;
 г – коэффициент остаточной упругости тела; д – среднее давление сегмента на внутреннюю поверхность трубной заготовки

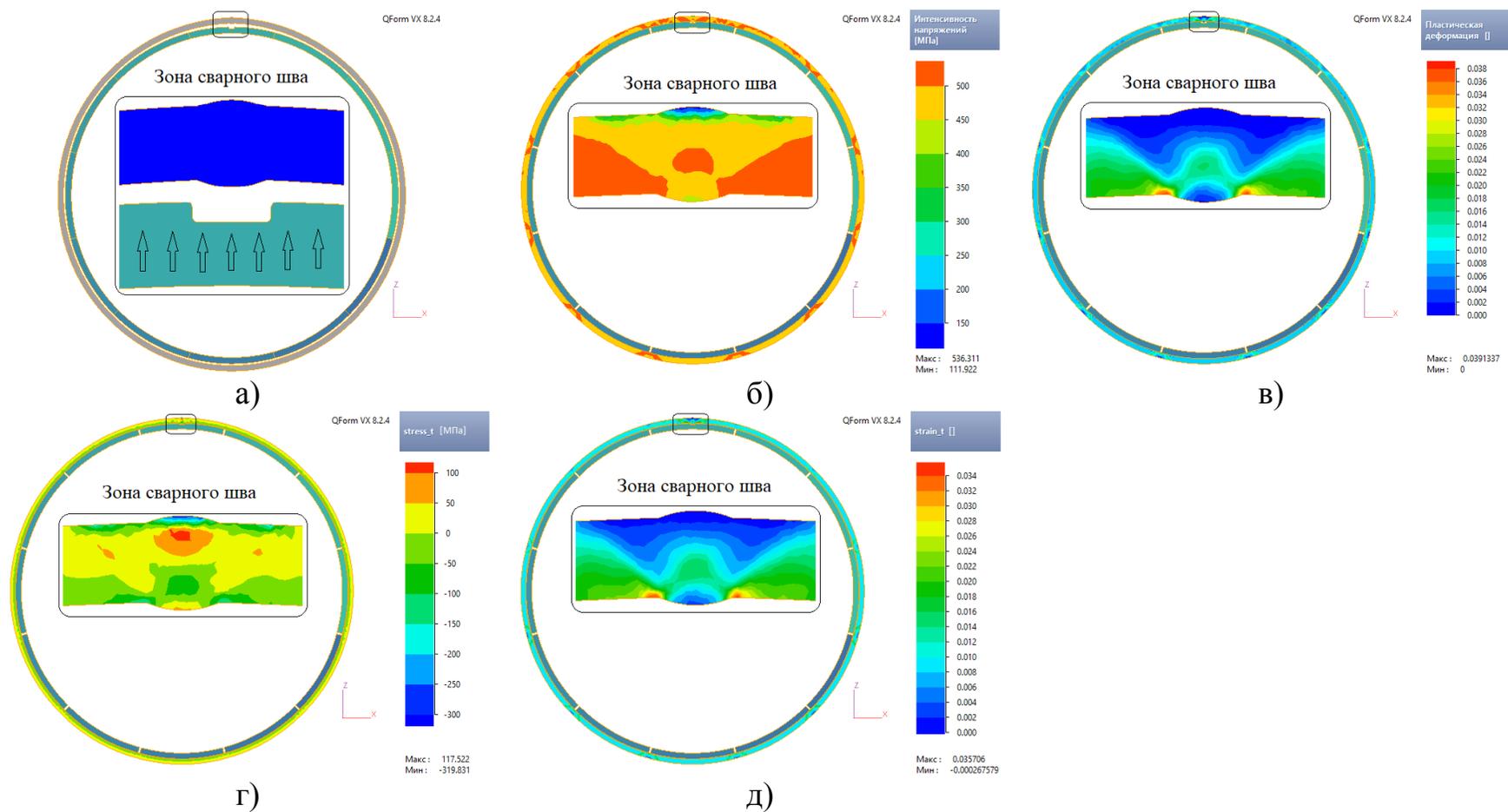


Рисунок 4.9 – Напряженно-деформированное состояние при экспандировании трубной заготовки в виде крыши
 а – начальное состояние; б – интенсивность напряжения; в – пластическая деформация; г – остаточное тангенциальное напряжение; д – остаточная тангенциальная деформация

На рисунке 4.9 представлены поля интенсивности напряжения, накопленной пластической деформации, остаточных тангенциальных напряжений и деформаций при экспандировании трубной заготовки, которая имеет номер №5 в таблице 4.1. Не трудно видеть, что распределение напряжений и деформаций не равномерно, их наибольшее значение концентрируется в зонах кромок на сегментах (в главе 2 математическая модель подтвердилась этим). В наружной зоне сварного шва наблюдается наименьшее значение напряжений и деформаций. При экспандировании трубной заготовки с дефектом в виде крыши внутренняя зона сварного шва может немного деформироваться, в то время, как его внешняя зона остаётся в упругом состоянии.

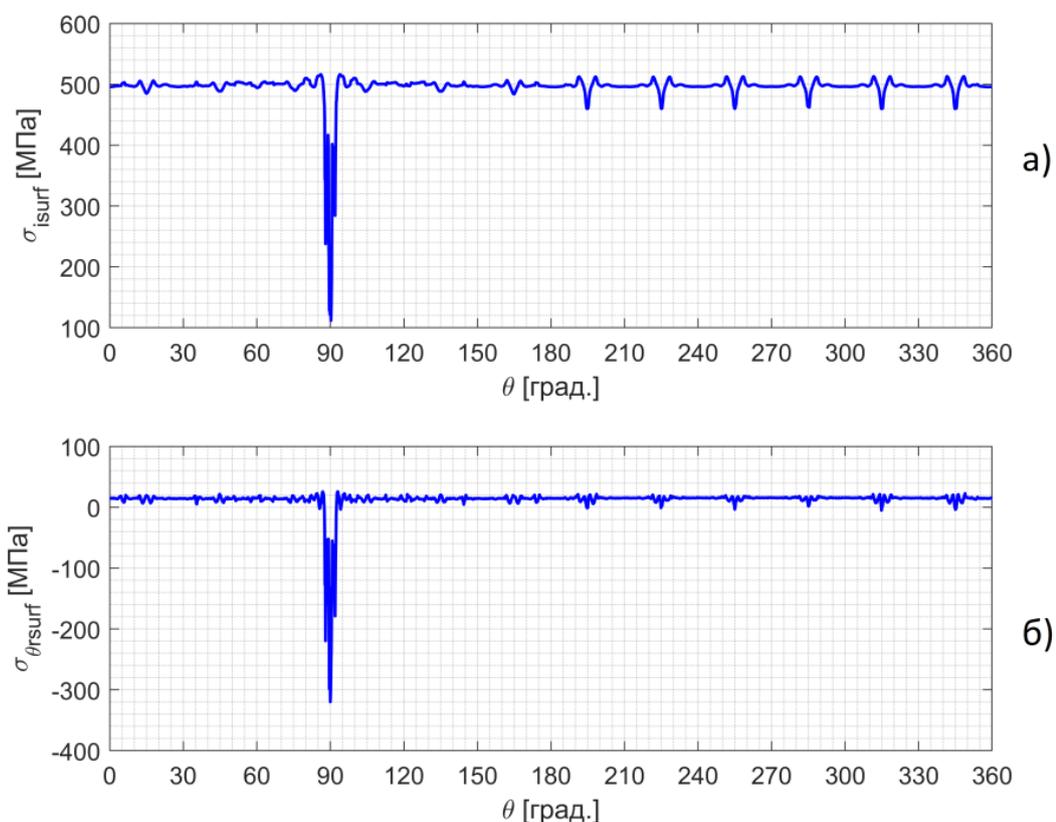


Рисунок 4.10 – Распределение интенсивности напряжения (а) и остаточного тангенциального напряжения (б) на наружной поверхности

На рисунке 4.10 показано распределение интенсивности напряжений и остаточного тангенциального напряжения на наружной поверхности

(положение сварного шва находится при угле $\theta = 90^0$). Интенсивность напряжения в шве меньше чем в остальных зонах поверхности (см. рис. 4.10а), поэтому сварной шов можно считаться недеформированным.

Не учитывая наличие остаточного растягивающего напряжения, полученного при сварке перед экспандированием, остаточное тангенциальное напряжение в зоне сварного шва будет примерно -310 МПа (см. рис. 4.10б), т.е. шов сжимается по тангенциальному направлению; но в практике остаточное напряжение после сварки остается, если предположить, что оно было примерно +450 МПа, то остаточное напряжение после экспандирования может быть $+450-310=+140$ МПа, т.е. в сварном шве могут быть высокие остаточные растягивающие напряжения, а в остальных зонах слабо остаточные растягивающие напряжения, как на рисунке 4.10б (примерно +10 МПа).

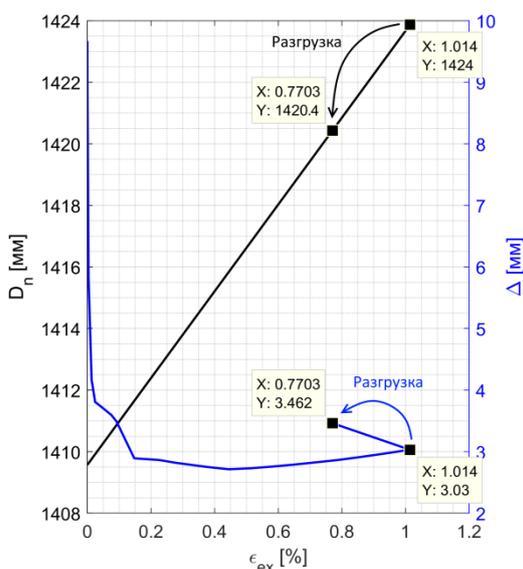


Рисунок 4.11 – Изменение наружного диаметра и овальности трубной заготовки во время экспандирования

Изменение наружного диаметра и овальности при экспандировании представлено на рисунке 4.11. На этом рисунке видно, что в первой стадии процесса экспандирования (примерно $\varepsilon_{ex} < 0,45\%$) овальность заготовки снижается быстро, на следующей стадии повышается, причём диаметр трубы увеличивается в течении всего процесса экспандирования примерно до $\varepsilon_{ex} = 1,014\%$ (до момента остановки процесса экспандирования), до достигаемого диаметра примерно $D_{nt} = 1424$ мм. Один важный этап процесса экспандирования это стадия пружинения заготовки после разгрузки, при которой диаметр заготовки уменьшается до $D_n = 1420,4$ мм (нетрудно рассчитать коэффициент пружинения $\lambda_D = \frac{1420,4 - 1424}{1424} 100\% = -0,253\%$) и овальность увеличивается немного, примерно на 0,432 мм.

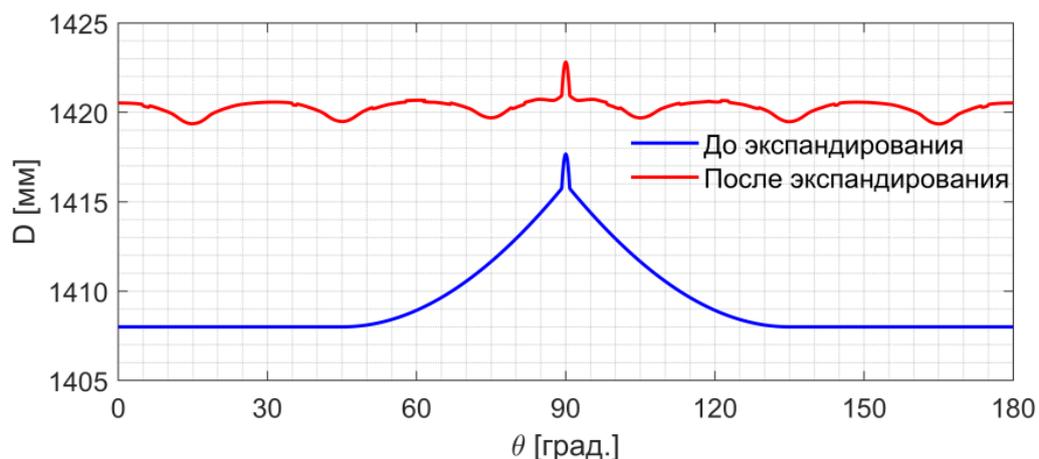


Рисунок 4.12 – Наружный профиль трубной заготовки до и после экспандирования

На рисунке 4.12 представлено распределение диаметра (профиль) по контуру трубной заготовки до и после экспандирования. Видно, что после экспандирования форма и размер сварного шва сохраняются, в центрах сегментов возникают выступы, а в центрах зазоров между сегментами – впадина, они порождают неравномерность профиля ТБД. Поэтому для повышения качества ТБД (снижения выпукло-вогнутого эффекта профиля)

нужно увеличивать число сегментов экспандера или можно увеличивать рабочий радиус сегментов.

