

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
( НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ )

На правах рукописи



Залавин Яков Евгеньевич

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВАЛЬЦЕВОЙ  
ФОРМОВКИ С ЦЕЛЬЮ ПОЛУЧЕНИЯ ТРУБНОЙ ЗАГОТОВКИ С  
ПОВЫШЕННОЙ ОДНОРОДНОСТЬЮ НАПРЯЖЕННО-  
ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Специальность 2.6.4 – Обработка металлов давлением

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
Доктор технических наук, профессор  
Выдрин А.В.

Челябинск 2022

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПРОБЛЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА .....	10
1.1 Современные требования к эксплуатационным характеристикам электросварных труб большого диаметра .....	10
1.2 Аналитический обзор современных технологий изготовления трубного штрипса и труб большого диаметра.....	13
1.3 Сравнительный анализ различных технологий формовки трубной заготовки .....	18
1.4 Алгоритм формирования характеристик качества продукции и роль технологии изготовления труб в обеспечении заданных характеристик....	21
1.5 Актуальные вопросы вальцевой формовки.....	23
1.6 Выводы и постановка задачи исследования.....	26
2 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗГИБА ЛИСТА В ТРЕХВАЛКОВЫХ ВАЛЬЦАХ.....	28
2.1 Анализ неравномерности деформации заготовки в поперечном сечении .....	28
2.2 Концептуальная модель процесса формовки.....	37
2.3 Определение параметров формоизменения заготовки при перемещении верхнего вала .....	40
2.4 Определение параметров формоизменения заготовки при вращении валков .....	46
2.5 Определение энергосиловых параметров формовки при одновременном перемещении верхнего вала и вращении валков .....	52
2.6. Определение прогиба верхнего вала.....	57
2.7 Численное исследование математической модели.....	60
2.7.1 Сравнительный анализ параметров формоизменения заготовки	60
2.7.2 Влияние радиуса формуемой заготовки на усилие формовки....	62
2.7.3 Влияние усилия противоизгиба на прогиб вала .....	63

2.8	Разработка программы для расчета технологических и энергосиловых параметров трехвалковых листогибочных машин .....	64
2.9	Выводы по главе 2.....	66
3	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМОВКИ В ВАЛЬЦАХ.....	67
3.1	Экспериментальное определение коэффициента трения в условиях вальцевой формовки .....	67
3.1.1	Устройство для создания тормозных сил и контрольно-измерительные средства.....	68
3.1.2	Программа эксперимента и материалы .....	70
3.1.3	Методика проведения эксперимента .....	71
3.1.4	Анализ результатов эксперимента .....	72
3.2	Экспериментальное определение остаточных напряжений в трубной заготовке после вальцевой формовки .....	75
3.2.1	Остаточные напряжения, снимаемые при отрезки кольца.....	79
3.2.2	Остаточные напряжения, снимаемые при удалении слоев .....	81
3.2.3	Травильная установка и режимы травления .....	84
3.2.4	Обработка и анализ результатов эксперимента.....	86
3.3	Экспериментальное исследование прогиба нажимного валка в процессе формовки в вальцах .....	92
3.3.1	Обоснование измерения прогиба методами фотограмметрии....	93
3.3.2	Средства измерения.....	95
3.3.3	Методика проведения эксперимента .....	96
3.3.4	Анализ результатов эксперимента .....	100
3.4	Выводы по главе 3.....	103
4	РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИХ ПРЕДЛОЖЕНИЙ И ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОЕ АПРОБИРОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ .....	104
4.1	Разработка концепции автоматического регулирования прогибом ....	104

4.2 Конечно-элементное моделирование разработанной технологии формовки.....	105
4.3 Разработка режимов формовки труб.....	112
4.4 Промышленное апробирование результатов исследования.....	114
4.5 Выводы по главе 4.....	117
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	118
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	119
ПРИЛОЖЕНИЕ А (Обязательное) Акт внедрения результатов диссертационного исследования .....	131
ПРИЛОЖЕНИЕ Б (Обязательное) Свидетельство регистрации программы для ЭВМ .....	132

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность.** На сегодняшний день отечественные производители сварных труб большого диаметра (ТБД) предназначенных для транспортировки углеводородов располагают производственными мощностями, готовыми удовлетворить спрос рынка в объеме около 4,5 млн.т/год, тогда как реальный спрос находится на уровне 1,7...3,0 млн.т/год.

При таких обстоятельствах позиция производителей на рынке определяется наличием конкурентных преимуществ, в числе основных из которых следует отметить цену и характеристики качества продукции.

Кроме этого, в связи с постоянно растущим проектным давлением перекачивания углеводородов в магистральных газопроводах, а также со спецификой условий прокладки газопроводов возрастают и требования к характеристикам труб.

Производственные линии по изготовлению труб большого диаметра принципиально отличаются друг от друга только технологиями формовки основного периметра и догибки кромок. К ним, в частности, относятся технологии TRB, UO, JO.

Технология формовки листа в вальцах (TRB) с последующей догибкой кромок имеет ряд преимуществ по сравнению с технологиями шаговой (JO) и UO формовкой. К ним, в частности, относятся: большая монотонность основного профиля поперечного сечения заготовки и энергоэффективность процесса формовки, как составная часть себестоимости продукции.

К недостаткам технологии TRB следует отнести неравномерность деформации трубной заготовки после вальцевой формовки на переходе плоского участка в основной периметр.

Эти обстоятельства подтверждают актуальность задачи достижения повышенных качественных характеристик труб с применением формовки TRB.

**Степень разработанности проблемы.** Получение деталей и изделий методом гибки листа в вальцах применяется во многих областях техники: авиастроение, судостроение, машиностроение, трубопроводный транспорт и др.

Процессу формовки листа в вальцах посвящены работы А.И.Целикова, Ю.М. Матвеева, Е.Н.Мошнина, М.Н. Лысова. В этих работах, как правило, рассматриваются вопросы определения остаточной кривизны основного периметра заготовки после изгиба и расчет энергосиловых параметров процесса, поскольку данные вопросы представляют наибольшую значимость для практики.

В указанных работах рассматривается процесс формовки на этапе вращения валков и приводятся зависимости для нахождения кривизны заготовки при этих условиях. При этом, в указанных работах не рассматривается этап перемещения верхнего валка, в котором форма очага деформации отличается от формы при вращении валков, а значит известные зависимости становятся непригодными для расчета кривизны на этапе перемещения верхнего валка.

Поскольку работа деформации заготовки при формовке осуществляется силами трения, то вопрос ресурса этих сил приобретает особую значимость. Исследования в этой области отражены в работах И.В.Крагельского, Б.В.Дерягина, П.А.Ребиндера, Ф.П.Боудена, Д.Тейбора, П.Бриджмена, А.П.Грудева, А.К.Чертавских, В.К.Белосевича, И.М.Павлова, Э.Зибеля, Т.Кармана и др.

Авторами достаточно подробно изучены условия машинного трения, когда усредненные контактные давления существенно меньше предела текучести наименее прочного материала в паре трения, контактные поверхности чисто обработаны и относительное перемещение происходит в присутствии смазки.

Также, большое количество работ посвящено трению в процессах обработки металла давлением, когда контактные давления превышают предел текучести материала деформируемой заготовки, заготовка покрыта слоем

окалины – в случае горячей прокатки, либо слоем технологической смазки – при холодной прокатке или прессовании.

В процессах обработки металла давлением, а также в условиях машинного трения, не встречается ситуаций подобных контактно-взаимодействию инструмента и заготовки при вальцевой формовке, когда удельные давления в паре трения не превышают предела текучести деформируемого материала, одна из поверхностей которого покрыта слоем вторичной окалины после горячей прокатки, а другая имеет чистовую обработку и высокую твердость.

**Целью работы** является повышение однородности напряженно-деформированного состояния трубной заготовки в процессе вальцевой формовки.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи исследования:**

1. разработать математическую модель процесса формовки в трехвалковой листогибочной машине (ЛГМ), позволяющую с достаточной для инженерной практики точностью определять радиус заготовки на выходе из очага деформации в зависимости от взаимного расположения валков;
2. разработать режимы формовки листа в ЛГМ, обеспечивающие равномерность деформаций при переходе от плоских участков к основному периметру;
3. определить коэффициент трения, соответствующий условиям контактного взаимодействия инструмента и заготовки при формовке листа в вальцах.

#### **Научная новизна работы**

1. Разработана оригинальная математическая модель расчета параметров настройки и энергосиловых параметров процесса формовки листа в трехвалковых листогибочных машинах.
2. Разработана оригинальная математическая модель расчета профиля нижней образующей верхнего валка трехвалковых листогибочных машин оснащенных системой противоизгиба.

3. Экспериментальным путем определен коэффициент трения в условиях, идентичных условиям контактного взаимодействия заготовки и инструмента при вальцевой формовке.

**Теоретическая и практическая значимость.** Разработанные математические модели позволяют не прибегая к использованию сложного математического аппарата с удовлетворительной для инженерной практики точностью рассчитывать формоизменение трубной заготовки при соответствующих технологических операциях.

Реализованные в разработанном программном продукте математические модели позволяют в производственной среде в оперативном режиме производить инженерные расчеты формоизменения заготовки с целью настройки соответствующих агрегатов на производство трубных заготовок с заданными параметрами. Разработанный программный продукт используется технологами АО «ВТЗ» в повседневной работе.

Получены достоверные данные о коэффициенте трения в условиях вальцевой формовки. Определен ресурс фрикционных сил на границе «инструмент-заготовка» и нагрузочные возможности привода вращения валков листогибочной машины АО «ВТЗ».

**Методология и методы исследования.** В работе применялись классические методы теории малых упруго-пластических деформаций и аналитической геометрии на плоскости.

Расчетные методики разработаны на основе энергетической теории обработки металла давлением.

В экспериментальных исследованиях контактного взаимодействия инструмента и заготовки использован метод определения коэффициента трения путем принудительного торможения полосы в валках с применением поверенных и современных средств измерения.



Математическое моделирование технологических процессов проводилось в программных продуктах конечно-элементного моделирования «MSC.Marc» и «Deform 3D».

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Математическая модель процесса формоизменения заготовки в трехвалковых листогибочных машинах.
2. Результаты экспериментального определения коэффициента трения для условий вальцевой формовки труб большого диаметра.
3. Технология вальцевой формовки, обеспечивающая повышенную равномерность напряженно-деформированного состояния трубной заготовки.

**Публикации по теме диссертации.** Основное содержание диссертации опубликовано 12-и печатных работах, из них 6 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, изложена на 131-й странице машинописного текста, включающего 55 рисунков, 14 таблицы, список использованных источников из 103-х наименований отечественных и зарубежных авторов, 2-х приложений.

# **1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПРОБЛЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА**

## **1.1 Современные требования к эксплуатационным характеристикам электросварных труб большого диаметра**

Термин «эксплуатационная надежность» в технической литературе [1-3] понимается, как свойство объекта сохранять во времени и в установленных пределах значения параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и в установленных условиях эксплуатации.

Основной функцией магистрального трубопровода является способность выдерживать значительные внутренние давления транспортируемых углеводородов.

Основными факторами влияющими на эксплуатационную надежность магистрального трубопровода являются способ и качество монтажа трубопровода и эксплуатационные характеристики используемых труб.

Современный рынок электросварных труб для магистральных продуктопроводов предъявляет жесткие требования к эксплуатационным характеристикам труб. Это связано со спецификой расположения промыслов, а значит и трубопроводов, в сложных климатических условиях на территории России [4]. Укладка трубопроводов в районах с высокой сейсмической активностью усложняет условия эксплуатации и накладывает дополнительные требования надежности, применительно к этим условиям [5].

Перспектива расширения районов добычи на шельфе требует учета дополнительных негативных факторов в виде коррозионно-агрессивной внешней среды, циклических воздействий на морские участки продуктопроводов, специфики постели для укладки, которую нельзя приготовить так, как это делается на сухопутных участках.

Трубы для магистральных газопроводов можно разделить на несколько групп, таких как:

- трубы общего назначения;
- трубы в хладостойком исполнении для укладки в районах крайнего Севера, где преобладают низкие температуры (проект «Бованенково-Ухта»);
- трубы морского назначения для укладки по дну морей (проекты «Северный поток», «Северный поток 2», «Турецкий поток»);
- трубы с повышенной деформационной способностью для районов с высокой сейсмичностью (проект «Сила Сибири»);
- трубы из коррозионностойких сталей предназначенных для транспортировки нефтепродуктов.

В зарубежных странах расчет трубопроводов и определение параметров труб выполняются по единым методикам, единым нормативными материалам таких как DNV, API 5L, ISO 3183-3, EN 10208-3.

В России на каждый крупный трубопроводный проект составляются специальные технические условия, в которых, наряду со стандартными, общепринятыми зарубежными нормами содержатся дополнительные требования к трубам, учитывающие географические и климатические условия прохождения трубопровода [6,7].

На сегодняшний день для строительства газопроводов, в том числе с морскими переходами, в большей мере применяются трубы из стали группы прочности X65–X70, значения предела текучести которых находятся в диапазоне 450-570 (X65), 485-605 (X70) МПа, а временного сопротивления в диапазоне 535-760(X65), 570-760 (X70) МПа .

Трубы из стали более высокой группы прочности X80 имеют предел текучести не менее 555 МПа, а временное сопротивление не менее 625 МПа. В настоящее время трубы из стали группы прочности X80 применяются только для наземных участков газопроводов [9,10].

Кроме прочностных характеристик регламентируется значение ударной вязкости для основного металла и сварного соединения, отношение предела текучести к временному сопротивлению и относительное удлинение [11].

Рабочее давление наземных магистральных газопроводов находится в диапазоне 9,8-11,8 МПа. Для морских газопроводов рабочее давление составляет 17-28 МПа.

С целью противодействия коррозии, трубы для магистральных газопроводов производят с наружным трехслойным полиэтиленовым покрытием и гладким эпоксидным внутренним покрытием.

Точность геометрических размеров труб определяет качество сварного стыка при монтаже трубопровода [1,12]. Различия по наружному диаметру, толщине стенки и овальность труб приводят к смещению кромок при сварке кольцевых швов.

Предельное отклонение по наружному диаметру находится в диапазоне от 1,5 до 2,0 мм. Общая кривизна труб должна быть не более 0,1-0,15% длины трубы. Толщина стенки трубы должна находиться в диапазоне от -1,0 до +1,5 мм.

Требования к овальности концевых участков труб используемых в строительстве трубопроводов с морскими переходами значительно выше, чем для наземных трубопроводов. Например, для проектов «Nord Stream» и «Nord Stream 2» овальность по концам труб не должна превышать 5 мм, при этом для 50% партии овальность по концам труб не должна превышать 3 мм. Для наземного проекта «Баваненково – Ухта» овальность по концам труб не должна превышать 12 мм.

В работе [13] показано, что смещение труб при сварке кольцевых швов приводит к уменьшению поперечного сечения трубопровода в местах стыка труб, которое вызывает дополнительную турбулентность потока жидкости или газа, концентрацию напряжений и колебание давления в трубопроводе. Уменьшение поперечного сечения в области стыка, как правило, достаточно

мало, но если учесть общее количество таких дефектов в трубопроводе, то вероятность разрушения трубопровода значительно возрастает.

Жесткие требования к трубам морского назначения связаны, в первую очередь, с более сложной технологией укладки трубопровода, которая требует высокопроизводительную непрерывную сварку поперечных швов в условиях судна трубоукладчика [14].

Для трубопроводов проходящих через зоны с высокой сейсмической активностью, применяют трубы с повышенной деформационной способностью [15,16]. Такие трубы отличаются низким отношением предела текучести к временному сопротивлению и отсутствием площадки текучести на диаграмме растяжения. Требуемых механических свойств при этом достигают за счет применения специального химического состава стали и ее структуры после прокатного передела.

Таким образом, можно определить, что требования к эксплуатационным характеристикам труб большого диаметра находятся в достаточно широком диапазоне, что объясняется разнообразием условий эксплуатации магистральных трубопроводов.

## **1.2 Аналитический обзор современных технологий изготовления трубного штрипса и труб большого диаметра**

В качестве исходной заготовки для производства труб большого диаметра применяют листовой прокат, полученный способом контролируемой прокатки, как правило на толстолистовых станах, типа «5000».

Контролируемая прокатка представляет собой высокотемпературную обработку низкоуглеродистой низколигированной стали, характеризующуюся регламентированными, в зависимости от химического состава, условиями нагрева, температурными и деформационными параметрами процесса и режимами охлаждения [17,18]. В результате такой обработки прокат получает

мелкозернистую структуру, которая обеспечивает требуемые прочностные и вязкостные свойства проката.

В России толстолистовые станы «5000» находятся на предприятиях Ижорского трубного завода, Выксунского металлургического завода и Магнитогорского металлургического комбината.

Листы после прокатки поставляются толщиной от 8,0 до 42,0 мм, длиной 11000-12500 мм, ширина листов 1480-4392 мм.

Предельные отклонения параметров листов оговариваются в технических условиях (ТУ) на листовой прокат, к которым относятся:

- разнотолщинность в пределах одного листа не должна превышать 0,9 мм;
- предельные отклонения по ширине листа не должны превышать +10/-0 мм;
- предельные отклонения по длине листов принимают по ГОСТ 19903;
- отклонение от плоскостности на 1 м длины не должно превышать 6 мм;
- серповидность листов не должна превышать 1 мм на 1 м длины, но не более 10 мм на всю длину листа и не должна выводить лист за номинальные размеры по ширине.

Расположение оборудования технологической линии позволяет производить прокат по следующим режимам: контролируемая прокатка, обычная прокатка с последующей нормализацией, закалка с прокатного нагрева, замедленное охлаждение проката в стопах, обычная прокатка с последующей закалкой и отпуском вне потока [19].

Главным звеном технологической линии стана «5000» является реверсивная клеть кварто, содержащая два рабочих и два опорных валка, установленных в одной плоскости.

С целью снижения неплоскостности листа и разнотолщинности по ширине полосы в прокатных клетях применяются системы противоизгиба, осевой сдвижки, тепловой профилировки рабочих валков, а также рабочие валки с изменяющейся бочкообразностью [20-22].

Однако, имеющиеся системы не в полной мере обеспечивают равномерность вытяжки по ширине полосы, что приводит к дефекту волна по кромке [23],[24].

С целью устранения этого дефекта штрипс после прокатки, либо после ускоренного охлаждения, подвергается горячей правке, а затем, после полного охлаждения, холодной правке.

В процессе правки волны по кромке происходит удлинение средней по ширине части полосы, в результате чего волнообразные дефекты прикромочных участков расправляются.

Термоупрочненный прокат обладает неравномерностью механических свойств по толщине листа. Это связано, прежде всего, с неравномерной теплопередачей в поперечном сечении листа в процессе ускоренного охлаждения, которая убывает от поверхности к центру.

Таким образом, в трубный передел поступает предварительно напряженная заготовка, в которой напряженное состояние в прикромочных участках заготовки отличается от напряженного состояния в середине.

В мировой практике для строительства современных магистральных газопроводов используются трубы спиральношовные и прямошовные с одним продольным швом. В теплоэнергетическом комплексе наряду с одношовными трубами допускается применение труб с двумя продольными швами [25].

Спиральношовные трубы наибольшее применение получили зарубежом. Единственная в России линия по производству спиральношовных труб большого диаметра находится на Волжском трубном заводе.

Технология производства спиральношовных труб имеет ряд преимуществ по сравнению с прямошовными трубами [26],[27]:

- высокая скорость формовки благодаря скоростной технологической сварке (до 12 м/мин);
- возможность получения продукции неограниченной длины и диаметра из листа одной ширины;
- не требует калибровочных операций;
- после термообработки по режиму закалка с последующим отпуском микроструктура металла приобретает однородное строение по всему телу трубы, минимизируются остаточные напряжения.

К недостаткам следует отнести:

- большая протяженность сварных швов;
- ограничение по толщине стенки (до 25 мм) из-за возникновения больших усилий формовки.

В нашей стране для строительства магистральных трубопроводов в основном применяются прямошовные трубы большого диаметра класса прочности до X65-X70.

Производственные мощности по производству прямошовных труб расположены на Выксунском металлургическом заводе, Челябинском трубопрокатном заводе, Ижорском трубном заводе, Волжском трубном заводе и Загорском трубном заводе.

К преимуществам технологии производства прямошовных труб следует отнести:

- возможность получения труб с толщиной стенки до 50 мм;
- малую протяженность сварных швов.

Недостатки технологии производства прямошовных труб заключаются в:

- ограниченной длине трубы: 12 метров при использовании вальцевой формовки и до 18 метров для прессовой формовки ;
- необходимости проведения калибровочных процедур после формовки и сварки трубной заготовки;



– неоднородном напряженно-деформированном состоянии труб.

В производстве прямошовных труб для получения готового изделия применяется до 80 технологических операций различного вида, в которые входят операции подготовки листа, его формовки, сварки, и последующей отделки.

Современная линия производства прямошовных труб включает в себя следующие основные технологические операции: ультразвуковой входной контроль листа; зачистка поверхности листа; фрезерование кромок; подгибка кромок; формовка основного периметра сборка с наложением технологического шва; сварка внутреннего и наружного швов; ультразвуковой контроль сварного соединения; экспандирование; фрезерование торцов; гидроиспытания; нанесение внутреннего и наружного покрытий;

В зависимости от способа формовки основного периметра последовательность подгибки кромок и формовки основного периметра может изменяться.

Перспективным направлением развития производства труб большого диаметра является повышение класса прочности труб до X100 и X120, что способствует снижению металлоемкости и повышению рабочего давления магистральных газопроводов. Известны способы получения стального проката и труб с данными прочностными свойствами [28-32], однако применение их на практике находится в начальной стадии [33].

Также перспективным направлением развития технологии является обеспечение высоких вязкостных свойств сварного соединения за счет освоения новых видов сварки, в частности гибридной лазерной сварки [34]. Преимуществами гибридной лазерной сварки является низкое тепловложение, за счет которого минимизируется рост зерна основного металла и обеспечиваются высокие прочностные показатели.

При очевидных достоинствах лазерной сварки в части обеспечения высокой прочности сварного соединения возникают дополнительные

требования к геометрии трубной заготовки перед сваркой – требуется более точная формовка трубной заготовки, качественная фрезеровка кромок и плотное прижатие кромок в процессе сборки.

### **1.3 Сравнительный анализ различных технологий формовки трубной заготовки**

Технологии изготовления прямошовных труб большого диаметра, в первую очередь, классифицируют по способу формирования основного периметра заготовки, поскольку во всех производственных линиях применяется многодуговая сварка под слоем флюса. Известны три основных способа получения основного периметра заготовки [35,36]:

- формовка на «U» и «O» образных гибочных прессах (UO).
- шаговая формовка на прессе (JO);
- вальцевая формовка в трехвалковой машине (TRB);

Технологические линии с UO формовкой применяются на Челябинском Трубопрокатном заводе и Выксунском металлургическом заводе. Технологические линии с JO формовкой находят применение на Челябинском Трубопрокатном заводе, Выксунском металлургическом заводе, Ижорском трубном заводе, Лискинском заводе монтажных заготовок. Технологические линии с TRB формовкой установлены на Волжском трубном заводе и Загорском трубном заводе.

От способа формовки зависит последовательность операции подгибки кромок. При формовке способами UO и JO подгибка кромок производится перед формовкой основного периметра. При способе TRB подгибка кромок осуществляется в двухвалковой клети подгибки кромок после формовки основного периметра заготовки.

Технология формовки с использованием «U» и «O» образных гибочных прессов широко известна и позволяет добиваться весьма высокой производительности до 15 труб/час [37].

Технология УО формовки включает в себя операции фрезерования кромок, подгибку прикромочных участков на прессе, формовку основного периметра трубы в прессе предварительной формовки, формовку основного периметра трубы на прессе окончательной формовки, сборку сформованной трубной заготовки с наложением технологического шва, сварку основных швов и экспандирование [38].

Эффективность применения процесса УО формовки зависит главным образом от объема заказываемых партий и тоннажа, т.к процесс смены инструмента при переходе на новый сортамент весьма трудоемок.

Прессовая (шаговая) формовка (JCO) с предварительной, также прессовой, подгибкой прикромочных участков основана на трехточечном изгибе штрипса пуансоном с пошаговой подачей заготовки после каждого рабочего хода [39].