4.2.2 При дефекте трубной заготовки в виде «яблока»

Трубная заготовка с дефектом в виде яблока, изготавливаемая из стальных полос с разными шириной, начальной овальностью и коэффициентом трения, для экспандирования, из которого получены ТБД 1420x21,6 мм представлена на рисунке 4.13.

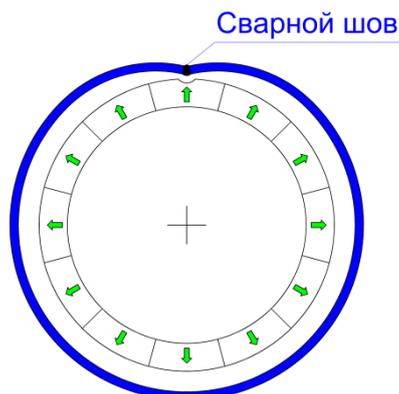


Рисунок 4.13 – Схема экспандирования трубной заготовки с дефектом формы в виде яблока

Аналогично работе с трубной заготовкой с дефектом в виде крыши, в разделе проведены 27 вариантов моделирования с 9 разными трубными заготовками при 3х разных режимах трения ($\mu = 0,05; 0,15; 0,25$). Результаты расчетов, которые сделаны по описанному выше алгоритму (см. рис. 4.6), показаны в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Данные моделирования процесса экспандирования трубной заготовки в виде яблока

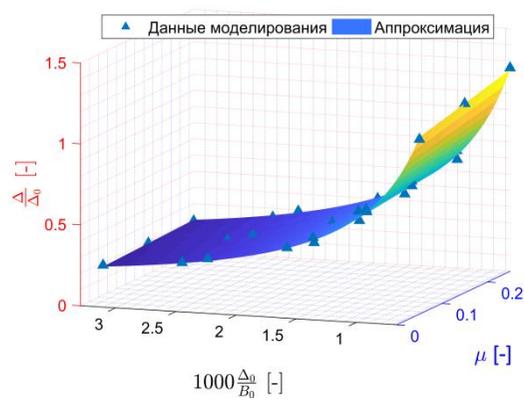
№	Входные параметры			Расчетные параметры				
	B_0 [мм]	Δ_0 [мм]	μ [-]	Δ [мм]	ε [%]	σ_{itb} [МПа]	ξ [-]	p [МПа]
1	4340,1	2,9	0,05	3,1	1,176	510,50	0,0009	18,803
2	4339,1	4,8	0,05	3,0	1,198	511,02	0,0011	18,727
3	4338,1	6,7	0,05	2,9	1,221	511,46	0,0009	18,752
4	4351,6	4,8	0,05	2,9	0,923	503,79	0,0012	18,385
5	4350,1	7,7	0,05	2,8	0,957	504,74	0,0010	18,530
6	4348,6	10,5	0,05	2,8	0,990	505,64	0,0009	18,595
7	4363,2	6,7	0,05	2,7	0,673	494,99	0,0027	18,254
8	4360,7	11,5	0,05	2,6	0,727	496,99	0,0021	18,234
9	4359,3	14,4	0,05	2,6	0,758	498,03	0,0017	18,254
10	4340,1	2,9	0,15	3,4	1,178	509,78	0,0011	18,906
11	4339,1	4,8	0,15	3,2	1,199	510,41	0,0011	18,937
12	4338,1	6,7	0,15	3,1	1,222	511,03	0,0010	18,840
13	4351,6	4,8	0,15	3,1	0,923	503,45	0,0014	18,621
14	4350,1	7,7	0,15	2,9	0,957	504,35	0,0012	18,829
15	4348,6	10,5	0,15	2,9	0,990	505,06	0,0011	18,741
16	4363,2	6,7	0,15	2,7	0,673	494,83	0,0020	18,399
17	4360,7	11,5	0,15	2,7	0,727	496,77	0,0016	18,487
18	4359,3	14,4	0,15	2,7	0,758	497,89	0,0018	18,513
19	4340,1	2,9	0,25	3,6	1,179	508,59	0,0013	19,114
20	4339,1	4,8	0,25	3,9	1,200	509,30	0,0016	18,963
21	4338,1	6,7	0,25	3,3	1,222	509,73	0,0011	19,125
22	4351,6	4,8	0,25	3,2	0,924	502,27	0,0017	18,792
23	4350,1	7,7	0,25	3,1	0,958	503,60	0,0015	18,803
24	4348,6	10,5	0,25	3,1	0,990	504,50	0,0014	18,727
25	4363,2	6,7	0,25	2,9	0,673	493,90	0,0026	18,752
26	4360,7	11,5	0,25	2,8	0,727	496,01	0,0020	18,385
27	4359,3	14,4	0,25	2,8	0,759	497,14	0,0019	18,530

Аппроксимация данных таблицы 4.3 выполнена с помощью программного обеспечения OriginPro 2016. Определены модели изменения параметров процесса экспандирования как функции, зависящей от исходной ширины стального листа B_0 (мм), начальной овальности заготовки Δ_0 (мм) и коэффициента трения μ при дефекте заготовки в виде яблока (таблица 4.4).

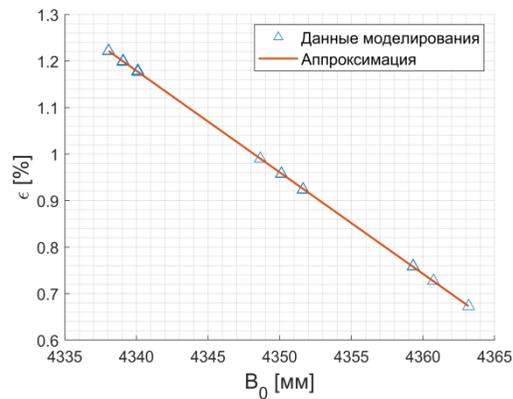
Таблица 4.4 – Формулы получены с использованием аппроксимации

Формула	Единица	R^2 (*)
$\frac{\Delta}{\Delta_0} = 0,83623(0,57145\mu + 0,7906)\left(\frac{1000\Delta_0}{B_0}\right)^{-1,14359}$	–	0,996
$\varepsilon = -21,8193\frac{B_0}{1000} + 95,87457$	%	≈ 1
$\sigma_{itb} = 13,4568(-0,51298\mu + 37,62442)\varepsilon^{0,05402}$	МПа	0,999
$\xi = 0,06131(0,0158\mu + 0,01882)\varepsilon^{-1,3451}$	–	0,781
$p = 2,849(0,25908\mu + 2,84914)(2,27735\varepsilon + 0,04884)$	МПа	0,950
(*) Множественный коэффициент детерминации		

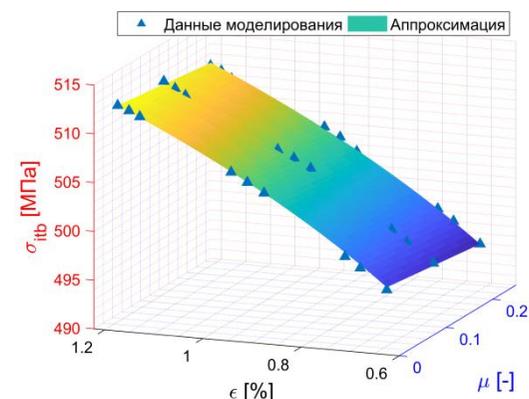
Представленные зависимости показаны в виде графика на рисунке 4.14. Из формул в таблице 4.4 и графиков на рисунке 4.14 видно, что влияние ширины стального листа (B_0), начальной овальности (Δ_0) и коэффициента трения (μ) на процесс экспандирования аналогично закономерностям для заготовки, имеющей дефект формы в виде яблока.



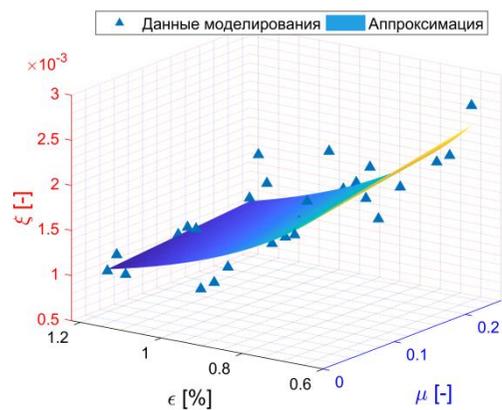
а)



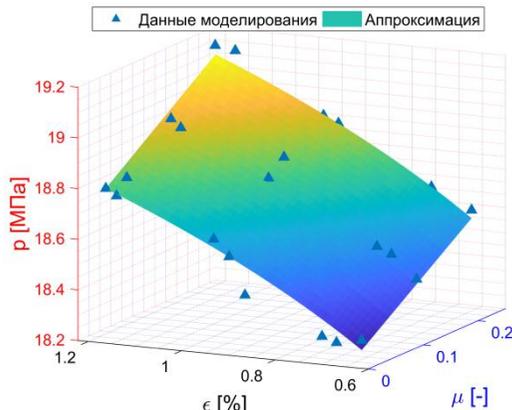
б)



в)



г)



д)

Рисунок 4.14 – Связи параметров процесса экспандирования с шириной стального листа, начальной овальностью и коэффициентом трения при трубной заготовке в виде яблока

а – овальность; б – пластическая деформация; в – средняя интенсивность напряжения; г – коэффициент остаточной упругости тела; д – среднее давление сегмента на внутреннюю поверхность трубной заготовки

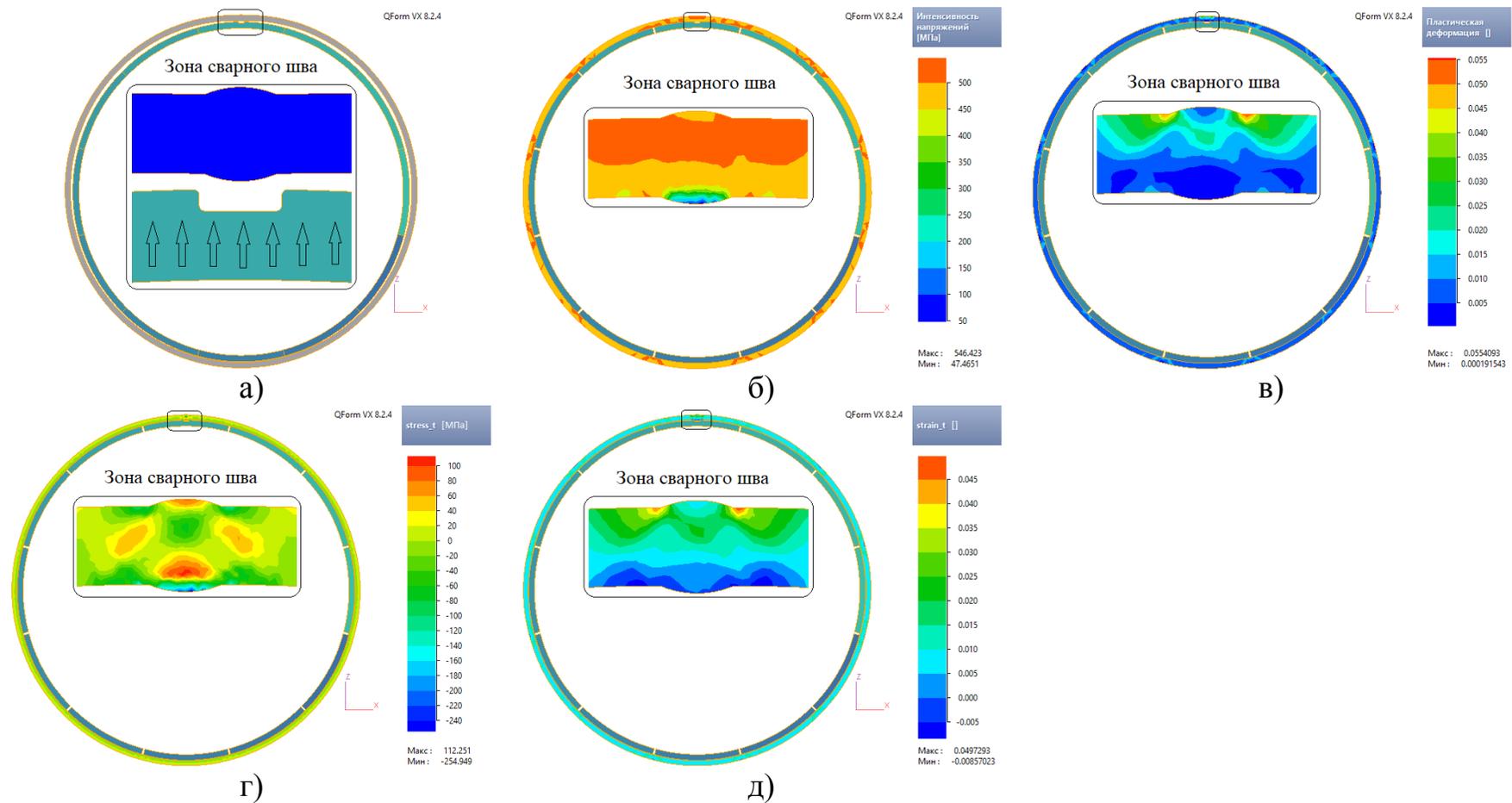


Рисунок 4.15 – Напряженно-деформированное состояние при экспандировании трубной заготовки в виде яблока

а – начальное состояние; б – интенсивность напряжений; в – пластическая деформация;

г – остаточное тангенциальное напряжение; д – остаточная тангенциальная деформация

На рисунке 4.15 представлены поля интенсивности напряжений, накопленной пластической деформации, остаточных тангенциальных напряжений и деформаций при экспандировании трубной заготовки, которая имеет номер №8 в таблице 4.3. Не трудно видеть, что распределение напряжений и деформаций не равномерно, их наибольшее значение концентрируется в зонах кромок на сегментах (в главе 2 математическая модель подтверждает это). Принципиальным отличием от экспандирования заготовки, которая имеет дефект в виде крыши, является то, что в внутренней зоне сварного шва возникает наименьшее значение напряжения и деформации, при этом внешняя зона сварного шва может деформироваться. Но не деформирует его внутренняя зона.