Процесс JCO включает операции фрезерования кромок, подгибки кромок на прессе, формовку основного периметра на прессе шаговой формовки, сборку сформованной заготовки с наложением технологического шва, сварку основных швов и экспандирование.

К достоинствам этой технологии следует отнести возможность формовки заготовки для труб с большим отношением толщины стенки к радиусу заготовки, а также возможность изготовления длинномерных труб (до 18-и м).

Основные недостатки прессовой формовки – большая металлоемкость и высокая цена прессового оборудования, высокая стоимость инструментального обеспечения и относительно невысокая, за счет увеличения числа шагов формовки, производительность при производстве толстостенных труб.

В работах [40-43] достаточно подробно освещены проблемы формоизменения заготовки связанные с гофрообразованием при подгибке кромок и огранки заготовки в процессе шаговой формовки. Разработаны

методики расчета настройки прессового оборудования для производства трубной заготовки с заданными геометрическими характеристиками.

Технологические линии с использованием УО и ЮО процессов позволяют производить трубы диаметром от 508 до 1420 мм и толщиной стенки от 8 до 45 мм. При этом ЮО процесс имеет на одну единицу прессового оборудования меньше, что сокращает парк формующего инструмента и делает процесс ЮО более гибким к переходам на новый типоразмер труб.

Формовка заготовки прямошовной трубы в вальцах (TRB) с последующей догибкой прикромочных участков в калиброванных валках [44] основана, также, на трехточечном изгибе, однако, в отличие от формовки на прессе изгиб заготовки происходит непрерывно, а подача заготовки в очаг деформации осуществляется силами трения.

Процесс TRB включает операции фрезерования кромок, формовку основного периметра в трехвалковой листогибочной машине, догибку кромок в двухвалковой клети с профилированными валками, сборку сформованной заготовки с наложением технологического шва, сварку основных швов и экспандирование.

Поскольку процедура подачи заготовки в листогибочной машине реализуется рабочим инструментом, конструкция листогибочной машины проще, имеет меньшую металлоемкость, что снижает себестоимость продукции произведенной данным способом.

Формовку труб диаметром от 508 до 762 мм осуществляют при помощи вспомогательного портала, который содержит несколько пар роликов, на которые опирается верхний рабочий валок, что существенно компенсирует прогиб валков при формовке данных типоразмеров труб.

Формовку труб диаметром от 762 до 1420 мм осуществляют валками не имеющими дополнительных опор между нажимными цилиндрами. Для компенсации прогиба безопорных валков применяют цилиндры противоизгиба, которые установлены по концам валка.

Основные недостатки процесса формовки в вальцах состоят в ограничении по усилию формовки при использовании безопорных нажимных валков из-за прогиба на пролете между нажимными устройствами. При использовании многоопорного верхнего вала ограничения связаны с максимальным значением крутящего момента, который может быть приложен к валку с учетом его прочностных возможностей и ресурса фрикционных сил на контакте с заготовкой.

#### **1.4 Алгоритм формирования характеристик качества продукции и роль технологии изготовления труб в обеспечении заданных характеристик**

Процессу изготовления труб большого диаметра предшествуют сталеплавильный и прокатный переделы, которые оказывают непосредственное влияние на эксплуатационные характеристики ТБД.

Основной задачей сталеплавильного передела является получение стали с определенным химическим составом, который регламентирован в технических требованиях на трубы.

Для изготовления труб большого диаметра применяют легированные низкоуглеродистые стали [45],[46]. Ограничение по углеродному эквиваленту позволяет получить высокие вязкостные свойства, в том числе и в области низких температур. Легирование молибденом и марганцем способствует образованию бейнита. Микролегирование ниобием обеспечивает возможность получения мелкодисперсной структуры в прокатном переделе.

В прокатном переделе на этапах непрерывной разливки и прокатки формируются микроструктура и прочностные характеристики готовой продукции, а также геометрические параметры.

В процессе непрерывной разливки для трубного производства получают, как правило, слябы толщиной до 350 мм, шириной до 2500 мм и длиной до 5000 мм [47], [48]. При этом должны быть минимизированы такие дефекты, как: ромбичность, выпуклость (вогнутость) граней, кривизна,

серповидность, скручивание. Также, должны быть исключены дефекты поверхности: трещины (угловые, ребровые, продольные, поперечные, паукообразные), глубокие следы движение кристаллизатора, шлаковые включения.

Характеристики качества труб большого диаметра во многом определяются качеством поставляемой листовой заготовки.

В трубном переделе решаются две основные задачи – обеспечение заданных прочностных характеристик изделия по всему периметру и обеспечение геометрических характеристик периметра трубы, прямолинейность образующих и геометрии сварного шва (ширина, высота усиления, отсутствие подрезов и др.). Все эти характеристики определены соответствующими регламентами, в зависимости от назначения продукции.

Известно, что прочностные свойства трубы после трубного передела отличаются от прочностных свойств исходного штрипса. В работах [49-54] проведены исследования влияния трубного передела на величину предела текучести, временное сопротивление, ударную вязкость и относительное удлинение. Также изучался вопрос влияния способа формовки на изменения механических характеристик труб [51].

Результаты исследований показывают, что трубный передел снижает ресурс пластичности и относительное удлинение, увеличивает прочность и склонность стали к деформационному старению.

Влияние трубного передела на предел текучести не так однозначно. Например, в работах [49,50] показано, что предел текучести может, как увеличиваться, так и уменьшаться. Неопределенность в результатах может быть вызвана спецификой испытания, когда темплет сначала разгибают, а затем изготавливают образец, что способствует проявлению эффекта Баушингера, соотношением диаметра к толщине стенки  $D/s$ , которое определяет долю пластической деформации в стенке трубы, и места вырезки

образцов, поскольку эффект Баушингера возникает в локальных областях трубы [52] при формовке, догибки кромок и экспандировании.

Наличие геометрических дефектов листовой заготовки влечет в дальнейшем либо к образованию дополнительных остаточных напряжений [54-56], которые снижают эксплуатационную надежность труб [57,58], либо к остаточным дефектам геометрии, которые не устраняются при дальнейшем экспандировании и могут быть причиной отбраковки труб.

Причиной дефектов геометрии, являются нарушения технологии формовки или неоднородность свойств материала исходной заготовки.

Качество сварного соединения формируется не только непосредственно в процессе выполнения операции сварки за счет свойств сварочной проволоки, режимов сварки, характеристики флюса. На качество сварного соединения и геометрию трубы в пришовной зоне оказывают влияние ряд предшествующих технологических операций. Так, например, некачественно сформованная труба может быть причиной дефектов формы сварного шва.

В пришовной зоне исходная заготовка должна иметь в поперечном сечении геометрическую форму окружности, которая является продолжением окружности основного периметра и не имеет выраженных границ нарушения геометрической формы в зоне перехода.

### **1.5 Актуальные вопросы вальцевой формовки**

Учитывая особенности технологии вальцевой формовки предметом анализа являются: формирование геометрических характеристик трубной заготовки; энергосиловые параметры процесса; условия трения на контакте инструмента и заготовки.

Процессу формовки листа в вальцах посвящены работы Е.Н.Мошнина, М.Н. Лысова, и других [59–62]. В этих работах, как правило, рассматриваются вопросы нахождения остаточной кривизны заготовки после изгиба и расчет

энергосиловых параметров процесса, поскольку данные вопросы представляют наибольшую значимость для практики.

Однако, известные методики расчета остаточной кривизны трубной заготовки либо приводят к весьма неточным результатам [60], в силу принятых допущений при формовке в вальцах кругового изгиба, либо сводятся к системе эллиптических интегралов [61],[62], и требует громоздких математических преобразований что, усложняет их применение в инженерной практике.

Кроме этого, в литературе практически отсутствует информация о закономерностях формирования кривизны на переходном участке от кромки до начала основного периметра.

В области перехода от кромки к основному периметру по классической технологии формовки, наблюдается существенная неравномерность деформаций, что является причиной повышенной овальности готовых труб. Поэтому задача стабилизации геометрии на переходных участках приобретает весьма существенную значимость.

Усилие формовки и крутящие моменты на валках являются ограничивающими факторами при производстве труб с отношением диаметра к толщине стенки больше 35-и, поэтому для оценки возможности производства заданного типоразмера труб необходима точная методика расчета энергосиловых параметров.

В работах [59],[60] крутящий момент на валках определяется через работу пластического изгиба, которую совершают тяговые силы. Усилия на валках определяются из условия равенства изгибающих моментов от действия внутренних и внешних сил. Автором [59] отмечено, что для упрощения расчетов кривизна заготовки в очаге деформации принята постоянной.

В работе [63] представлена модель вальцевой формовки, основанная на определении момента пластического изгиба методами сопромата, и способ



определения величины распруживания. Для случая пластической деформации метод не совсем подходящий, поскольку:

- не учитывается кинематика течения металла;
- нет перехода к расчету усилия, действующего на валок.

Поскольку формовка труб в вальцах осуществляется при помощи сил трения, то особый интерес представляет расчет ресурса фрикционных сил на границе инструмент-заготовка.

Исследованиям контактного трения посвящено большое количество работ как отечественных, так и зарубежных ученых.

В работах И.В.Крагельского, Б.В.Дерягина, П.А.Ребиндера, и др. [64,65] достаточно детально исследованы случаи машинного трения, когда выполняются следующие условия:

- контактные усилия существенно меньше предела текучести наименее прочного материала в паре трения;
- контактные поверхности чисто обработаны;
- сочетание материалов трущейся пары подобрано с целью минимизации фрикционных сил;
- относительное перемещение происходит в присутствии смазки.

В работах П. Бриджмена, А.П. Грудева, А.К. Чертавских, В.К. Белосевича и др. [66],[67] исследованы условия трения в процессах обработки металлов давлением, как в горячем, так и в холодном состояниях. При этом, во всех случаях контактное давление превышает предел текучести материала деформируемой заготовки.

При деформации в горячем состоянии инструмент и заготовка разделены слоем окалины, которая находится в пластичном состоянии. Поверхность инструмента покрыта, чаще всего, сеткой разгара, в ряде случаев, например при прессовании, в зоне контакта находятся антифрикционные высокотемпературные смазки.

В практике обработки давлением, а также эксплуатации пар трения в машинах, не встречается случаев подобных по условиям контактного взаимодействию инструмента и заготовки при вальцевой формовке, когда сочетаются относительно невысокие, существенно ниже предела текучести, давления в паре трения, где одна из поверхностей покрыта слоем вторичной окалины после горячей прокатки, а вторая чисто обработана.

Поэтому для корректного расчета энергосиловых параметров процесса вальцевой формовки необходимо уточнение коэффициента трения.

### **1.6 Выводы и постановка задачи исследования**

Проведенный анализ современного состояния и проблем производства труб большого диаметра, позволяет сделать следующие выводы:

1. В настоящее время рынок труб большого диаметра развивается в условиях переизбытка производственных мощностей и относительно низкого спроса на трубы большого диаметра, что ставит производителей труб данного сегмента в условия жесткой конкуренции. Высокое рабочее давление трубопроводов, морские переходы, зоны повышенной сейсмической активности и вечной мерзлоты определяют жесткие требования к прочностным, геометрическим и эксплуатационным характеристикам труб.

2. Повышение точности труб при экспандировании обеспечивается снижением неравномерности деформации при выполнении предшествующих формообразующих операций. Повышение точности формообразующих операций является актуальной задачей не только для обеспечения требуемых геометрических характеристик труб, но и для обеспечения качества сварных швов, что особенно актуально для перспективной технологии лазерной сварки.

3. Технология вальцевой формовки, в отличие от прессовой формовки, за счет непрерывности процесса обеспечивает равномерность деформации трубной заготовки на участке основного периметра. Однако, неравномерность деформации возникает на переходе от плоских участков к

основному периметру. Также, из-за прогиба верхнего вала, возникает неравномерность деформации вдоль образующей трубной заготовки.

4. В литературных источниках вопросы формирования неравномерности деформации трубной заготовки освещены недостаточно, что не позволяет производить расчеты настроек листогибочной машины в полной мере. В существующих методиках расчета радиуса основного периметра либо приняты грубые допущения, что снижает точность результатов, либо применяется сложный математический аппарат с использованием эллиптических интегралов, что затрудняет применение методики в инженерной практике. Кроме этого, отсутствуют достоверные методики расчета энергосиловых параметров процесса формовки.

5. С литературных источников не достаточно данных о коэффициенте трения для случая вальцевой формовки, когда одна поверхность чисто обработана, а вторая покрыта слоем вторичной окалины после горячей прокатки.

С учетом вышеизложенного, установлено, что требуется решение следующих задач:

1. Разработать математическую модель формовки штрипса в трехвалковой листогибочной машине, позволяющую определять настройки машины в зависимости от заданного количества проходов и энергосиловые параметры процесса.

2. Уточнить значения коэффициента трения соответствующего условиям контактного взаимодействия инструмента и заготовки при формовке листа в вальцах.

3. Подтвердить результатами опытных работ достоверность полученных аналитических зависимостей по определению параметров формоизменения и энергосиловых параметров.

4. Разработать технологию формовки листа в вальцах, обеспечивающую равномерность деформаций на участке перехода от полки к основному периметру.

## 2 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗГИБА ЛИСТА В ТРЕХВАЛКОВЫХ ВАЛЬЦАХ

### 2.1 Анализ неравномерности деформации заготовки в поперечном сечении

Процесс формовки в вальцах можно разделить на два этапа – этап перемещения верхнего валка и этап вращения валков. На каждом этапе заготовка в очаге деформации имеет свою характерную форму.

На этапе перемещения (Рисунок 2.1, а) заготовка деформируется по схеме трехточечного изгиба за счет перемещения верхнего валка на величину  $H$ .

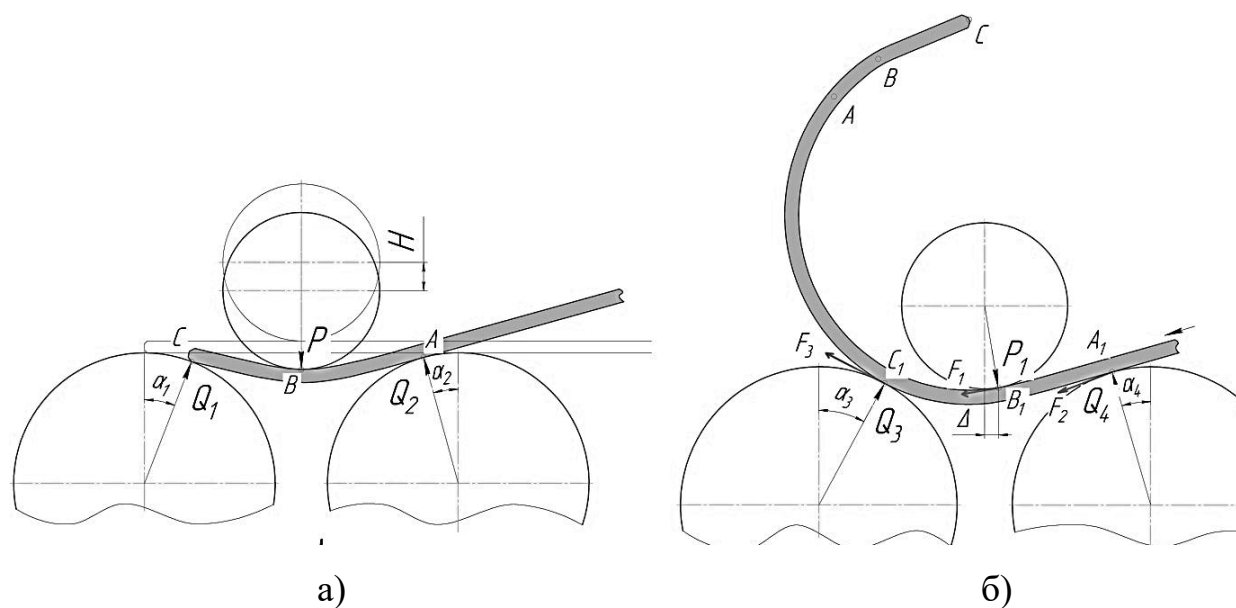


Рисунок 2.1 – Последовательность операций при формовке:

а – перемещение нажимного валка; б – формовка с вращением валков

Усилие  $P$ , которое возникает при этом, определяется настройками машины, радиусами валков, толщиной листа и его механическими характеристиками.

Реакции  $Q_1$  и  $Q_2$  со стороны опорных валков уравнивают силу  $P$  и создают симметричную силовую картину ( $Q_1 = Q_2; \alpha_1 = \alpha_2$ ), так как

вертикальная диаметральной плоскость нажимного вала является вертикальной плоскостью симметрии всей валковой системы.

Поскольку процесс формовки предполагает обязательную остаточную деформацию штрипса, на участках АВ и ВС (Рисунок 2.2) формируются две области.

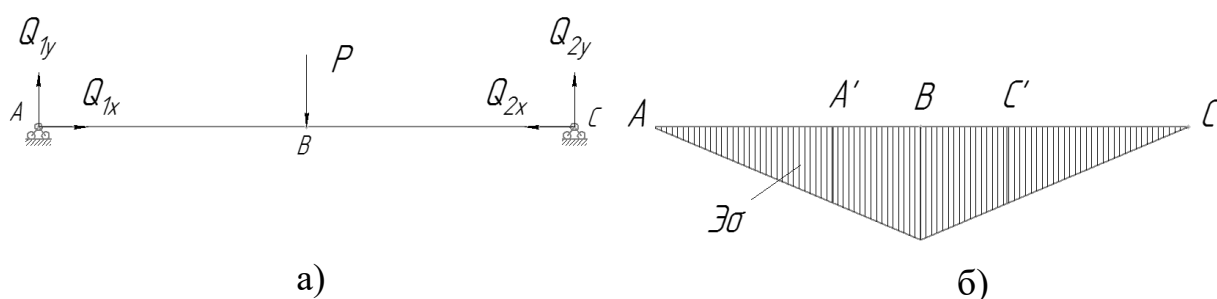


Рисунок 2.2 – Схема приложения сил (а) и характер распределения изгибающего момента (б) при погружении

На участках  $AA'$  и  $CC'$  величина изгибающего момента приводит к деформациям по толщине листа, не выходящим за пределы упругих, а на участках  $A'B$  и  $BC'$  в поверхностных слоях имеют место пластические деформации, причем их доля в общей толщине листа растет по мере удаления от точек  $A'$  и  $C'$  к середине в точке  $B$  и достигает максимального значения [68].

При включении привода вращения валков (см. Рисунок 2.1, б) происходят следующие изменения в картине силового взаимодействия и в геометрии очага деформации:

- на границе валков с заготовкой возникают активные тянущие силы трения  $F_i$ , которыми реализуется работа деформации изгиба;
- угол  $\alpha_4$  вектора реакции  $Q_4$  со стороны выходного опорного вала возрастает;
- угол  $\alpha_3$  вектора реакции  $Q_3$  со стороны входного опорного вала убывает;

– точка приложения вектора силы  $P_1$  со стороны нажимного вала смещается в сторону входного опорного вала.

Таким образом, при вращении валков, очаг деформации становится несимметричным относительно вертикальной оси симметрии верхнего вала и имеет серповидную форму.

Анализ геометрии трубной заготовки после формовки показывает, что в поперечном сечении заготовки (Рисунок 2.3) можно выделить четыре участка различной кривизны.

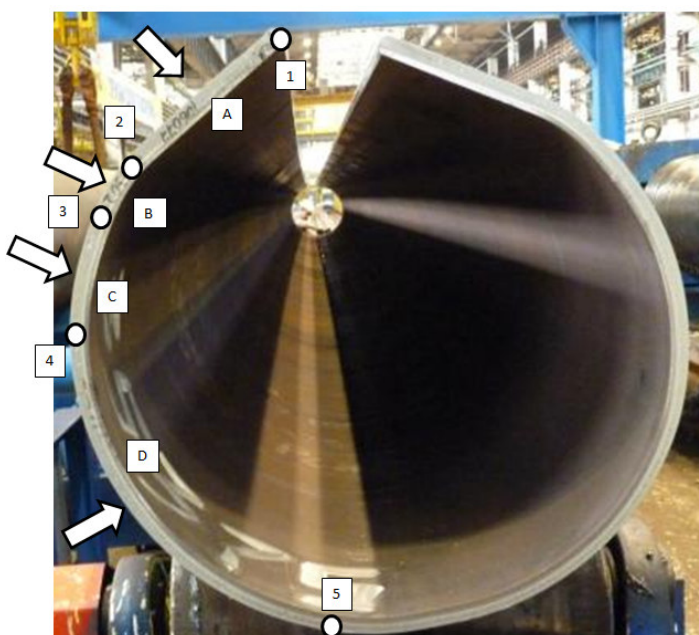


Рисунок 2.3 – Локальные участки различной кривизны по периметру заготовки после формовки.

Участок 1-2 плоский, его кривизна равна нулю. Участок 4-5 является основным периметром заготовки поскольку наиболее протяженный по сравнению с остальными участками и имеет постоянную кривизну.

Участок 2-3 представляет собой область максимальной кривизны поперечного сечения заготовки, которая формируется на этапе перемещения верхнего вала. Этот участок является дефектным, поскольку придание ему кривизны основного периметра возможно только в процессе экспандирования.

Участок 3-4 также является дефектным поскольку имеет меньшую кривизну, чем участок основного периметра 4-5.

Результаты цифрового моделирования, проведенного в программном пакете «Deform-3D» (Рисунок 2.4), также свидетельствуют о неравномерности деформаций в переходной области, где можно выделить: участок D постоянного радиуса  $R_1$ , непроформованный участок C радиуса  $R_2$  и участок B максимальной кривизны радиуса  $R_3$ . При этом соотношение радиусов рассматриваемых участков запишется неравенством:  $R_3 < R_1 < R_2$ .

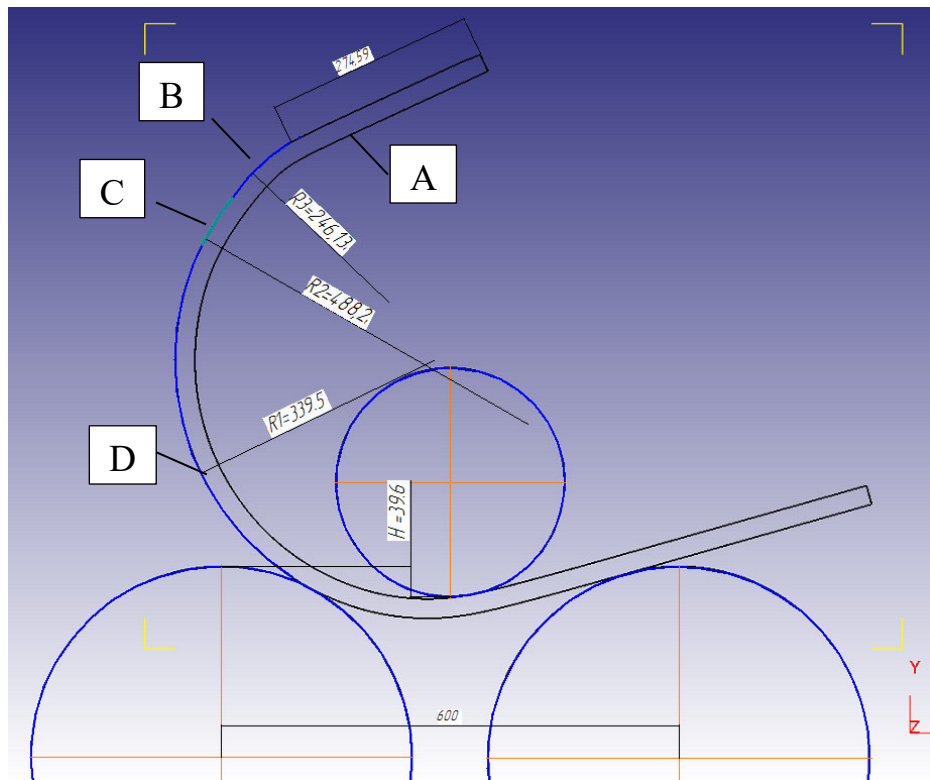


Рисунок 2.4 – Локальные участки различной кривизны на цифровой модели

Поскольку цифровая модель качественно повторяет неравномерность деформаций заготовки в процессе формовки, то на ее основе был проведен анализ изменения геометрии очага деформации в промежутке времени от начала вращения валков до выхода заготовки на стабильный радиус.