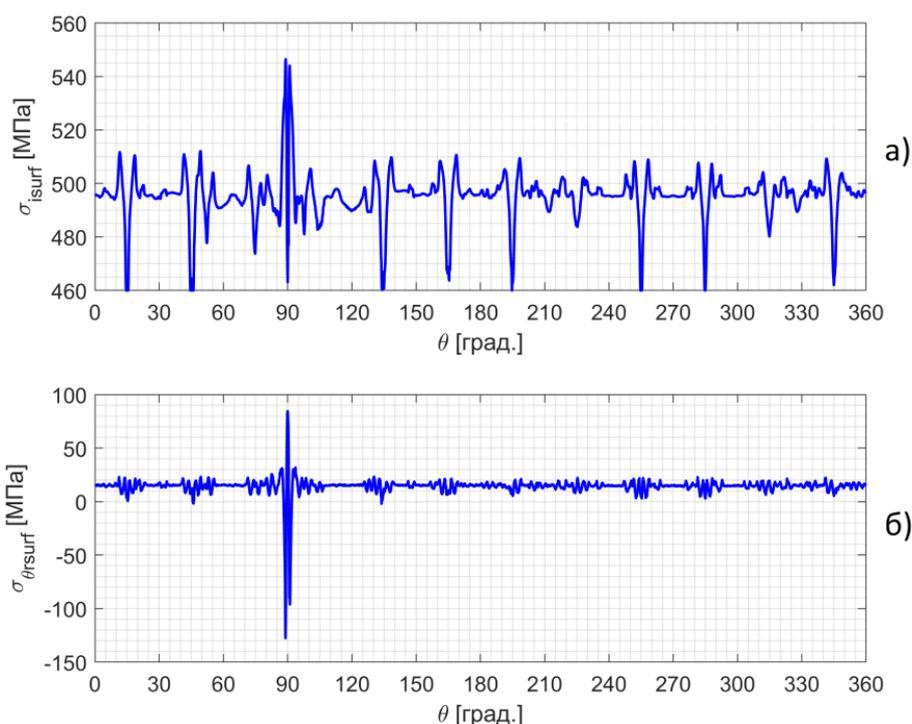


Рисунок 4.16 – Распределение интенсивности напряжения (а) и остаточного тангенциального напряжения (б) на наружной поверхности

На рисунке 4.16 показано распределение интенсивности напряжения и остаточного тангенциального напряжения на наружной поверхности (положение сварного шва находится при угле $\theta = 90^0$), тогда интенсивность напряжения в центре шва слабая, как и в центрах зазоров между сегментами. Поэтому центр шва и зазоров между сегментами недеформированы на

наружной поверхности. Однако, около границ шва материал сильно деформирован (см. рис. 4.16а).

Не учитывая наличие остаточного растягивающего напряжения, полученного при сварке (перед экспандированием), то остаточное тангенциальное напряжение будет растягивающим в центре сварного шва примерно +85 МПа (см. рис. 4.16б), а материал близко к центру шва будет сжимающим, примерно -110 МПа; но в практике остаточное напряжение после сварки остается. Если предположить, что оно примерно +450 МПа, то остаточное напряжение после экспандирования в шве может быть от +450-110=+340 МПа до +450+85=+535 МПа, т.е. в сварном шве велики остаточные растягивающие напряжения, в остальных зонах - слабо остаточные растягивающие напряжения, как на рисунке 4.16б (примерно +15 МПа).

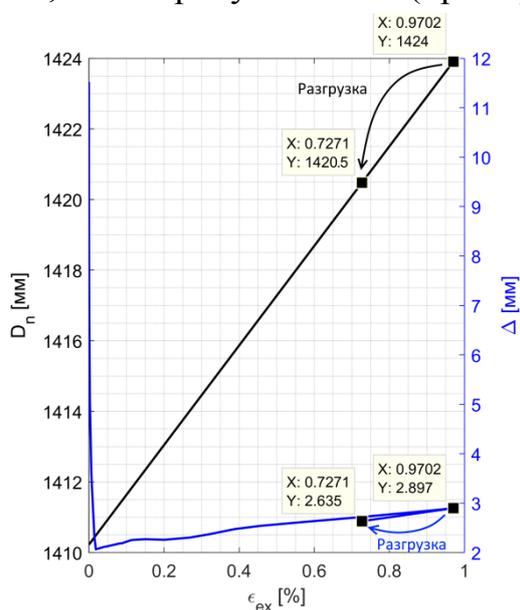


Рисунок 4.17 – Изменение наружного диаметра и овальности трубной заготовки во время экспандирования

Изменение наружного диаметра и овальности при экспандировании представлено на рисунке 4.17. На этом рисунке наблюдается, что в первой стадии процесса экспандирования (примерно $\epsilon_{ex} < 0,02\%$) овальность заготовки снижается быстро, а на следующей стадии медленно повышается. Диаметр трубы всегда увеличивается в течение всего процесса экспандирования примерно до $\epsilon_{ex} = 0,9702\%$ (момент остановки процесса экспандирования, до достигаемого диаметра примерно $D_{nt} = 1424$ мм). Один

очень важный из этапов процесса экспандирования является стадия пружинения заготовки после разгрузки, при этом диаметр заготовки уменьшается до $D_n = 1420,5$ мм (нетрудно рассчитать коэффициент пружинения $\lambda_D = \frac{1420,5 - 1424}{1424} 100\% = -0,246\%$), после чего овальность уменьшается немного, примерно на 0,262 мм.

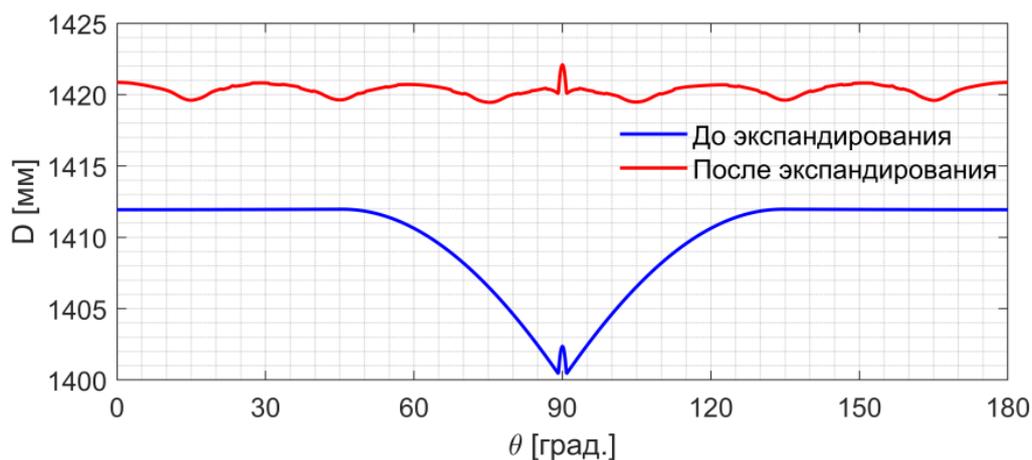


Рисунок 4.18 – Наружный профиль трубной заготовки до и после экспандирования

На рисунке 4.18 представлено распределение диаметра (профиль) по контуру трубной заготовки до и после экспандирования. Видно, что после экспандирования форма и размер сварного шва сохраняются, против центров сегментов в трубе возникают выступы, а в центрах зазоров между сегментами – впадины, они порождают неравномерность профиля ТБД. Поэтому для повышения качества ТБД (снижения выпукло-вогнутого профиля) нужно увеличивать число сегментов экспандера или увеличивать рабочий радиус сегментов.

4.2.3 Сравнение характеристик при экспандировании трубных заготовок с дефектами в виде «крыши» и «яблока»

- При экспандировании трубной заготовки с дефектом в виде крыши (см. рис. 4.19а) скорость выравнивания овальности до минимального значения медленно ($\varepsilon_{ex} < 0,45\%$), а с дефектом яблока (см. рис. 4.19б) она снижается до меньшего значения ($\varepsilon_{ex} < 0,02\%$).

- После разгрузки при экспандировании трубной заготовки с дефектом в виде крыши (см. рис. 4.19а) овальность вновь увеличивается от момента перед разгрузкой, а с дефектом типа яблока она далее уменьшается (см. рис. 4.19б).

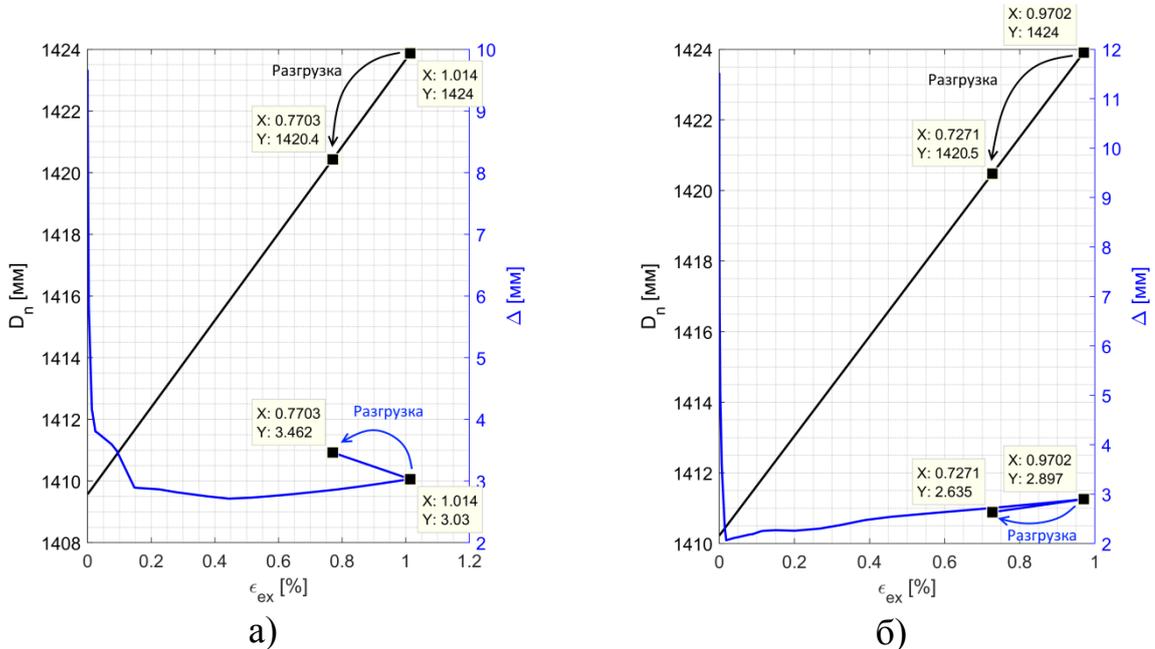


Рисунок 4.19 – Сравнение процесса выравнивания дефекта при экспандировании трубной заготовки в виде крыши и яблока

Из регрессионных формул, представленных в таблицах 4.2 и 4.4, получим графики сравнения влияния величин B_0 , Δ_0 , ε на процесс экспандирования заготовок, которые имели начальные дефекты в виде крыши и яблока, они показаны на рисунке 4.20.

На рисунке 4.20а представлено изменение овальности ТБД (отношение $\frac{\Delta}{\Delta_0}$) по отношению $\frac{1000\Delta_0}{B_0}$. На этом графике при $\frac{1000\Delta_0}{B_0} < 0,9$ то овальность для формы крыши выше для формы яблока, и если $\frac{1000\Delta_0}{B_0} > 0,9$ то овальность для формы крыши меньше для формы яблока. В практике отношение $\frac{1000\Delta_0}{B_0}$ всегда больше 1, поэтому качество ТБД по овальности

для начальной формы типа яблока можно считать предпочтительней по сравнению с дефектом формы типа крыши.

На рисунке 4.20б представлено изменение коэффициента остаточной эластичности ξ по пластической деформации ϵ . На этом графике коэффициент остаточной эластичности для формы яблока всегда меньше, чем для формы крыши, поэтому для формы яблока можно прогнозировать более стабильную геометрию изделий после калибровки.

- Из таблиц 4.2 и 4.4 не наблюдается разницы между формами крыши и яблока по интенсивности напряжения и также по силе инструмента на трубной заготовке.

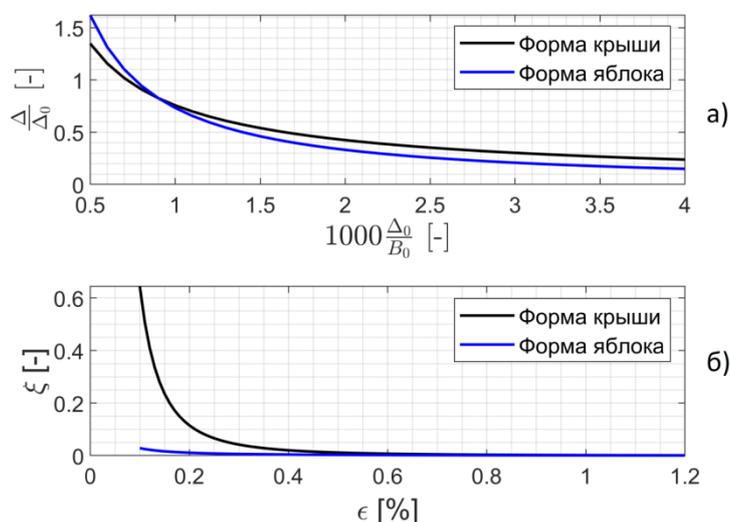


Рисунок 4.20 – Сравнение распределения интенсивности напряжения при экспандировании трубной заготовки в виде крыши и яблока

4.3 Исследование влияния дисперсии механических свойств на процесс экспандирования

Механические свойства, рассматриваемые как источник влияния на процесс экспандирования, включают в себя предел текучести $\sigma_{0,2}$ и модуль упругости E . Для исследования их влияния на процесс экспандирования сделано моделирование на одну трубную заготовки с формой яблока №8 таблицы 4.3. Заготовка имеет ширину листа $B_0 = 4360,7$ мм (начальный диаметр перед экспандированием $D_{n0} = 1410,2$ мм). Коэффициент трения

$\mu = 0,15$. Заготовка деформируется до диаметра $D_{nt} = 1424$ мм с фиксированной степенью экспандирования, которая определяется выражением $\varepsilon_{ex} = \frac{D_{nt} - D_{n0}}{D_{n0}} 100\% = \frac{1424 - 1410,2}{1410,2} 100\% = 0,979\%$. Диаметр

D_n , пластическая деформация после разгрузки ε и коэффициент пружинения при экспандировании λ_D представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Данные моделирования процесса экспандирования трубной заготовки с изменением предела текучести и модуля упругости

№	Входные параметры		Расчетные параметры			
	$\sigma_{0,2}$ [МПа]	E [ГПа]	D_{nt} [мм]	D_n [мм]	ε [%]	λ_D [%]
1	205	190	1424,004	1422,465	0,868	-0,1081
2	205	200	1424,025	1422,566	0,875	-0,1025
3	205	210	1424,019	1422,629	0,879	-0,0976
4	235	190	1423,998	1422,236	0,852	-0,1238
5	235	200	1423,999	1422,324	0,858	-0,1176
6	235	210	1424,035	1422,442	0,866	-0,1119
7	245	190	1424,026	1422,190	0,848	-0,1289
8	245	200	1424,012	1422,268	0,854	-0,1225
9	245	210	1424,000	1422,338	0,859	-0,1167
10	265	190	1424,017	1422,032	0,837	-0,1394
11	265	200	1424,035	1422,149	0,845	-0,1325
12	265	210	1424,040	1422,244	0,852	-0,1261
13	345	190	1423,998	1421,408	0,793	-0,1819
14	345	200	1424,000	1421,541	0,802	-0,1727
15	345	210	1424,007	1421,665	0,811	-0,1645
16	355	190	1423,987	1421,322	0,787	-0,1872
17	355	200	1423,995	1421,462	0,797	-0,1779
18	355	210	1423,982	1421,571	0,804	-0,1693
19	380	190	1424,024	1421,175	0,776	-0,2000
20	380	200	1424,018	1421,312	0,786	-0,1900
21	380	210	1423,996	1421,416	0,793	-0,1812
22	390	190	1423,990	1421,062	0,768	-0,2056
23	390	200	1424,000	1421,223	0,780	-0,1951
24	390	210	1423,991	1421,342	0,788	-0,1860
25	410	190	1424,002	1420,925	0,759	-0,2161
26	410	200	1423,974	1421,050	0,768	-0,2053

27	410	210	1423,994	1421,210	0,779	-0,1955
28	460	190	1423,976	1420,527	0,730	-0,2422
29	460	200	1424,020	1420,747	0,746	-0,2299
30	460	210	1423,970	1420,847	0,753	-0,2193

Регрессионные соотношения для определения изменения пластической деформации (после разгрузки) ε и коэффициента пружинения при экспандировании λ_D , зависящие от предела текучести $\sigma_{0,2}$ (МПа) и модуля упругости E (ГПа), представлены в таблице 4.6.

Нетрудно видеть, что пластическая деформация и коэффициент пружинения сильно зависят от отношения предела текучести к модулю упругости, потому что множественный коэффициент детерминации, полученный при регрессе данных от моделирований, приближается к 1.

Таблица 4.6 – Формулы получены с использованием регрессионного анализа

Формула	Единица	R^2 (*)
$\varepsilon = -0,10285 \frac{\sigma_{0,2}}{E} + 0,97991$	%	≈ 1
$\lambda_D = -0,10016 \frac{\sigma_{0,2}}{E} + 1,33539 \cdot 10^{-4}$	%	≈ 1
$D_n = 1424 \left(1 + \frac{\lambda_D}{100} \right)$	мм	
(*) Множественный коэффициент детерминации		

На рисунке 4.21 показаны связи пластической деформации и коэффициента пружинения с отношением предела текучести к модулю упругости в виде графика. Из этого графика и таблицы 4.6 видно, что величины ε и λ_D уменьшаются с увеличением значений $\sigma_{0,2}$ [МПа] и E [ГПа].

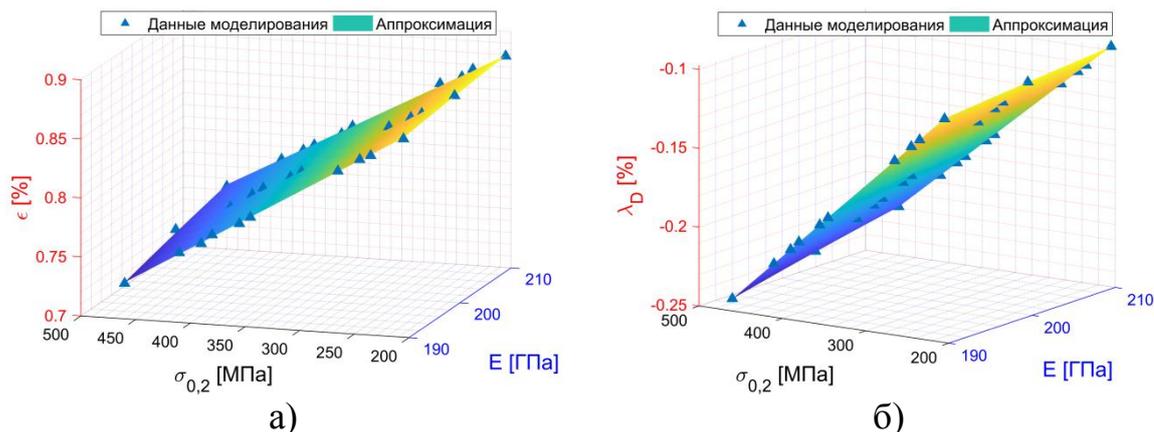


Рисунок 4.21 – Связи пластической деформации (а) и коэффициента пружинения (б) с пределом текучести и модулем упругости

Известно, что наружный диаметр ТБД (D_n) образуется после экспандирования и последующего обратного пружинения, т.е. он зависит от λ_D , связанной с механическими свойствами. Из моделирования и таблицы 4.6 можно классифицировать наружный диаметр по значению коэффициента пружинения, что показан на рисунке 4.22.

При $D_n = 1417$ мм коэффициент пружинения можно рассчитаться $\lambda_D = \frac{1417 - 1424}{1424} 100\% = -0,492 \%$. Отношение предела текучести к модулю

$$\text{упругости } \frac{\sigma_{0,2}}{E} = \frac{1,33539 \cdot 10^{-4} + \lambda_D}{0,10016} = 4,913.$$

$$\text{При } D_n = 1420 \text{ мм, то } \lambda_D = \frac{1420 - 1424}{1424} 100\% = -0,281 \% \text{ и } \frac{\sigma_{0,2}}{E} = 2,807;$$

$$\text{При } D_n = 1423 \text{ мм то } \lambda_D = \frac{1423 - 1424}{1424} 100\% = -0,070 \% \text{ и } \frac{\sigma_{0,2}}{E} = 0,700;$$

При $\lambda_D > -0,070 \%$ диаметр больше 1423 мм, а при $\lambda_D < -0,492 \%$ он меньше 1417 мм. Т.е. труба после экспандирования не удовлетворяет по требованиям в соответствии с ГОСТ 31447–2012, что наружный диаметр должен быть в интервале $[1417...1423]$ мм;

При $-0,492 \% \leq \lambda_D \leq -0,070 \%$ наружный диаметр находится в интервале $[1417...1423]$ мм. Но наружный диаметр равен 1420 мм при $\lambda_D = -0,281 \%$. А при $-0,281 \% \leq \lambda_D \leq -0,070 \%$ то D_n находится в большем значении от номинального диаметра (больше 1420 мм), при $-0,492 \% \leq \lambda_D \leq -0,281 \%$ то D_n находится в меньшем значении от номинального диаметра (меньше 1420 мм).

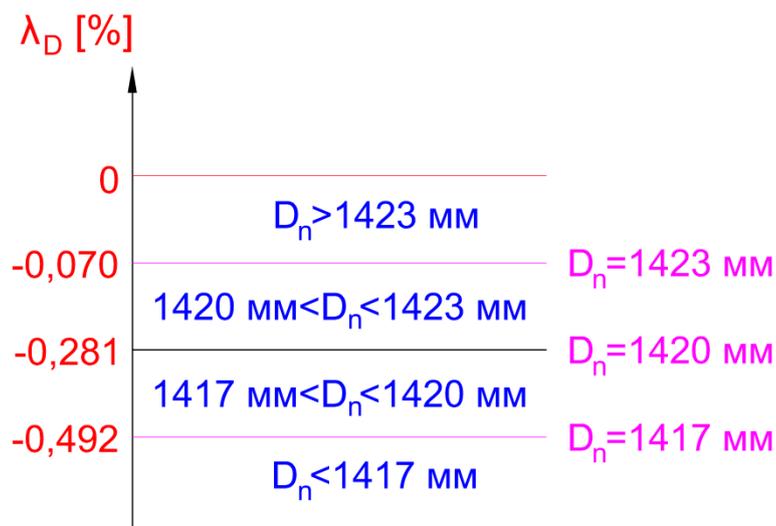


Рисунок 4.22 – Связь коэффициента пруживания с диаметром ТБД при экспандировании

На рисунке 4.23 представлена схема определения диаметра ТБД по изменению механических свойств материала, включающих предел текучести и модуль упругости. Видно, что:

- трубные заготовки с фиксированной геометрией при экспандировании с разными материалами, имеющими одинаковое отношение $\frac{\sigma_{0,2}}{E} = const$, будут возможность пружинения одинаково. Т.е. наружный диаметр получен одинаково;

- для рассматриваемой заготовки при разных металлах, имеющих $0,700 \leq \frac{\sigma_{0,2}}{E} \leq 4,913$, получим наружный диаметр ТБД в интервале

[1417...1423] мм; особенно, получим диаметр 1420 мм при $\frac{\sigma_{0,2}}{E} = 2,807$.

Поэтому с разными металлами, имеющими $\frac{\sigma_{0,2}}{E} = 2,807$, всегда получим

наружный диаметр 1420 мм по ГОСТ 31447–2012. Кроме того, получим

диаметр выше 1420 мм при $0,700 \leq \frac{\sigma_{0,2}}{E} \leq 2,807$ и меньше 1420 мм при

$2,807 \leq \frac{\sigma_{0,2}}{E} \leq 4,913$. Не удовлетворяет при $\frac{\sigma_{0,2}}{E} > 4,913$ или $\frac{\sigma_{0,2}}{E} < 0,700$.