На рисунке 2.5 показана заготовка толщиной 25,4 мм при полном погружении верхнего валка диаметром 300 мм на величину  $H=65$  мм. Величина раствора нижних валков  $L$  составляет 600 мм, при этом радиус основного периметра  $R_1$  составил 339,5 мм. Очаг деформации симметричен относительно оси нажимного валка до начала вращения.

Поскольку формовка реализуется поперечной силой по схеме трехточечного изгиба, то при полном погружении нажимного вала на участках AD и CE происходит упругая деформация, а на участках DB и BE – упруго-пластическая с увеличением до максимума непосредственно под нажимным валком.

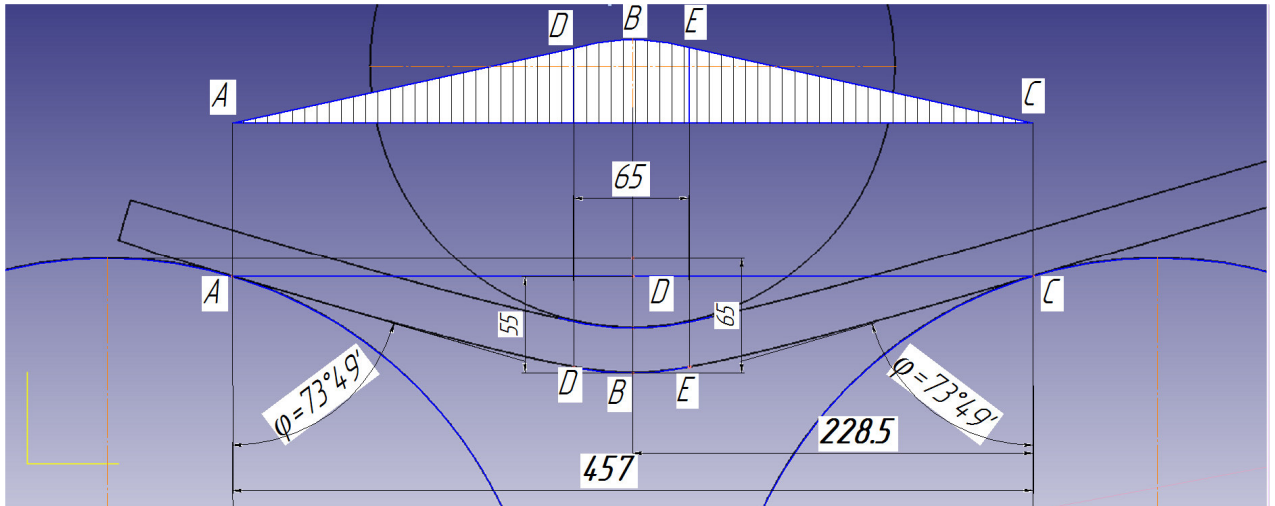


Рисунок 2.5 – Очаг деформации до вращения валков

Максимальную кривизну заготовка приобретает в зоне максимального изгибающего момента, т.е. в области соприкосновения с верхним валком. Далее, по мере удаления от полюса в точке В к точке А кривизна уменьшается до 0, причем наиболее интенсивно кривизна уменьшается на участках DB и BE. Таким образом формируется участок DE длиной 65 мм со средним радиусом 157 мм.

На рисунке 2.6 показана форма очага деформации в момент попадания локального перегиба в точке В на выходной валок.

Вектор приложения силы на верхнем валке в этот момент отклоняется против часовой стрелки на угол  $\varphi \cong 10^\circ$  к входному опорному валку и на протяжении всего процесса фактически не меняет своего положения.

При перемещении точки В от контакта с верхним валком до контакта с выходным валком, точка опоры на выходном валке постепенно перемещается



по часовой стрелке, что вызывает уменьшение стрелы прогиба  $S$  (от 55 мм до 40,6 мм) за счет уменьшения плеча действия опорной реакции  $Q_1$ .

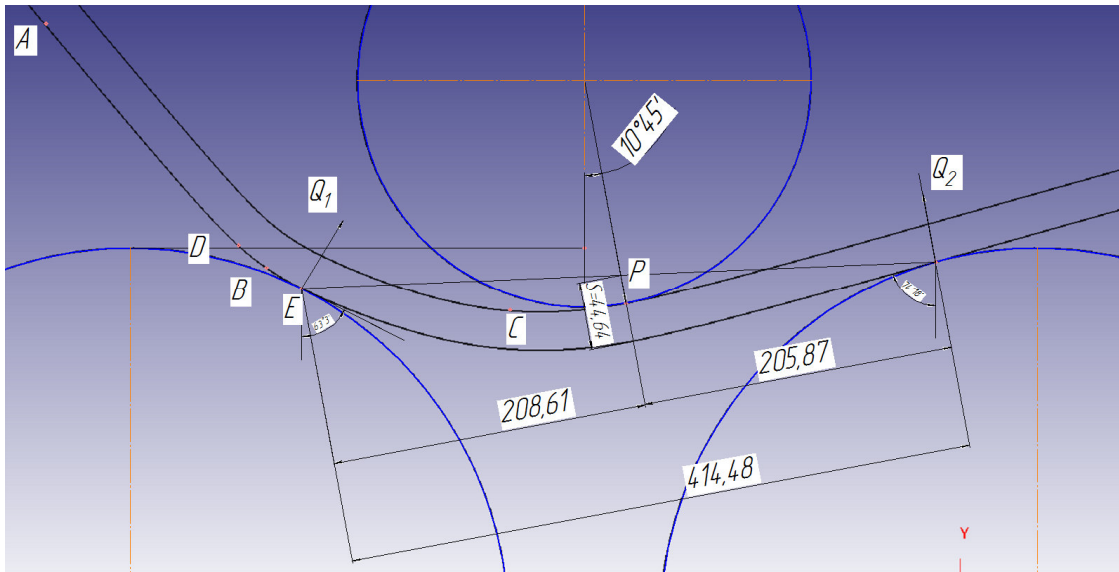


Рисунок 2.6 – Очаг деформации при прохождении перегиба через выходной опорный валок

Так как в это же время формируется участок BC (или участок C на Рисунках 2.4, 2.5) то он, при уменьшении стрелы прогиба, получает большую кривизну.

При прохождении участка максимальной кривизны DE (Рисунок 2.6) стрела прогиба  $S$  увеличивается с 40,6 мм до 44,64 мм за счет перемещения против часовой стрелки точки опоры на выходном валу и увеличения плеча действия опорной реакции  $Q_1$ .

Затем контакт с выходным валом проходит участок BC, имеющий меньшую кривизну, чем участок DE, следовательно, точка опоры на выходном валке снова перемещается по часовой стрелке, но уже в меньшей степени уменьшая стрелу прогиба путем уменьшения плеча действия опорной реакции  $Q_1$ .

После прохождении точки C контакта с выходным валком (Рисунок 2.7) процесс стабилизируется и формируется основной периметр заготовки.

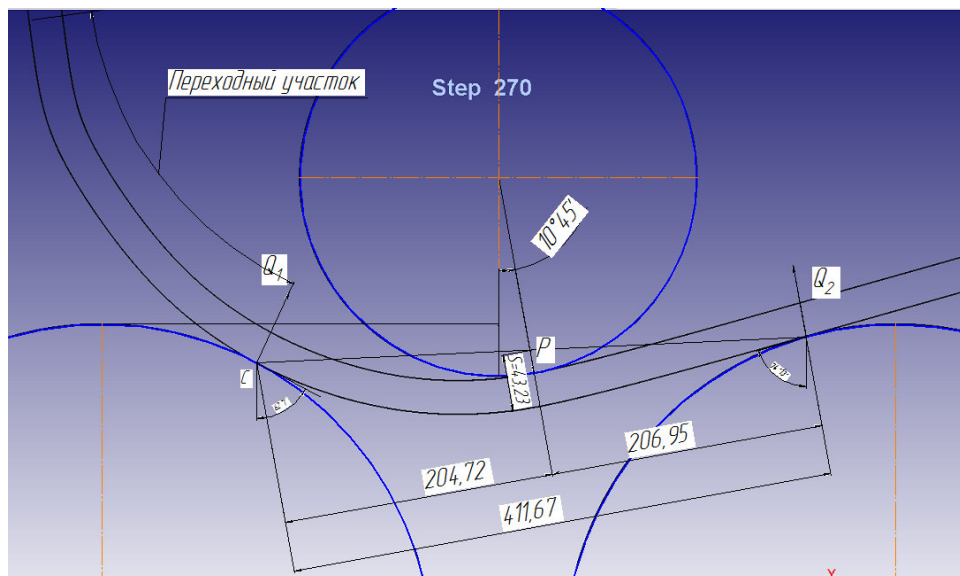


Рисунок 2.7 – Очаг деформации при формовке основного периметра

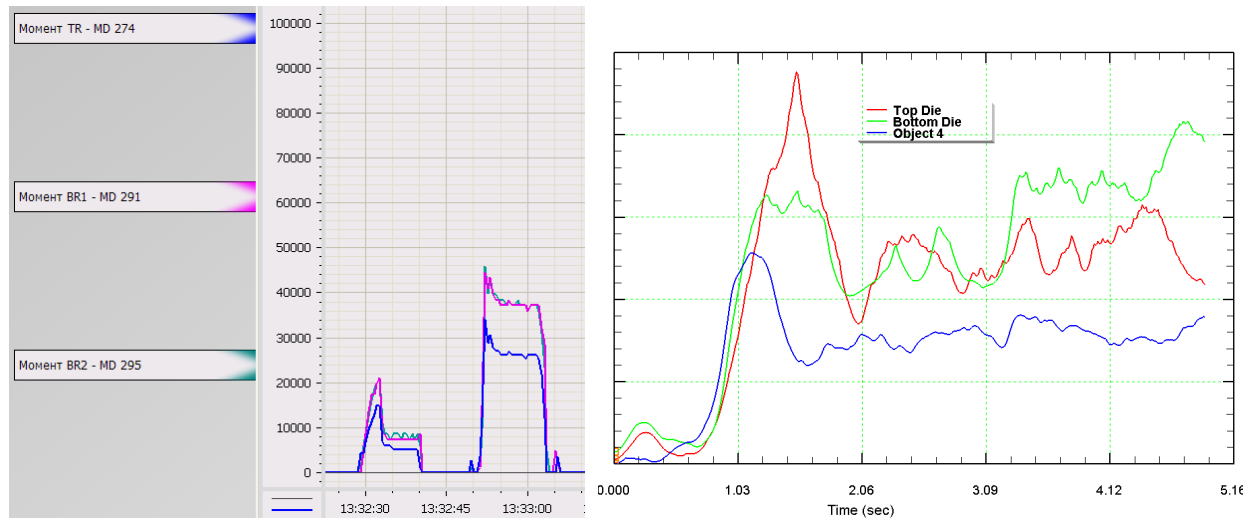
Следует отметить, что перемещение точки опоры имеет характер затухающих колебаний, следовательно, и кривизна по периметру изменяется поэтапно: от плоского участка нулевого радиуса до основного периметра с образованием промежуточных участков.

Наиболее негативным при этом, является образование участка В (Рисунок.2.3, 2.4), который возможно исправить только при экспандировании трубы. Участок С более протяженный, чем участок В, но при этом имеет кривизну более близкую к кривизне основного периметра, поэтому его влияние на точность размера труб не столь велико.

Таким образом, установлено, что при одной и той же позиции верхнего валка относительно опорных валков на этапе перемещения и на этапе вращения формируется разная кривизна на соответствующих участках заготовки. Эта неравномерность связана с уменьшением стрелы прогиба в режиме вращения, вызванным сокращением расстояния между точками опор и отклонением вектора приложения усилия со стороны верхнего валка.

Помимо дефектов формы готовых труб неравномерность деформации трубной заготовки, возникающая в процессе формовки, приводит к повышенным нагрузкам привода вращения валков по крутящему моменту.

На рисунке 2.8, а показан типовой график записи крутящего момента трехвалковой листогибочной машины (ЛГМ) конструкции фирмы Haeusler AG. Из графика видно, что в начале прохода крутящий момент резко возрастает, а затем стабилизируется до окончания прохода.



а)

б)

Рисунок 2.8 – Пиковые нагрузки на привод вращения валков полученные:  
 а – с реальной ЛГМ (синий график – верхний валок; зеленый и розовый график – нижние валки) ; б – с конечно-элементной модели (синий график – верхний валок; красный и зеленый – нижние валки)

При детальном анализе диаграмм моментных нагрузок (рисунок 2.8, б), полученных в результате цифрового моделирования процесса формовки, в сравнении с аналогичными, полученными при регистрации параметров процесса, замечено, что импульсное возрастание крутящих моментов практически совпадает по времени с прохождением участка перегиба, приобретенного заготовкой при погружении нажимного валка, по поверхности выходного опорного валка.

Такой эффект можно объяснить резким изменением «угла атаки»  $\beta$  (рисунок 2.9), который приводит к резкому повороту вектора  $Q$  и, соответственно, плеча  $L$  создания изгибающего момента  $M_{изг}$ , необходимого для формовки. Несколько изменится при этом и кривизна заготовки.

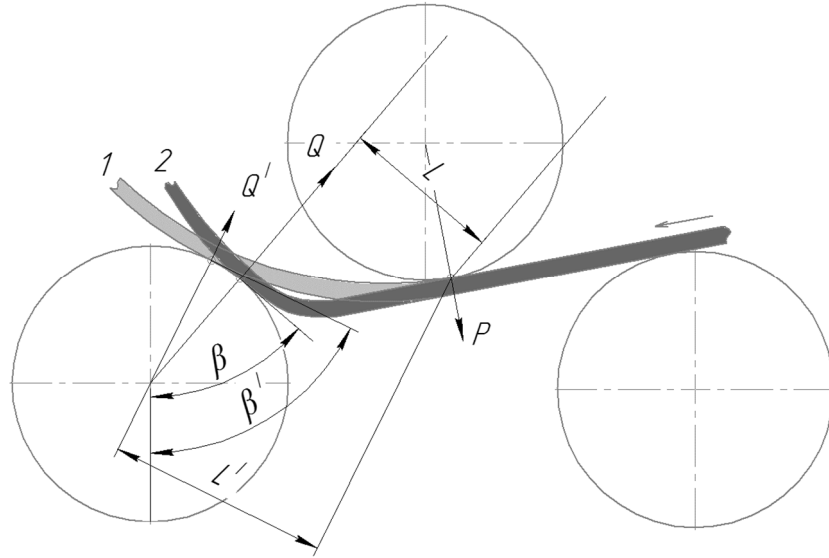


Рисунок 2.9 – К вопросу неустойчивости крутящего момента на выходном опорном валке:  $\beta'$  и  $L'$  – «угол атаки» и плечо приложения реакции  $Q'$  при монотонной кривизне заготовки (1);  $\beta$  и  $L$  – «угол атаки» и плечо приложения реакции  $Q$  при наличии перегиба (2)

Листогибочные машины, как правило, оснащены средствами автоматики, которые отключают работу приводов при достижении определённых значений крутящего момента, с целью исключения поломок привода валков. В связи с этим, скачки крутящего момента могут ограничить производство труб относительно толстостенных типоразмеров и приводить к усталостному разрушению элементов привода вращения валков.

На основе проведенного анализа формирования кривизны заготовки выдвинута гипотеза о том, что: если при определённой величине перемещения верхнего валка осуществлять вращение валков, то кривизна зоны между плоским участком и основным периметром будет максимально приближена к кривизне основного периметра, что способствует однородному напряженно-деформированному состоянию трубной заготовки в поперечном сечении после формовки.

Технология формовки на основе выдвинутой гипотезы названа «погружение+вращение».

## 2.2 Концептуальная модель процесса формовки

Задачей математического моделирования является определение напряженно-деформированного состояния металла листа в процессе вальцевой формовки.

Объектом математического моделирования является процесс вальцевой формовки, который представлен системой «валки – лист – очаг деформации – труба».

Для описания моделируемой системы были приняты следующие гипотезы и допущения:

- поперечные сечения, плоские и перпендикулярные к нейтральной линии листа до деформации, остаются плоскими и перпендикулярными к изогнутой нейтральной линии листа после ее деформации;
- материал листа изотропный;
- кривая упрочнения описывается линейной зависимостью;
- опорные валки и нажимные валки, имеющие по длине бочки валка дополнительные опоры, считаются абсолютно жесткими телами;
- износ валков не учитывается.

Определяющими параметрами моделируемой системы являются:

$s$  – толщина листа, мм;  $L_{л}$  – длина листа, мм;  $B_{л}$  – ширина листа, мм;  $E$  – модуль упругости, МПа;  $\sigma_T$  – предел текучести, МПа;  $\Pi$  – модуль упрочнения, МПа;  $D_{НВ}$  – диаметр нажимного валка, мм;  $L_{НВ}$  – длина нажимного валка, мм;  $D_{ОВ}$  – диаметр опорного валка, мм;  $L_{ОВ}$  – длина опорного валка, мм;  $Ra$  – шероховатость поверхности валков;  $HВ$  – твердость поверхности валков;  $V_{ф}$  – скорость формовки;  $H$  – перемещение нажимного валка, мм;  $L_{В}$  – межосевое расстояние опорных валков, мм;  $L_2$  – межосевое расстояние нажимных цилиндров, мм;  $L_1$  – межосевое расстояние нажимного цилиндра и цилиндра противоизгиба, мм;  $Z$  – величина поперечной подачи листа, мм;  $P_{пи}$  – усилие противоизгиба, кН;  $\mu$  – коэффициент трения.

Приведенные определяющие параметры следует разделить по характеру изменения на постоянные и переменные.

Постоянные определяющие параметры связаны с конструкцией ЛГМ и не могут быть изменены без мероприятий, связанных с модернизацией ЛГМ, либо диапазон колебаний значений параметров невелик и не приводит к существенным изменениям параметров отклика. К таким параметрам относятся  $L_{НВ}$ ,  $L_{ОВ}$ ,  $D_{ОВ}$ ,  $L_2$ ,  $L_1$ ,  $НВ$ ,  $Ra$ ,  $L_л$ ,  $E$ .

Остальные определяющие параметры – переменные и зависят от типоразмера трубы, механических свойств листа, надстроек ЛГМ, конфигурации валкового инструмента. К переменным параметрам относятся:  $s$ ,  $B_л$ ,  $\sigma_T$ ,  $\Pi$ ,  $D_{НВ}$ ,  $H$ ,  $L_в$ ,  $Z$ ,  $P_{ПИ}$ .

Параметрами отклика в моделируемой системе являются:  $R$  – радиус кривизны заготовки на выходе из очага деформации, мм;  $L_{пл}$  – длина плоских участков после формовки, мм;  $\Delta$  – межкромочный зазор, мм;  $P$  – усилия на валках, кН;  $M_{кр}$  – крутящий момент на валке, Н·м;  $f$  – прогиб нажимного вала, мм;

С учетом принятых обозначений и разделения действия определяющих параметров на очаг деформации со стороны валков, листа и трубы, концептуальная схема математической модели вальцевой формовки представлена в виде модели «чёрного ящика» [69,70] на рисунке 2.10.

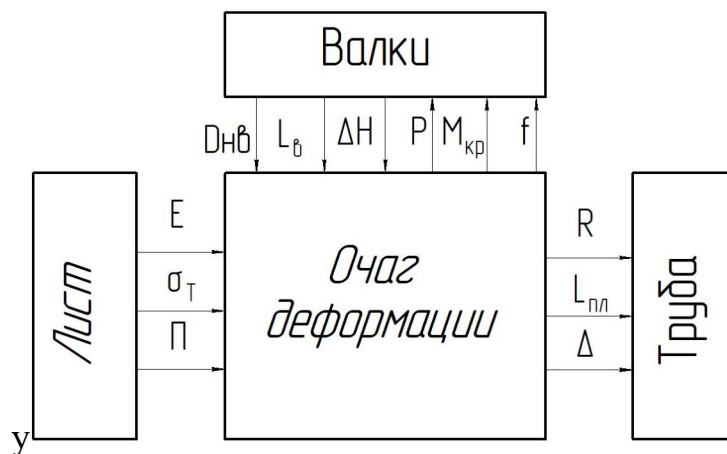


Рисунок 2.10 – Концептуальная схема математической модели вальцевой формовки

В общем виде математическая модель вальцевой формовки, как совокупность зависимостей параметров отклика от определяющих параметров [71], запишется системой следующих уравнений:

$$\begin{cases} R_{\text{нагр}} = R_{\text{нагр}} (H, s, L_{\text{в}}, D_{\text{нв}}, E, \sigma_{\text{т}}, \Pi); \\ L_{\text{пл}} = L_{\text{пл}} (z, H, s, L_{\text{в}}, D_{\text{нв}}); \\ \Delta = \Delta (z); \\ P = P (E, \sigma_{\text{т}}, \Pi, L_{\text{в}}, s, \Delta H); \\ M_{\text{кр}} = M_{\text{кр}} (E, \sigma_{\text{т}}, \Pi, L_{\text{в}}, s, H); \\ f = f (D_{\text{нв}}, E, \sigma_{\text{т}}, \Pi, L_{\text{в}}, s, H). \end{cases} \quad (2.1)$$

Для всех параметров представленных в системе (2.1) необходимо получить расчетные зависимости, поскольку в литературных источниках данные зависимости либо не представлены (например для  $L_{\text{пл}}$  и  $\Delta$ ), либо дают неточный результат искомой величины.

Поскольку гибка листа в вальцах происходит в холодном состоянии, то необходимо учитывать распружинивание заготовки после формовки. Для учета распружинивания заготовки принята формула У.Джонсона [72], согласно которой радиус заготовки после распружинивания равен

$$R = \frac{R_{\text{нагр}}}{1 - 3 \left( \frac{\sigma R_{\text{нагр}}}{2Es} \right) (1 - \nu^2) + 4 \left( \left( \frac{\sigma R_{\text{нагр}}}{2Es} \right) (1 - \nu^2) \right)^3}, \quad (2.2)$$

где  $R_{\text{нагр}}$  – радиус заготовки под нагрузкой, мм;

$E$  – модуль упругости стали, МПа;

$\nu$  – коэффициент Пуассона;

$\sigma = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{\text{т}}$  – предел текучести по Мизесу, МПа.

### 2.3 Определение параметров формоизменения заготовки при перемещении верхнего вала

По мере перемещения верхнего вала происходит постепенный обхват его заготовкой. Величина обхвата измеряемая углом  $\theta$  (Рисунок 2.11), является функцией радиусов валков и параметров настройки  $H$ ,  $L$  и может быть определена по формуле:

$$\theta = 2 \cdot \varphi_1 = 2 \cdot \left( \frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} \frac{H}{L} - \operatorname{arccos} \frac{(R_3 + h + R_1) \cdot \cos(\operatorname{arctg} \frac{H}{L})}{L} \right). \quad (2.3)$$

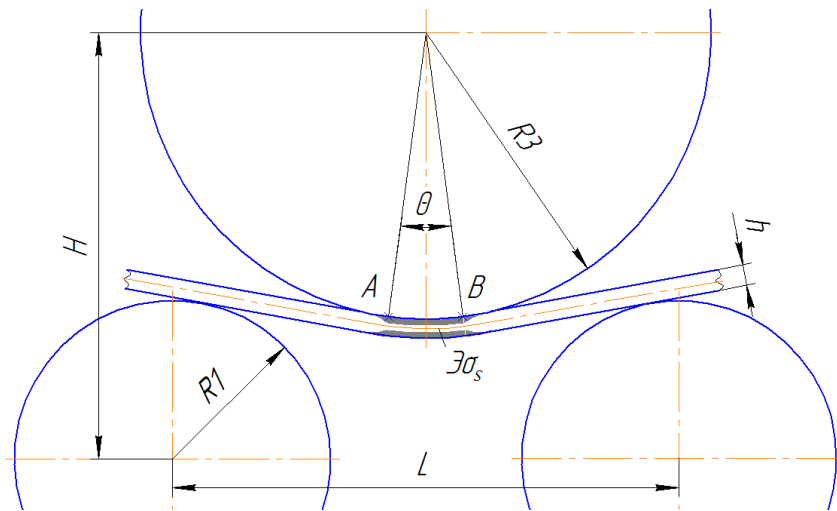


Рисунок 2.11 – К вопросу образования перегиба

Величина обхвата определяет длину дефектного участка, которая приближённо может быть определена, как:

$$L_{\pi} = R_{\text{в}} \theta \quad (2.4)$$

На рисунке 2.12 показаны графики изменения длины переходного участка в зависимости от величины перемещения  $H$  верхнего вала для валков  $\varnothing$  650, 780, 900 мм и межосевых расстояний нижних валков  $L$  – 600, 700 и 800 мм. Зависимость можно считать линейной, поскольку концевые нелинейные участки графиков относятся к таким величинам перемещений  $H$ , которые на практике не применяются.