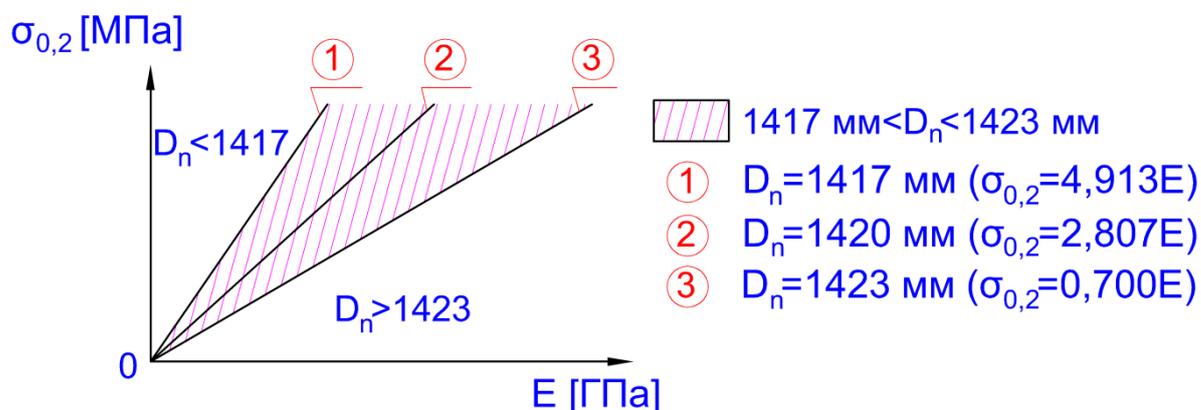


Рисунок 4.23 – Схема прогнозирования диаметра ТБД при экспандировании, учитывая влияние предела текучести и модуля упругости металла

4.4 Проектирование программного обеспечения для автоматического расчета параметров процесса экспандирования

На основании разработанной методики исследований с помощью компьютерного моделирования в QForm приведены формулы для связи параметров процесса экспандирования (овальности, степени пластической деформации, средней интенсивности напряжений, коэффициента остаточной эластичности и среднего давления сегмента, действующего на трубу) с исходными параметрами (формы заготовки, ширины стального листа, начальной овальности и коэффициента трения). Комплекс включает и нахождение зависимости коэффициента пружинения от механических свойств материала (предела текучести и модуля упругости). Задача

автоматического расчёта реализована в виде программы на языке C#, использован указанный алгоритм (см. рис. 4.6). Программа предназначена для работы на компьютере с операционной системой Windows 64 bit на платформе .NET Framework 4.7.2.

На рисунке 4.24 представлен интерфейс панели задач ввода исходных данных и результатов расчета.

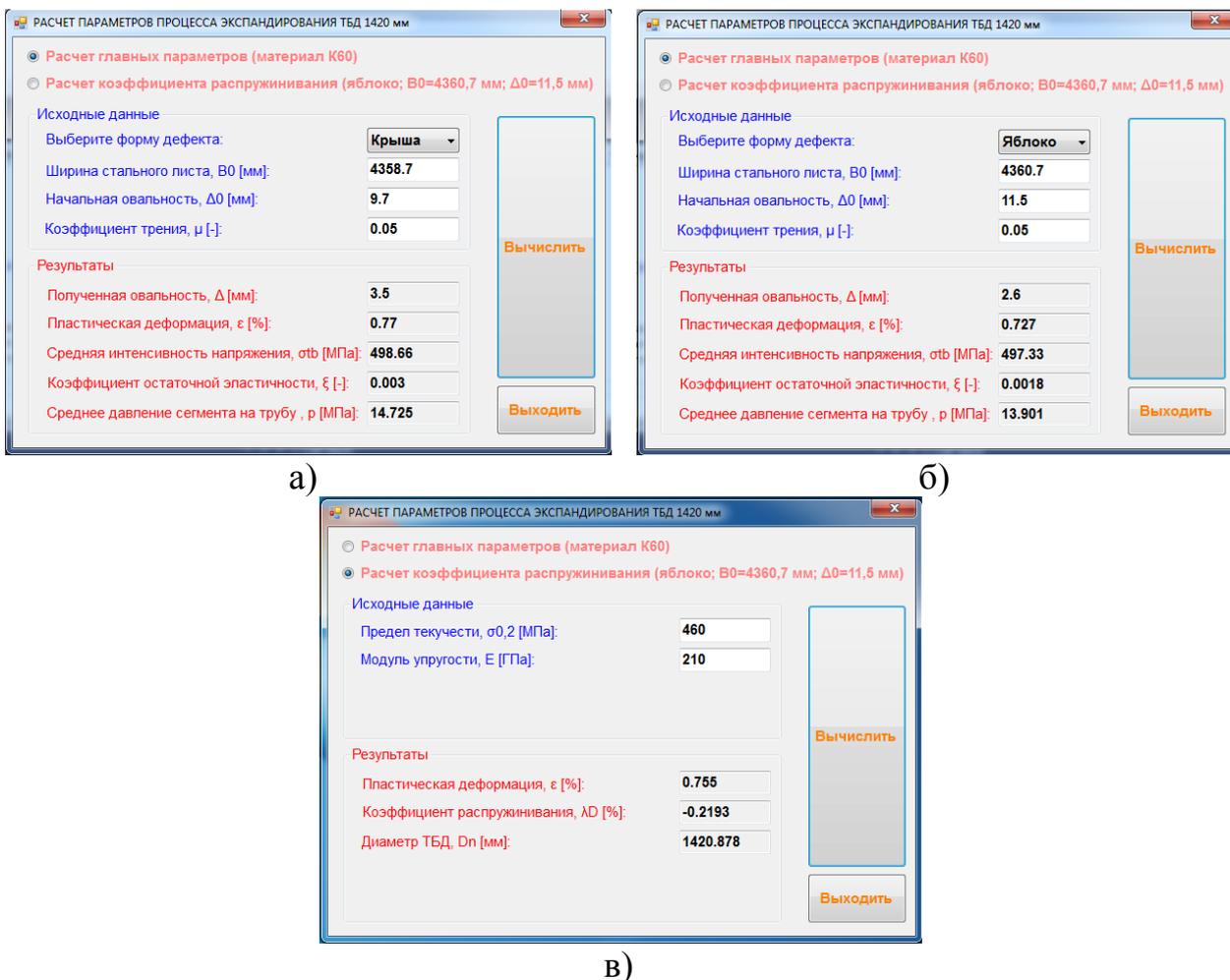


Рисунок 4.24 – Интерфейс панели задач ввода исходных данных и результатов расчета

а – расчет главных параметров для формы крыши; б – расчет главных параметров для формы яблока; в – расчет коэффициента пружинения и диаметра изделия

Программа позволяет быстро рассчитать овальность, степень пластической деформации, среднюю интенсивность напряжения, коэффициент остаточной эластичности и усилие на сегменте по начальным параметрам: форма заготовки, ширина стального листа, начальная овальность и контактное трение. Есть возможность также рассчитать коэффициент пружинения по механическим свойствам материала: пределу текучести и модулю упругости. Это поможет технологам рассчитать предварительно полученные результаты и выбрать рациональные режимы для процесса экспандирования с заданными исходными данными. Это также откроет новые возможности управления технологией процесса экспандирования для стабильного производства изделий повышенного качества.

Выводы по главе 4

1. Разработана конечно-элементная модель процесса экспандирования ТБД методом конечных элементов в программе QForm. Установлен алгоритм с помощью программного языка LUA для определения геометрических параметров внешнего профиля (диаметр, периметр и овальность), напряжений, деформаций, давлений инструмента на трубу и других параметров.

2. Предложен параметр, названный «коэффициентом остаточной эластичности», величина которого отражает возможность производства изделий, обладающих стабильной геометрией.

3. Построена связь параметров процесса экспандирования, таких как полученная овальность, пластическая деформация, средняя интенсивность напряжения, критерия остаточной эластичности и силы сегмента на трубу с исходными параметрами, такими как форма заготовки, ширина стального листа, начальная овальность и коэффициент контактного трения:

+ При больших значениях отношения начальной овальности к ширине стального листа относительная овальность (отношение овальности,

полученной после экспандирования, к начальной овальности) будет меньшей.

+ При увеличении трения между поверхностью сегментов и внутренней трубной заготовки, параметры процесса экспандирования как сила деформации и коэффициент остаточной эластичности увеличиваются. Увеличение коэффициента трения не способствует нормальному процессу экспандирования и приводит к снижению качества изделий.

+ Качество ТБД после экспандирования трубной заготовки в форме яблока лучше, чем в форме крыши. Таким образом, при операциях формования перед экспандированием предпочтительней создавать форму, близкую к яблоку, в отличии от формы крыши.

4. Описана зависимость коэффициента пружинения, а также изменения (отклонения) диаметра ТБД, полученных при экспандировании, от механических свойств материала заготовки, что показывает, что материалы с одинаковым отношением предела текучести к модулю упругости имеют одинаковые коэффициент пружинения и отклонение диаметра. Результаты исследования определяют область параметров обработки материала, позволяющих получить ТБД с диаметром в соответствии с ГОСТ 31447–2012.

5. Освоенный алгоритм позволяет оптимизировать геометрию инструмента, а также определять момент завершения рабочего хода машины соответственно выбранным критериям оптимизации для производства продукции повышенного качества.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В цепочке операций по производству магистральных труб большого диаметра процесс калибровки экспандированием заготовок имеет ключевое значение, заготовка для него наследует колебания структуры металла и механических свойств, геометрии штрипса, а также соответствующие этому дефекты предыдущих операций формовки и сварки.

2. Математическим и компьютерным моделированием установлена количественная зависимость степени неравномерности напряжений и деформаций при экспандировании от геометрии сегментов экспандерной головки и их количества, от коэффициента трения и от показателя степени кривой упрочнения металла. С повышением этого параметра неравномерность снижается.

3. Данные, полученные на созданной физической модели экспандирования, и параллельное компьютерное моделирование подтвердили возможность проведения исследований процесса на основе конечно-элементного моделирования с использованием разработанных LUA-подпрограмм в препроцессоре и постпроцессоре программного комплекса QForm-VX8.

4. Определена количественная зависимость геометрии изделий после экспандирования от начальной геометрии штрипса, от свойств металла, вида исходной трубной заготовки, коэффициента контактного трения и режима экспандирования. Установлено, что предпочтительной геометрией заготовок для калибровки обладает контур с дефектом формы типа «яблока» в отличие от дефектов типа «крыша».

5. Проведён стохастический анализ калибровки труб с известной дисперсией исходных данных, результаты позволяют оценить стабильность процесса и возможности управления технологическими параметрами для обеспечения соответствия требованиям ГОСТ 31447-2012.

6. Моделированием установлено, что одним из путей повышения стабильности геометрии калибруемых изделий может быть установление регламента на величину отношения предела текучести к модулю упругости металла штрипса.

7. Результаты моделирования, программы на языках C# и LUA, использование предложенных критериев неравномерности распределения напряжений и деформаций, коэффициента остаточной эластичности при экспандировании позволят оптимизировать операции по производству магистральных труб, повысить точность их геометрии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Емельянов И.Е. Теоретическое и экспериментальное исследование процесса формовки заготовки для производства труб большого диаметра по способу JCOE при различных режимах формоизменения и подготовка рекомендаций для повышения качества формовки. дип. магис. групп. МТМО-16-4-3. 2018. 136 с.
2. Самусев С.В. Теория, технология и оборудование для производства прямошовных сварных труб большого диаметра в линии ТЭСА-1420. Часть 1. / С.В. Самусев, А.Н. Фортунатов, Н.В. Овчарова. Выксунский Филиал НИТУ «МИСиС». 2013. 140 с.
3. Самусев С.В. Расчет геометрических параметров кромок трубной заготовки по однорадиусным схемам по способу JCOE / С.В. Самусев, Г.П. Жигулев, В.А. Фадеев // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2017. 60(5). С. 369-373.
4. Li-Feng Fan. Research on deformation characteristics of JCOE forming large diameter welding pipe / Li-Feng Fan, Jia-Xin Yan, Ying Gao, Jian-Bin Yun // Shanghai University and Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2016. P. 268–277.
5. Самусев С.В. Методика расчета геометрических параметров трубной заготовки при формоизменении в различных линиях ТЭСА / С. В. Самусев, А.В. Люскин // Известия вузов. Черная металлургия. 2009. № 1. С. 10-12.
6. <http://chermet.net/2015.08%20%D0%A1%D0%B1%D0%BE%D1%80%D0%BA%D0%B0%202.2.pdf> (дата обращения: 18.11.2020).
7. Описание технологического процесса производства ТБД // Загорский Трубный Завод: официальный сайт. – URL: <http://z-t-z.ru/ru/info/> (дата обращения: 28.10.2020).
8. ГОСТ 31447-2012: Трубы стальные сварные для магистральных газопроводов, нефтепроводов и нефтепродуктопроводов. Технические условия.
9. Конструкторско-эксплуатационные характеристики изделия. — Мегаобучалка: <http://megaobuchalka.ru> (дата обращения: 15.10.2020).

10. https://metallurgy_dictionary.academic.ru/1317/экспандирование (дата обращения: 28.10.2020).
11. Нгуен З. К., Ефремов Д. Б. Математическое моделирование для классификации качества труб большого диаметра по степеням неравномерности распределения напряжения-деформации при экспандировании. Теория и технология металлургического производства. 2020. № 3 (34). С. 14–20 (ВАК).
12. Руководство труборасширитель FPE010 ТМК WO1972-13. Компания FONTIJNE GROTNES B.V. <https://www.grotnes.com/expanding> (дата обращения: 28.10.2020).
13. Потапов И.Н. Теория трубного производства / И.Н. Потапов, А.П. Коликов, В.М. Друян. - М.: Металлургия. 1991. 424 с.
14. Коликов А.П. Машины и агрегаты трубного производства: Учебное пособие для вузов / А.П. Коликов, В.П. Романенко, СВ. Самусев и др. - М.: МИСиС. 1998. 536 с.
15. Осадчий В.Я. Технология и оборудования трубного производства / В.Я. Осадчий, А.С. Вавилин, В.Г. Зимовец, А.П. Коликов. - М.: Интернет Инжиниринг. 2007. 560 с.
16. Данченко В.Н. Технология трубного производства: Учеб. для вузов / В.Н. Данченко, А.П. Коликов, Б.А. Романцев, СВ. Самусев. - М.: Интернет Инжиниринг. 2002. 640 с.
17. Коликов А.П. Оценка напряженно-деформированного состояния металла на основе математического моделирования при производстве труб большого диаметра / А.П. Коликов, Д.Ю. Звонарев, М.Р. Галимов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2017. Том 60. № 9. С. 706-712.
18. Осадчий В.Я. Технология и оборудование трубного производства: учебник для вузов / Осадчий В.Я., Вавилин А.С., Зимовец В.Г., Коликов А.П. - М.: Интернет Инжиниринг. 2001. 608 с.

19. Шинкин В.Н. Технологические расчеты процессов производства труб большого диаметра по технологии SMS Meer / В.Н. Шинкин, А.П. Коликов // *Металлург*. 2011. № 11. С. 77-81.

20. Самусев С.В. Разработка методики расчета параметров инструмента для унификации групп сварных труб на участке кромкогибочных прессов / С.В. Самусев, А.В. Люскин, А.И. Романцов, К.Л. Жигунов, А.Н. Фортунатов // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2013 № 56(3). С. 20-22.

21. Пат. № 2486981 (Российская Федерация). Способ изготовления сварных труб большого диаметра / С.В. Самусев, А.И. Романцов, К.Л. Жигунов, В.В. Больдт, М.С. Сигида. 2013 - Бюл. № 19 от 10.07.2013г.

22. Зеленцев Е.Н. Технология производства бесшовных и сварных труб. Учебное пособие для практических занятий / Е.Н. Зеленцев, С.В. Самусев, А.Г. Егоров. - М.: МИСиС. 1989. 95 с.

23. Самусев С.В. Методы расчета напряжённо-деформированного состояния при производстве сварных труб в линии ТЭСА: сборник задач / С.В. Самусев, А.Н. Фортунатов, Н.А. Фролова. - ВФ МИСиС. 2008. 130 с.

24. Самусев С.В. Расчет технических параметров процессов непрерывного профилирования и редуцирования сварных труб: сборник задач / С.В. Самусев, А.Н. Фортунатов, Д.В. Захаров, А.М. Исаева. - ВФ МИСиС. 2007. 147 с.

25. Самусев С.В. Методы расчета калибровок инструмента и энергосиловых параметров процесса производства сварных труб в линии прессов и ТЭСА: сборник задач / С.В. Самусев, А.Н. Фортунатов, Н.А. Фролова, Н.Г. Пашков. - ВФ МИСиС. 2006. 155 с.

26. Романцев Б.А. Трубное производство / Б.А. Романцев, А.В. Гончарук, Н.М. Вавилкин, С.В. Самусев. - М.: Изд. Дом МИСиС. 2011. 970 с.

27. Шинкин В.Н. Механика сплошных сред для металлургов: учебник. - М.: Изд. дом МИСИС. 2014. 627 с.

28. Шинкин В.Н. Остаточные напряжения при экспандировании стальной трубы. Молодой ученый. 2015. № 20 (100). С. 88-95.

29. Фрункин Д.Б. Верификация моделирования процесса экспандирования сварных прямошовных труб большого диаметра, производимых на АО «Волжский трубный завод» / Д.Б. Фрункин, Л.М. Гуревич, И.Л. Пермяков, М.Ю. Платонов, А.И. Банников, Р.Е. Новиков // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2016. № 15 (194). С. 59-63.

30. Фрункин Д. Б. Моделирование процесса экспандирования сварных прямошовных труб большого диаметра, производимых на АО «Волжский трубный завод» / Д.Б. Фрункин, Л.М. Гуревич, И.Л. Пермяков, М.Ю. Платонов, А.И. Банников, Р. Е. Новиков // Известия волгоградского государственного технического университета. 2016. № 15 (194). С. 52–59.

31. Фрункин Д. Б. Изменение геометрии при экспандировании сварных прямошовных труб большого диаметра, производимых на АО «Волжский трубный завод» / Д.Б. Фрункин, Л.М. Гуревич, И.Л. Пермяков, М.Ю. Платонов, А.И. Банников, Р.Е. Новиков // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2017. № 6 (201). С. 49–54.

32. Youliang He. Theory research on expanding process of welded pipe diameter / Youliang He, Guangrun Bai, Kerang Zhou. Welding Pipe and Tube. 1997. 20(6). P. 9-11.

33. Zhengrong Fu. Exprimment research on expanding process of spiral welded pipe. Heavy Machinery. 1995. (5). P. 18-22.

34. Jingda Cai, Xi Cheng. Analysis and calculation on mechanical expanding force of conical die. Chinese Mechanical Engineering. 2010. 21(5). P. 599-602.

35. Xidai Du, Haibo Du. Tension analysis of mechanical expanding with single-end machine. China Metal Forming Equipment & Manufacturing Technology. 2010. (1). P. 72-74.

36. Shuhong Xiao, Changli Zha. Investigation on the key technologies of mechanical expanding of large diameter LSAW pipe. Materials Science Forum. 2008. Vol. 575-578. P. 472-477.

37. Xuliang Qu. Research on expanding machine spiral of large diameter welded pipe. *Machine & Hydraulic*. 2009. 37(1). P. 183-187.

38. G. Palumbo, L. Tricarico. Effect of forming and calibration operations on the final shape of large diameter welded tubes. *Journal of Materials Processing Technology*. 2005. 164-165(5). P. 1089-1098.

39. Herynk M.D. Effects of the UOE/UOC pipe manufacturing processes on pipe collapse pressure / M.D. Herynk, S. Kyriakider, A. Onoufriou, et al. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2007. 49(5). P. 533-553.

40. Baofeng Guo. Simulation and experimental research on mechanical expanding process of large diameter spiral welded pipe. Yanshan university. 2001.

41. Qian Liu. Simulation of radial expanding to release stresses of large diameter straight weld pipe. Tianjing university. 2006.

42. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов: Учебник для вузов. Изд. 9-е, перераб. - М.: Наука. Гл. ред. Физ. - мат. Лит. 1986. 512 с.

43. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. - М.: Машиностроение. 1977. 423 с.

44. Заявка 2006289439, Япония, МПК В 21 D 39/20, В 21 С 37/30. Method and device for expanding UOE steel tube / Shimomoto T. Заявл. 11.4.2005; опубл. 26.10.2006.

45. Заявка 05317994, Япония, МПК В 21 D 39/20, В 21 D 3/14. Method for expanding UOE steel pipe / Ohira N., Maeda K. Заявл. 22.5.1992; опубл. 3.12.1993.

46. Пат. 2817620, Япония, МПК В 21 D 39/20, В 21 С 37/08, В 21 D 3/14. Head for mechanical pipe expander / Hirose Y. Заявл. 22.4.1994; опубл. 30.10.1998.

47. Заявка 59197321, Япония, МПК В 21D 39/20. Expanding device for UOE pipe / Kamigaki T., Mizutani M. Заявл. 21.4.1983; опубл. 8.11.1984.

48. Пат. 0148086, Япония, МПК В 21 D 3/12, В 21 D 3/14. Method for controlling longitudinal warp in mechanical expander / Yazawa K., Hirata K. Заявл. 14.6.1983; опубл. 18.10.1989.

49. Пат. 5333281, Япония, МПК В 21 С 37/08. Method of preventing bend when expanding UOE steel pipe / Miwa T. Kawae E. Заявл. 17.2.2010; опубл. 6.11.2013.
50. Пат. 8474292, США, МПК В 21 D 39/20. Straightening a tube on an expander / Kolbe M., Feldmann U. Заявл. 16.10.2008; опубл. 2.7.2013.
51. Заявка 2006272365, Япония, МПК В 21 D 3/14. Equipment and method for pipe end sizing of UOE steel pipe / Yamamoto N., Konishi T. Заявл. 28.03.2005; опубл. 12.10.2006.
52. Полухин П. И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов / П.И. Полухин, Г.Я. Гун, А.М. Галкин. - М.: Metallurgy. 1976. 485 с.
53. Богатов А.А., Колмогоров В.Л. Разрушение и деформируемость. - М.: Metallurgy. 1976. 485 с.
54. Бобылев А.В. Механические свойства металлов: справочник. - М.: Metallurgy. 1987. 208 с.
55. Белевич А.В. Основы технологической механики: текст лекций. Владим. гос. ун-т. - Владимир. 1999. 96 с.
56. Гун Г.Я. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением: учеб. пособие для вузов. - М.: Metallurgy. 1983. 352 с.
57. Третьяков А.В., Зюзин В.И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке металлов давлением: справочник. - Изд. 2-е. - М.: Metallurgy. 1973. 224 с.
58. Katsumi M., Kenji O. Steel Products for Energy Industries. JFE Technical Report. 2013. Vol. 43. No. 18. P. 1-11.
59. Nguyen D.C., Yefremov D.B. The method for determining the profile of large diameter pipes and the optimal technological mode during calibration-bending in the weld zone. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 862. No. 3. DOI:10.1088/1757-899X/862/3/032104 (SCOPUS).

60. Дибир А.Г. Практические расчеты на прочность конструктивных элементов. Часть 1 / А.Г. Дибир, О.В. Макаров, Н.И. Пекельный, Г.И. Юдин, М.Н. Гребенников. - Харьков «ХАИ». 2007. 104 с.

61. Nguyen D.C., Yefremov D.B. Mathematical simulation for forecasting an uneven distribution of the stressed-strain state of metal when expanding large-diameter pipes. Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020). Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. 2021. Vol. 1. P. 966-975. (SCOPUS).

62. Нгуен З.К., Ефремов Д.Б. Оценка степени неравномерности распределения напряженно-деформированного состояния металла на основе математической модели при экспандировании труб большого диаметра. Известия ТулГУ. 2020. №3. С. 461-467 (ВАК).

63. Вдовин И.В. Расчет технических параметров формоизменения трубной заготовки при различных режимах экспандирования в линии ТЭСА 1420 при производстве труб большого диаметра. Достижения вузовской науки. 2013. №. 7. С. 215-218.

64. Цветков И.В. Расчет усилий экспандирования труб для газонефтепроводов. Механическое оборудование металлургических заводов. 2018. № 2(11). С. 51-59.

65. Delistoian D., Chirchor M. UOE Pipe Manufacturing Process Simulation: Equipment Designing and Construction. ACTA Universitatis Cibiniensis. 2017. T. 69. No 1. P. 100-112.

66. Костюков В.Е. Численное моделирование производства труб большого диаметра для глубоководной прокладки / В.Е. Костюков, С.Ф. Перетрухин, С.В. Фотин, К.И. Дикарев // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. 2010. № 6. С. 148-154.