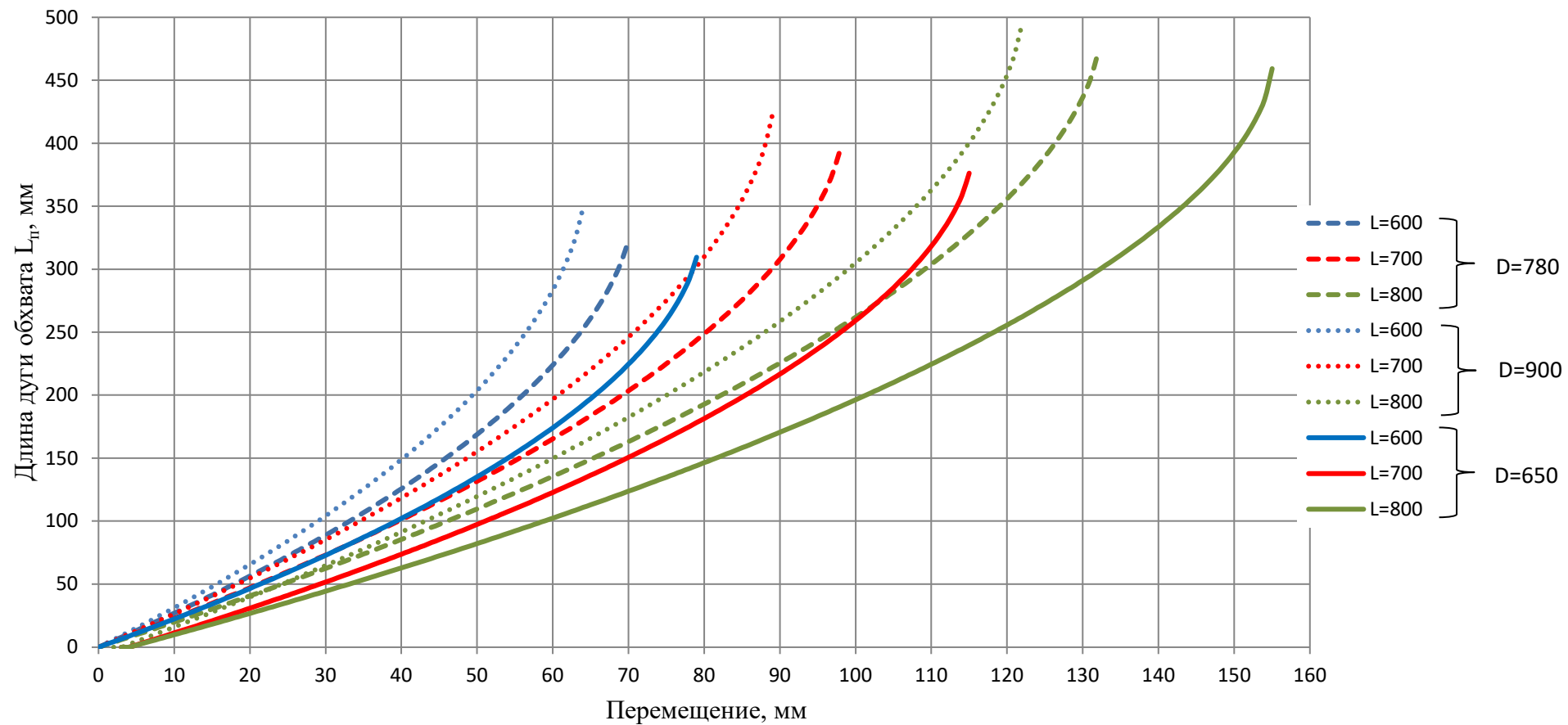


Рисунок 2.12 – График изменения длины перегиба в зависимости от настроек ЛГМ и диаметра верхнего валка

Также известно [73-45], что при достижении определенной величины перемещения верхнего деформирующего инструмента происходит отрыв заготовки от валка и образуется зазор, который растет на некоторую величину по мере дальнейшего перемещения инструмента.

В работе [75] в результате численного эксперимента на цифровой модели процесса шаговой формовки (JCO) с варьированием параметров настройки и геометрии инструмента установлено, что максимальная величина зазора составила 2,8 мм, а в более чем 83% вариантов расчета не превышала 1,25 мм.

Для процесса TRB возникновение отрыва заготовки от валка также негативно сказывается на стабильности кривизны поперечного сечения труб.

Для минимизации неоднородности деформаций заготовки необходима разработка математической модели формирования кривизны в процессе перемещения верхнего валка.

Данная задача решалась методом регрессионного анализа в среде конечно-элементного моделирования. Коэффициенты регрессии [76-78] определялись из результатов дробного факторного эксперимента [79-82] проведенного в среде конечно-элементного моделирования.

Варьируемыми определяющими параметрами (факторами) являлись (рисунок 2.13):  $L$  – межцентровое расстояние нижних валков, мм;  $D$  – диаметр верхнего валка, мм;  $H$  – перемещение верхнего вала, мм. Параметром отклика принят наружный радиус  $r_i$  трубной заготовки в вертикальной плоскости симметрии верхнего валка.

В конечно-элементной модели валки задавались как абсолютно жёсткие тела. Нижние валки имели постоянный диаметр  $D_n = 500$  мм. Свойства модели листа задавались со следующими параметрами:  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа,  $\sigma_T = 550$  МПа,  $\Pi = 3 \cdot 10^3$  МПа.

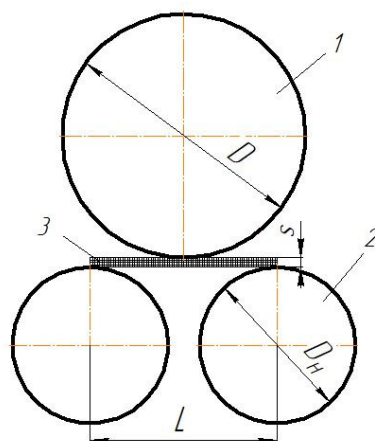


Рисунок 2.13 – Схема модели изгиба заготовки в вальцах

1 – верхний валок; 2– нижние валки; 3 – заготовка

Анализ результатов моделирования изгиба заготовки в отдельно взятых вариантах показал, что зависимость  $r(H)$  имеет нелинейный характер. Функция изменения радиуса от перемещения имеет вид  $r(H) = \frac{1}{H}$ .

С учетом нелинейности модели был принят трехуровневый план вида  $N = 3^k$ , где  $N=9$  – число опытов,  $k=3$  – количество факторов. С целью снижения числа опытов принята 1/8 реплика от полного факторного плана.

Уровни и интервалы варьирования факторов представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Независимые переменные

Обозначение факторов	Уровни варьирования, мм			Интервал варьирования, мм
	Минимум	Среднее значение	Максимум	
L	600	700	800	100
D	260	580	900	320
H	15	45	75	30

Параметры опытов и значение зависимой переменной  $r$  представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Матрица планирования эксперимента

№ опыта	Факторы			Зависимая переменная r, мм
	L, мм	D, мм	H, мм	
1	800	260	45	249,93
2	800	580	15	3327,17
3	600	260	15	917,71
4	800	900	75	340,39
5	700	900	15	2004,45
6	600	900	45	324,32
7	700	580	45	222,66
8	700	260	75	113,74
9	600	580	75	218,82

Зависимая переменная  $r$  определялась согласно выражению:

$$r = \frac{s}{2\varepsilon}, \quad (2.5)$$

где  $\varepsilon$  – максимальные деформации при конечном погружении.

Уравнение регрессии примет вид

$$r(L, H, D) = b_0 + b_1 \cdot L + b_2 \cdot D + \frac{b_3}{D} + \frac{b_4}{H}, \quad (2.6)$$

где  $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4$  – коэффициенты регрессии.

Коэффициенты регрессии определялись методом наименьших квадратов и приняли следующие значения

$$\begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -300 \\ 4 \\ -3 \\ -7,5 \cdot 10^5 \\ 4,9 \cdot 10^4 \end{pmatrix}. \quad (2.7)$$

Коэффициент корреляции составил  $R = 0.91$ , что говорит о высоком уровне достоверности подбора вида уравнения регрессии.

Для проверки адекватности регрессионной модели проведено сопоставление полученных результатов с результатами конечно-элементного

моделирования. Начальные условия соответствовали вариантам расчета №4 и №8 таблицы 2.2. Результаты сравнения представлены на рисунке 2.14.

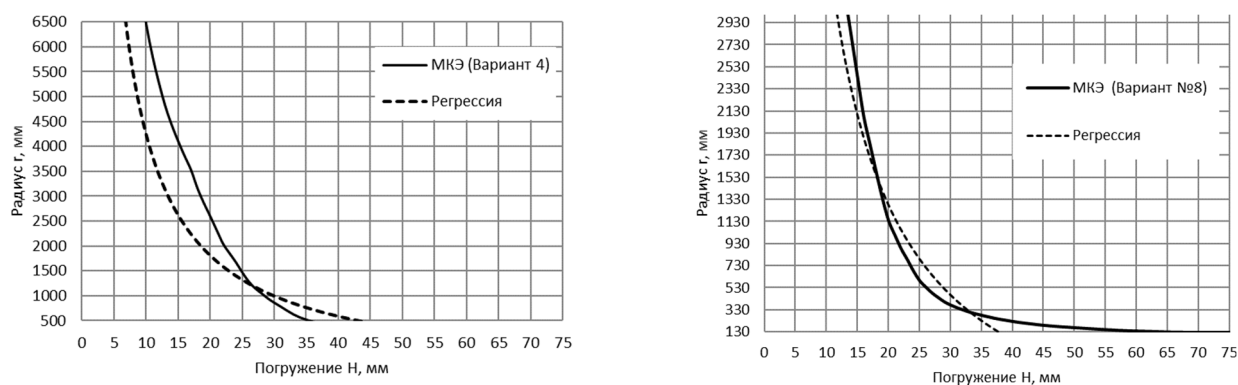


Рисунок 2.14 – Изменение радиуса кривизны при погружении верхнего вала

Как видно из рисунка 2.14, полученное регрессионное уравнение удовлетворяет нелинейной зависимости  $r(H)$ , что дает возможность считать ее пригодной для расчетов технологии формовки на этапе перемещения вала.

Для проверки регрессионной модели был произведен расчет формовки трубы размерами  $\Phi 720 \times 10$  мм в один проход на заданный радиус методом конечных элементов при условии, что  $D = 300$  мм,  $L = 600$  мм,  $s = 10$  мм,  $r = 332$  мм. По результатам моделирования установлено, что заданный радиус  $r$  заготовки обеспечивается при погружении  $H_2 = 65$  мм. По формуле (2.6) с учетом (2.7) первое перемещение  $H_1 \approx 30$  мм.

На рисунке 2.15 представлены сравнительные результаты моделирования формовки с отдельным и одновременным перемещением и вращением валков.