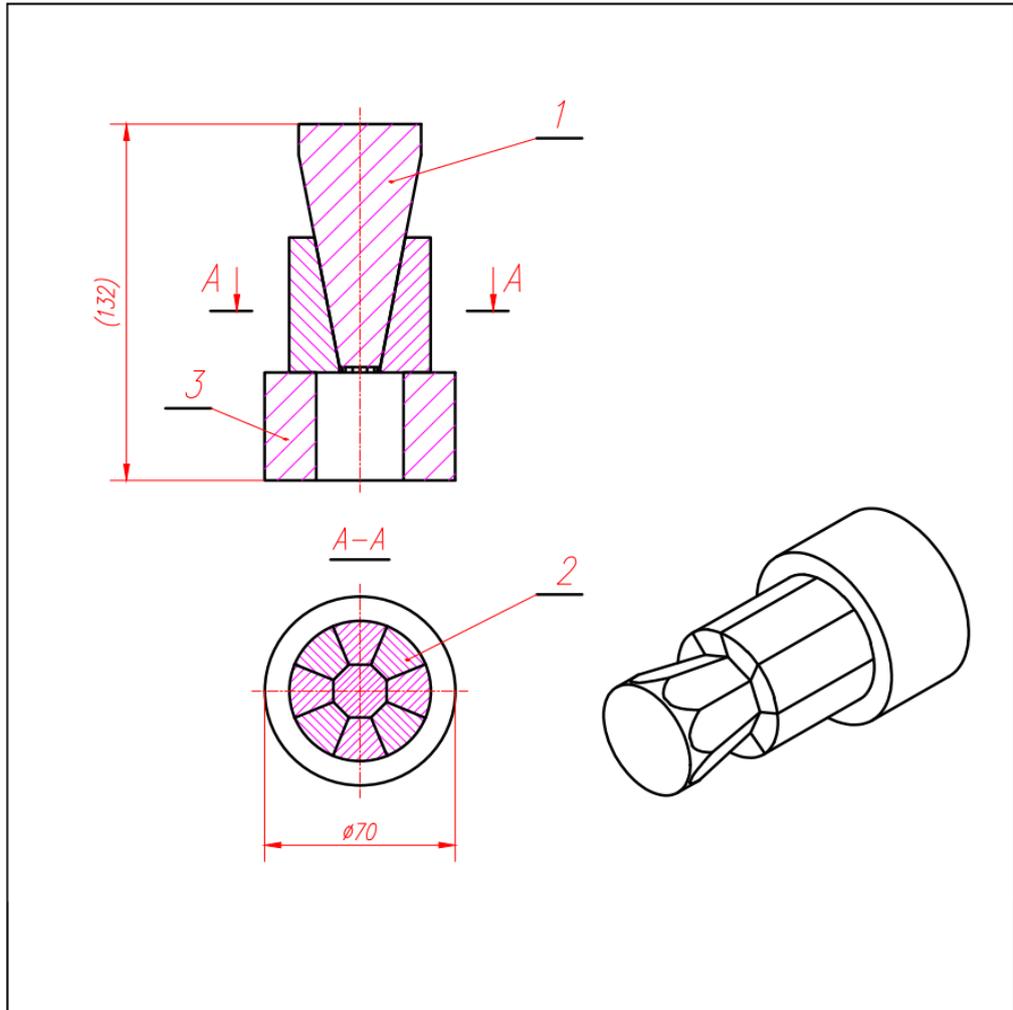
67. Балакшин Б.С. Основы технологии машиностроения. Учебник для вузов. Изд. Машиностроение. 1969. 467 с.

68. Радкевич Я.М., Лактионов Б.И. Метрология, стандартизация и взаимозаменяемость. Книга 3. Взаимозаменяемость. Часть 1. - М.: МГГУ. 2000. 240 с.
69. Тимирязев В.А. Основы технологии машиностроения / В.А. Тимирязев, А.А. Кутин, А.Г. Схиртладзе. Учебник для вузов. МГТУ «Станкин». 2011. 393 с.
70. Маталин А.А. Технология машиностроения: учебник. Санкт-Петербург: Лань. 2016. 512 с.
71. Бараз В.Р. Корреляционно-регрессионный анализ связи показателей коммерческой деятельности с использованием программы Excel. Екатеринбург: УГТУ-УПИ. 2005. 103 с.
72. Мельниченко А.С. Статистический анализ в металлургии и материаловедении. - М.: Изд. Дом МИСиС. 2009. 267 с.
73. Руководство программного обеспечения QForm VX 8.2.4 (<https://qform3d.ru/products/qform>).
74. Lee C.H, Altan T. Influence of flow stress and friction upon metal flow in upset forging of rings and cylinders. J Eng Ind. 1972. P. 775-782.
75. Fereshteh-Saniee F. Friction modelling for the physical simulation of the bulk metal forming processes / F. Fereshteh-Saniee, I. Pillinger, P. Hartley. J Mater Process Technol. 2004. No. 153-154. P. 151-156.
76. Male A.T., Cockcroft M.G. A method for the determination of the coefficient of friction of metals under condition of bulk plastic deformation, J. Inst. Met. 1964. Vol. 93. P. 38-46.
77. Леванов А.Н. Контактное трение в процессах обработки металлов давлением / А.Н. Леванов, В.Л. Колмогоров, С.П. Буркин, Б.Р. Картак, Ю.В. Ашпур, Ю.И. Спасский. - М.: Металлургия. 1976. 416 с.
78. Паспорт на лабораторную установку ОМД-3. 2012. 16 с.
79. Медведев С.С. Анализ процесса экспандирования труб большого диаметра, возможностей повышения качества изделий и ресурса деталей оборудования. дип. магис. груп. М-15-3. 2019. 58 с.

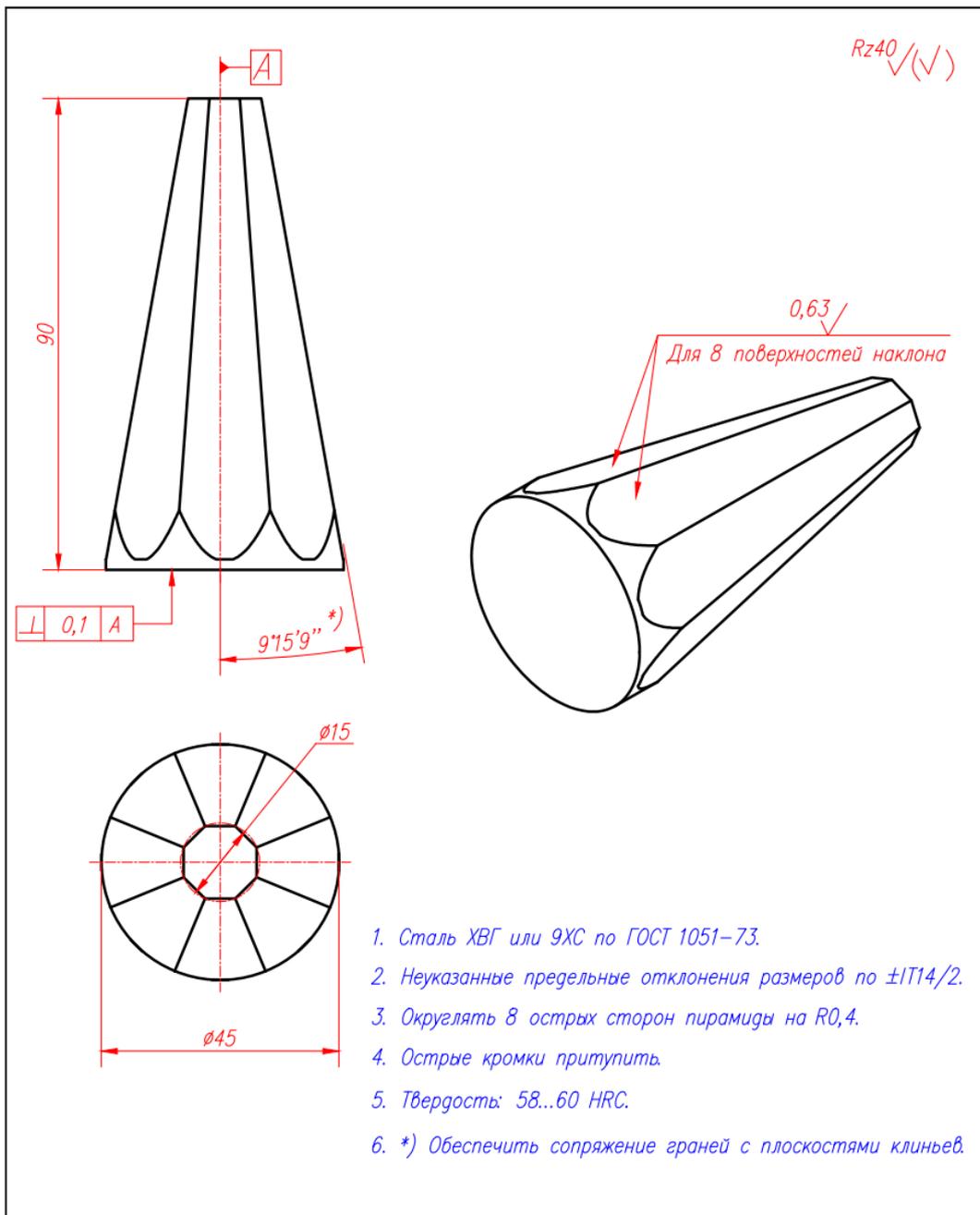
80. Ефремов Д.Б., Нгуен Зуй Кыонг. Определение изменения параметров внешнего профиля труб большого диаметра при экспандировании с помощью подпрограммы в среде QForm. Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2020. № 4. С. 33-38 (ВАК).

81. Ефремов Д.Б., Нгуен Зуй Кыонг. Конечно-элементное моделирование процесса экспандирования труб большого диаметра с начальным дефектом формы в виде круглого выступа. Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2021. № 3. С. 41-48 (ВАК).

ПРИЛОЖЕНИЯ А. Чертеж экспандера для физического моделирования

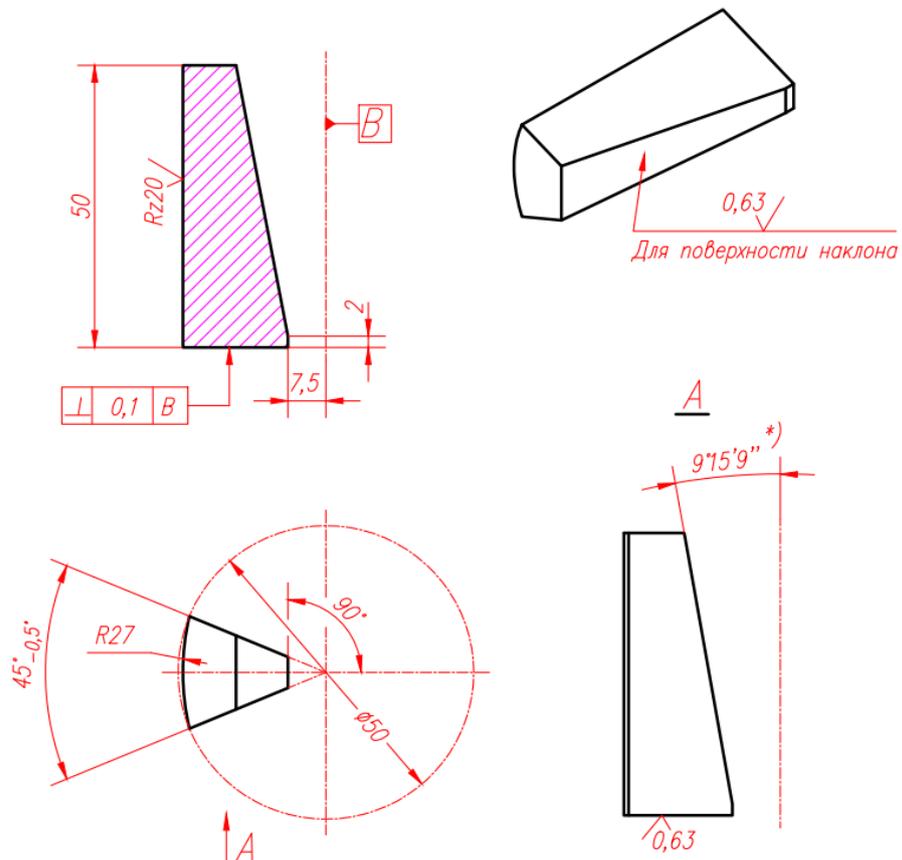


Формат	Зона	Поз	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание	
				<u>Детали</u>			
A4		1	ЭКСП1	Пирамида	1		
A4		2	ЭКСП2	Клин	8		
A4		3	ЭКСП3	Буфер	1		
ЭКСПАНДЕР ДЛЯ НАРУЖНОГО ДИАМЕТРА ТРУБЫ Ø60							
				ЭКСПАНДЕР	ЭКСПО		
Изм.	Лист	N° докум.	Подп.		Дата	Лит.	Масса
Разраб.		Кьонг Н.З			28.09		
Пров.		Ефремов Д.Б			28.09		
Т. контр.							
					Лист: 01	Листов: 01	
Н. контр.					ОМД – МИСис		
Утв.							



				ЭКСПАНДЕР ДЛЯ НАРУЖНОГО ДИАМЕТРА ТРУБЫ $\phi 60$			
				ПИРАМИДА			
				ЭКСП.1			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Лит.	Масса	Масштаб
		Кыюнг Н.З		28.09			1:1
		Ефремов Д.Б		28.09			
				Лист: 01 Листов: 01			
				ОМД – МИСуС			
				Сталь ХВГ по ГОСТ 1051–73			
Н.контр.							
Утв.							

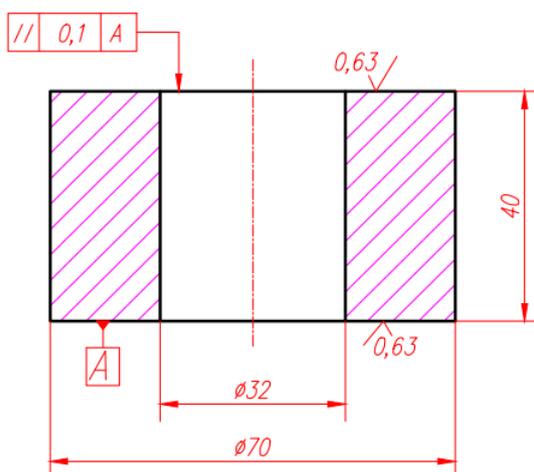
Rz40 $\sqrt{(\vee)}$



1. Сталь ХВГ или 9ХС по ГОСТ 1051-73.
2. Неуказанные предельные отклонения размеров по $\pm IT14/2$.
3. Острые кромки притупить.
4. Твердость: 58...60 HRC.
5. *) Обеспечить сопряжение граней с плоскостями пирамиды.

				ЭКСПАНДЕР ДЛЯ НАРУЖНОГО ДИАМЕТРА ТРУБЫ $\phi 60$				
				КЛИН	ЭКСП.2			
Изм.	Лист	N° докум.	Подп.		Дата	Лит.	Масса	Масштаб
					Т		1:1	
					Лист: 01	Листов: 01		
				Сталь ХВГ по ГОСТ 1051-73	ОМД - МИСиС			
Н.контр.								
Утв.								

Rz40 $\sqrt{(\checkmark)}$



1. Сталь ХВГ или 9ХС по ГОСТ 1051-73.
2. Неуказанные предельные отклонения размеров по $\pm IT14/2$.
3. Острые кромки притупить.
4. Твердость: 58...60 HRC.

				ЭКСПАНДЕР ДЛЯ НАРУЖНОГО ДИАМЕТРА ТРУБЫ $\phi 60$			
				БУФЕР			
				ЭКСП.З			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Лит.	Масса	Масштаб
				28.09			
Разраб.		Кыонг Н.З		28.09			
Пров.		Ефремов Д.Б					1:1
Т.контр.							
				Лист: 01 Листов: 01			
Н.контр.				Сталь ХВГ по ГОСТ 1051-73			
Утв.				ОМД - МИСис			

**ПРИЛОЖЕНИЯ Б. Подпрограмма на языке LUA для добавления
кривой сопротивления деформации в препроцессоре программы QForm**

```
set_target_workpiece()
```

```
E = parameter("E [MPa]", 210000)
```

```
Del5 = parameter("Del5 [%]", 20)
```

```
Sigma02 = parameter("Sigma02 [MPa]", 460)
```

```
SigmaB = parameter("SigmaB [MPa]", 590)
```

```
function FlowStress (strain)
```

```
    EpsB=Del5/100-SigmaB/E
```

```
    B=math.log(SigmaB/Sigma02)/math.log(EpsB/0.002)
```

```
    A=Sigma02/(0.002)^B
```

```
    if strain<=0.002 then
```

```
        F=Sigma02*1E6
```

```
    else
```

```
        F=A*1E6*strain^B
```

```
    end
```

```
    return F
```

```
end
```

**ПРИЛОЖЕНИЯ В. Подпрограмма на языке LUA для получения
пользовательских полей из среды QForm в постпроцессоре основной
программы**

```
set_target_workpiece()
```

```
h_all = 0  
h_ngoai = 0  
h_SigT = 0
```

```
recordEnd = parameter("Last record",45)  
fileName = parameter("File name",1)  
stress_r = result ("stress_r")  
stress_t = result ("stress_t")
```

```
strain_r = result ("strain_r")  
strain_t = result ("strain_t")
```

```
function UserFields (record_id, norm_x, norm_y, norm_z, x, z, stress_flow,  
stress_xx, stress_zz, stress_zx, strain_xx, strain_zz, strain_zx, strain_plast)
```

```
    xTmp=1e3*x  
    zTmp=1e3*z  
    r=math.sqrt(xTmp^2+zTmp^2)  
    Si=zTmp/r  
    Co=xTmp/r
```

```
    tmp=180*math.acos(Co)/math.pi;  
    if z>=0 then  
        arCos=tmp;  
    else  
        arCos=360-tmp;  
    end
```

```
    stress_r_tmp=(stress_xx*Co^2+stress_zz*Si^2+2*stress_zx*Si*Co)/10^6  
    stress_t_tmp=(stress_xx*Si^2+stress_zz*Co^2-2*stress_zx*Si*Co)/10^6
```

```
    strain_r_tmp=strain_xx*Co^2+strain_zz*Si^2+2*strain_zx*Si*Co  
    strain_t_tmp=strain_xx*Si^2+strain_zz*Co^2-2*strain_zx*Si*Co
```

```
    store (stress_r, stress_r_tmp)  
    store (stress_t, stress_t_tmp)
```

```

store (strain_r, strain_r_tmp)
store (strain_t, strain_t_tmp)

if h_all == 0 then
    f_all = io.open("LastRecord" .. fileName .. ".txt", "w")
    h_all = 1
end

if record_id == recordEnd then
    f_all:write (stress_flow/1e6, '\n')
end

if h_ngoai == 0 then
    f_ngoai = io.open("Ngoai_P" .. fileName .. ".txt", "w")
    h_ngoai = 1
end

if norm_x*x+norm_z*z > 0 then
    f_ngoai:write (record_id .. "\t" .. xTmp .. "\t" .. zTmp .. "\t" .. arCos ..
"\t" .. r .. "\t" .. strain_plast .. "\t" .. strain_r_tmp .. "\t" .. strain_t_tmp .. "\t" ..
stress_flow/1e6 .. "\t" .. stress_r_tmp .. "\t" .. stress_t_tmp, '\n')
end

if h_SigT == 0 then
    f_SigT = io.open("mSigT" .. fileName .. ".txt", "w")
    h_SigT = 1
end

if record_id == recordEnd + 1 then
    f_SigT:write (stress_t_tmp, '\n')
end
end
end

```

**ПРИЛОЖЕНИЯ Г. Программа расчета параметров процесса
экспандирования ТБД 1420x21,6 мм на языке С#**

```
using System;
using System.Text;
using System.Windows.Forms;

namespace ExpansionDn1420
{
    public partial class frmMain : Form
    {
        int MN_QT;
        int pa1_pa2;
        public frmMain()
        {
            InitializeComponent();
            cboLuachon.SelectedIndex = 0;
            MN_QT = 0;
            pa1_pa2 = 1;
        }

        private void rb1_CheckedChanged(object sender, EventArgs e)
        {
            pa1.Visible = true;
            pa2.Visible = false;
            pa1_pa2 = 1;
        }

        private void rb2_CheckedChanged(object sender, EventArgs e)
        {
            pa1.Visible = false;
            pa2.Visible = true;
            pa1_pa2 = 2;
        }

        private void btnTinhtoan_Click(object sender, EventArgs e)
        {
            if (pa1_pa2 == 1)
            {
                double B0 = double.Parse(txtB0.Text);
                double Del0 = double.Parse(txtDel0.Text);
                double Miu = double.Parse(txtMiu.Text);
                double Del_Del0;
```

```

double Del;
double Eps1;
double Sigtb;
double Eta;
double p;
if (MN_QT==0)
{
    Del_Del0 = 0.84564 * (0.68406 * Miu + 0.79233) * Math.Pow(1000 *
Del0 / B0, -0.83249);
    Del = Del0 * Del_Del0;
    Eps1 = -21.52669 * B0 / 1000 + 94.59875;
    Sigtb = 11.87504 * (-0.63122 * Miu + 42.65182) * Math.Pow(Eps1,
0.05689);
    Eta = 0.07783 * (0.0692 * Miu + 0.0169) * Math.Pow(Eps1, -
2.48165);
    p = 2.849 * (0.30406 * Miu + 3.03938) * (2.13434 * Eps1 + 0.04783);
}
else
{
    Del_Del0 = 0.83623 * (0.57145 * Miu + 0.7906) * Math.Pow(1000 *
Del0 / B0, -1.14359);
    Del = Del0 * Del_Del0;
    Eps1 = -21.8193 * B0 / 1000 + 95.87457;
    Sigtb = 13.4568 * (-0.51298 * Miu + 37.62442) * Math.Pow(Eps1,
0.05402);
    Eta = 0.06131 * (0.0158 * Miu + 0.01882) * Math.Pow(Eps1, -
1.3451);
    p = 2.849 * (0.25908 * Miu + 2.84914) * (2.27735 * Eps1 + 0.04884);
}
txtDel.Text = Math.Round(Del, 1).ToString();
txtEps1.Text = Math.Round(Eps1, 3).ToString();
txtSigtb.Text = Math.Round(Sigtb, 2).ToString();
txtEta.Text = Math.Round(Eta, 4).ToString();
txtP.Text = Math.Round(p, 3).ToString();
}
else
{
    double Sig02 = double.Parse(txtSig02.Text);
    double E = double.Parse(txtE.Text);
    double Eps2 = -0.10285 * Sig02 / E + 0.97991;
    double LamdaD = -0.10016 * Sig02 / E + 0.000133539;
    double Dn = 1424 * (1 + LamdaD / 100);
    txtEps2.Text = Math.Round(Eps2, 3).ToString();
    txtLamdaD.Text = Math.Round(LamdaD, 4).ToString();
}
}

```

```

        txtDn.Text = Math.Round(Dn, 3).ToString();
    }
}

private void cboLuachon_SelectedIndexChanged(object sender, EventArgs e)
{
    MN_QT = cboLuachon.SelectedIndex;
}

private void btnThoat_Click(object sender, EventArgs e)
{
    this.Close();
}
}
}
}

```

Другие коды для обработки массивов экспериментальных данных и для расширения функционала программного комплекса QForm можно посмотреть на <https://github.com/DCUONG-MISiS/Expansion-LDP-1420x21.6mm>



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и инновациям
НИТУ «МИСиС»

М. Р. Филонов

« » _____ 2021 г.

АКТ

О результатах практического использования материалов кандидатской диссертации аспиранта кафедры ОМД Нгуен Зуй Кыонг в учебном процессе и научно-исследовательской работе студентов кафедры

Мы, нижеподписавшиеся, с одной стороны к.т.н., доц. Ефремов Д.Б., аспирант Нгуен З.К., именуемые в дальнейшем «Разработчик», с другой стороны, заведующий кафедрой ОМД НИТУ «МИСиС» к.т.н., доц. А.С. Алешенко, и ученый секретарь кафедры ОМД ст. преп. Полякова К.А., именуемые в дальнейшем «Пользователи», составили настоящий АКТ об использовании материалов кандидатской диссертации аспиранта кафедры ОМД Нгуен З.К. по теме: «Моделирование и оптимизация процесса экспандирования при производстве труб большого диаметра» в учебном процессе и научно-исследовательских работах студентов кафедры.

Разработчики и пользователи отмечают:

Результаты работы использованы в 2017-2021 учебном процессе на кафедре ОМД при выполнении студентами 5-ти дипломных, и 9-ти курсовых научно-исследовательских работ, а также при чтении курсов лекций по теории ОМД, и технологии производства сварных труб большого диаметра.

Разработчики безвозмездно передают, а Пользователи принимают для использования в учебном процессе и научно-исследовательской работе следующие материалы, действующую модель экспандера и программные продукты:

1. Математическая модель в виде системы уравнений, позволяющая прогнозировать распределение параметров геометрии и напряженно-деформированного состояния металла применительно к условиям процесса экспандирования при производстве магистральных труб большого диаметра;

2. Физическую модель экспандера для лабораторных исследований деформационного состояния металла при калибровке внутренним давлением.

3. Подпрограммы на языке LUA в вычислительной среде QForm-VX8 для расчёта и отображения изменения внешнего контура трубы, полей остаточных напряжений, деформаций и других параметров процесса экспандирования.

4. Программа на языке C# для проведения занятий с аспирантами НИТУ МИСИС, обучения персонала кафедры ОМД методам оптимизации процессов пластической деформации.

От Разработчиков

Научный руководитель к. т. н. доц.

..... Ефремов Д.Б.
Исполнитель, аспирант.

..... Нгуен З.К.

От Пользователей

Заведующий кафедрой ОМД к. т. н. доц.

..... А.С. Алешенко.