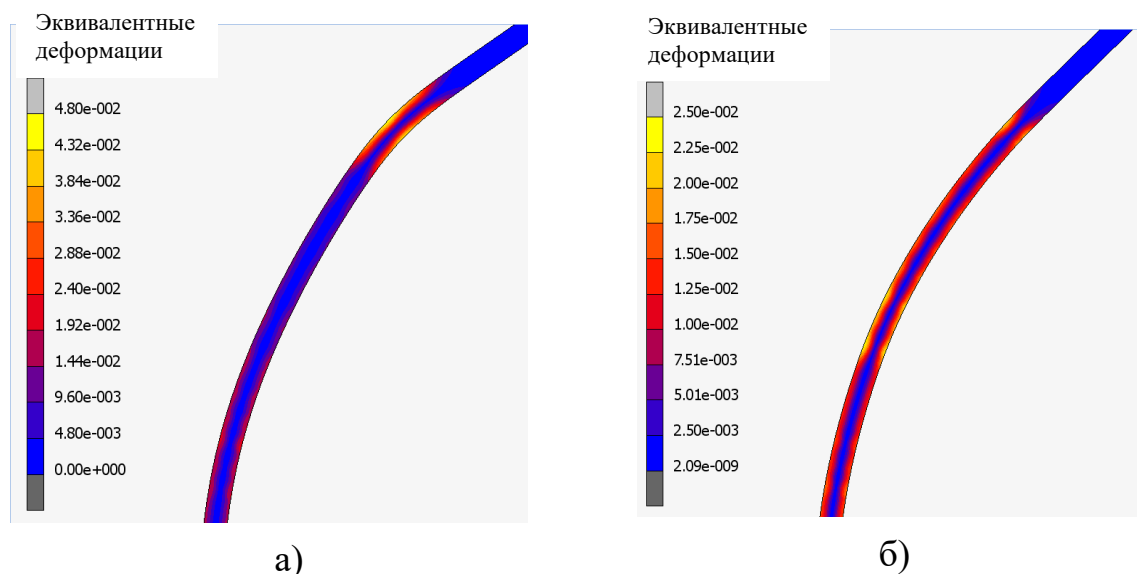


Рисунок 2.15 – Распределение остаточных деформаций на переходном участке при формовке: а – с отдельным перемещением и вращением валков; б – с одновременным перемещением и вращением валков

Результатом новой технологии формовки для труб  $\varnothing 720 \times 10$  мм является снижение величины деформаций на поверхностных слоях переходного участка заготовки с 4,8 до 2,2%, что обеспечивает более монотонную кривизну трубной заготовки в зоне перехода плоского участка в основной периметр.

## 2.4 Определение параметров формоизменения заготовки при вращении валков

Целью разработки методики настройки машины формовки является получение зависимости кривизны листа на выходе из очага деформации от заданного положения верхнего валка и взаимного расположения опорных валков.

В первом проходе, когда исходная заготовка плоская, при вращении валков (Рисунок 2.16), входной участок ДК имеет незначительную кривизну, а участок КН – переменную, близкую к окружности радиуса  $R_4$ . В такой постановке для решения задачи определения кривизны заготовки, в

зависимости от параметров настройки ЛГМ, будем считать участок ДК отрезком, а КN – окружностью.

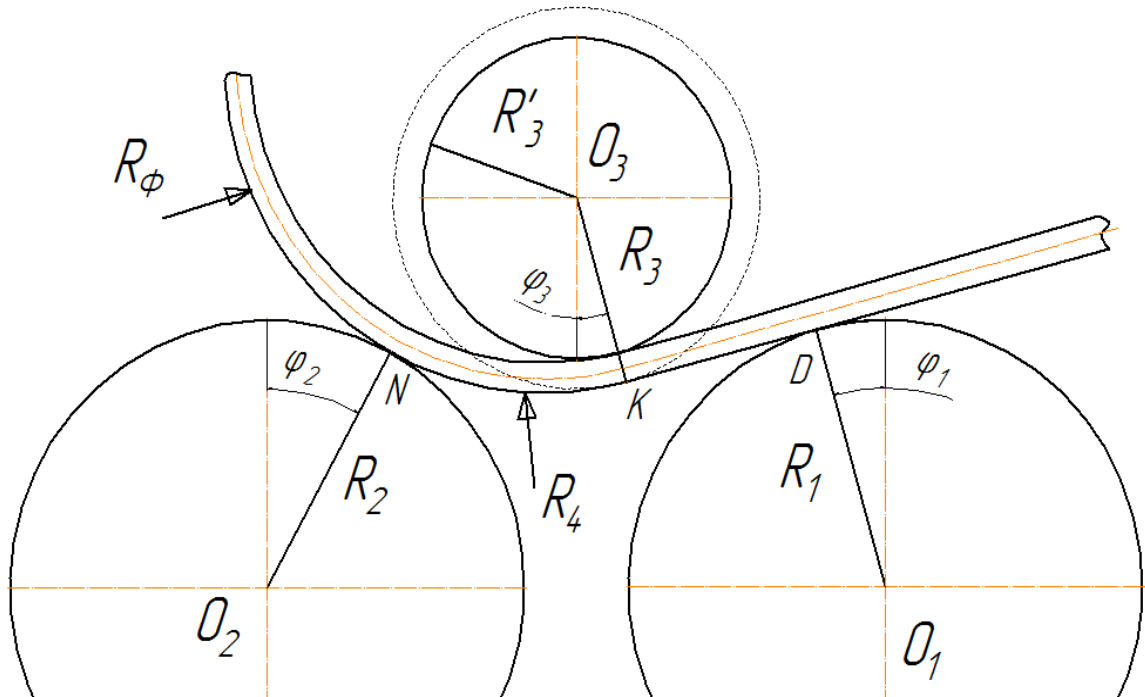


Рисунок 2.16 – Очаг деформации при вальцевой формовке в первом проходе

Для анализа геометрических характеристик очага деформации относительно наружного диаметра заготовки радиус верхнего вала принят равным  $R_3 = R'_3 + s$ , где  $s$  – толщина листа,  $R'_3$  – реальный радиус верхнего вала.

Поскольку отрезок ДК является касательным к окружностям с центрами  $O_1$  и  $O_3$  (Рисунок 2.17), то:

$$\varphi_1 = \varphi_3 = \frac{\pi}{2} - \alpha - \beta, \quad (2.8)$$

где, угол  $\alpha = \arctg \frac{H}{L}; \quad (2.9)$

$$\beta = \arccos \left( \frac{R_1}{O_1M} \right) = \arccos \frac{(R_3 + R_1) \cdot \cos(\alpha)}{L}. \quad (2.10)$$

Подставив в уравнение (2.8) значения углов  $\alpha$  и  $\beta$  получим:

$$\varphi_1 = \frac{\pi}{2} - \arctg \frac{H}{L} - \arccos \frac{(R_3 + R_1) \cdot \cos(\alpha)}{L}. \quad (2.11)$$

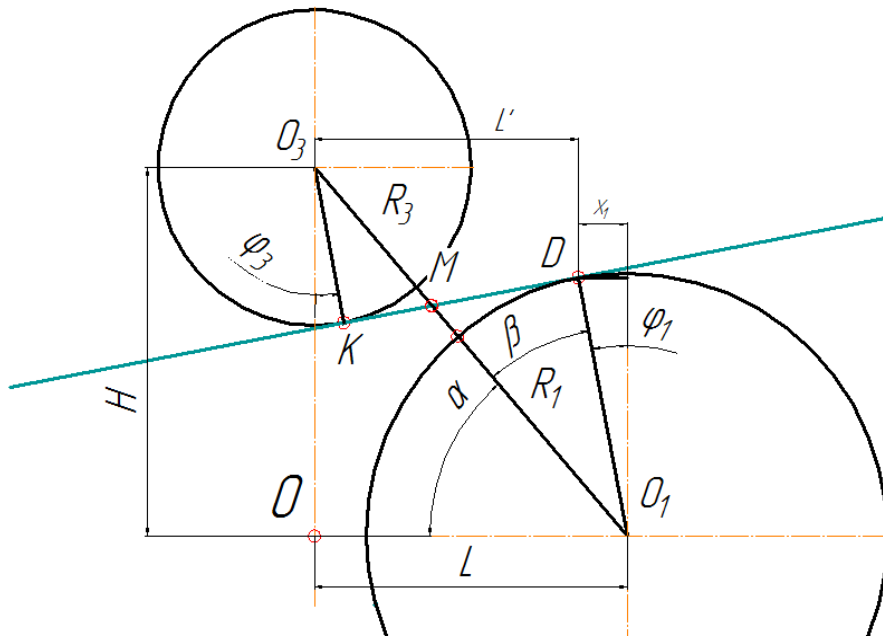


Рисунок 2.17 – К определению координаты точки D

Поскольку углы  $\varphi_1$  и  $\varphi_3$  равны, определим радиус  $R_4$  (Рисунок 2.18), который, в соответствии с принятыми допущениями, является радиусом кривизны заготовки в зоне разгрузки в рассматриваемом проходе. Для этого решим задачу нахождения параметров окружности, касательной к двум окружностям с центрами  $O_2$  и  $O_3$ .

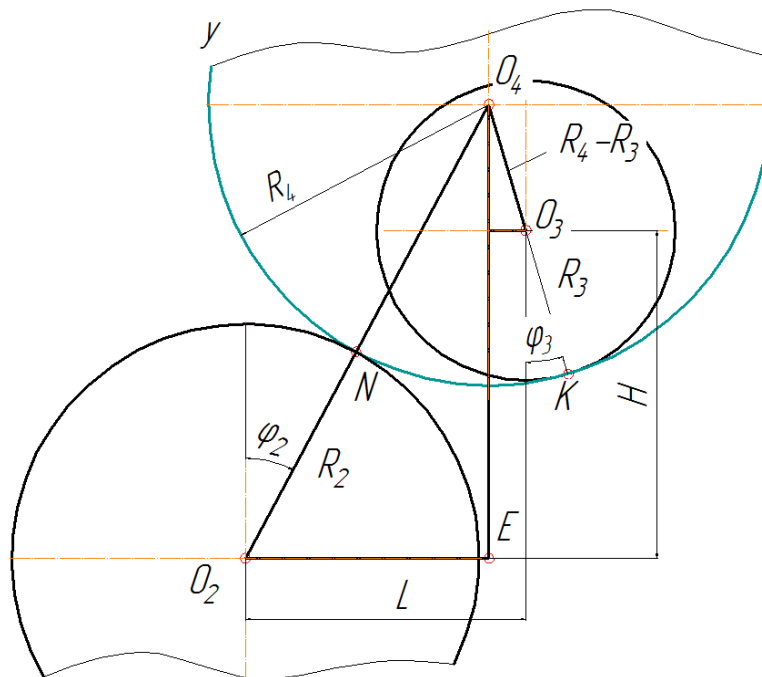


Рисунок 2.18 – К определению радиуса  $R_4$



Построив перпендикуляр из точки  $O_4$  к оси абсцисс, получим прямоугольный треугольник  $O_2O_4E$ , в котором  $O_4E = H + (R_4 - R_3)\cos\varphi_3$ ,  $O_2E = L - (R_4 - R_3)\sin\varphi_3$ ,  $O_2O_4 = R_2 + R_4$ .

В таком случае, получаем из простых геометрических соотношений

$$(H + (R_4 - R_3)\cos\varphi_3)^2 + (L - (R_4 - R_3)\sin\varphi_3)^2 = (R_2 + R_4)^2. \quad (2.12)$$

После преобразования уравнения (2.12) радиус  $R_4$  заготовки на выходе из очага деформации будет равен:

$$R_4 = \frac{H^2 + L^2 + R_3^2 - R_2^2 - 2R_3(H\cos\varphi_3 - L\sin\varphi_3)}{2(R_2 + R_3 - H\cos\varphi_3 + L\sin\varphi_3)}. \quad (2.13)$$

С учетом распушинивания радиус заготовки  $R_5$  после первого прохода равен:

$$R_5 = \frac{R_4}{k_{\text{расп}}}, \quad (2.14)$$

где, согласно формуле У.Джонсона [72]

$$k_{\text{расп}} = 1 - 3\left(\frac{\sigma \cdot R_4}{2E \cdot s}\right)(1 - \nu^2) + 4\left(\left(\frac{\sigma \cdot R_4}{2E \cdot s}\right)(1 - \nu^2)\right)^3, \quad (2.15)$$

где  $E$  – модуль упругости стали, МПа;

$\nu$  – коэффициент Пуассона;

$\sigma = \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_T$  – предел текучести по Мизесу, МПа.

Угол  $\varphi_2$  равен:

$$\varphi_2 = \frac{L - (R_4 - R_3)\sin\varphi_3}{R_2 + R_4}. \quad (2.16)$$

Во втором и последующих проходах очаг деформации также можно разделить на две части (Рисунок 2.19).

При этом входная часть имеет кривизну радиусом  $R_5$  приобретенную в предыдущем проходе, а выходная догибается до радиуса  $R_6$ , где  $R_6$  определяется аналогично  $R_4$  в первом проходе:

$$R_6 = \frac{H^2 + L^2 + R_3^2 - R_2^2 - 2R_3(H\cos\varphi_5 - L\sin\varphi_5)}{2(R_2 + R_3 - H\cos\varphi_5 + L\sin\varphi_5)}. \quad (2.17)$$

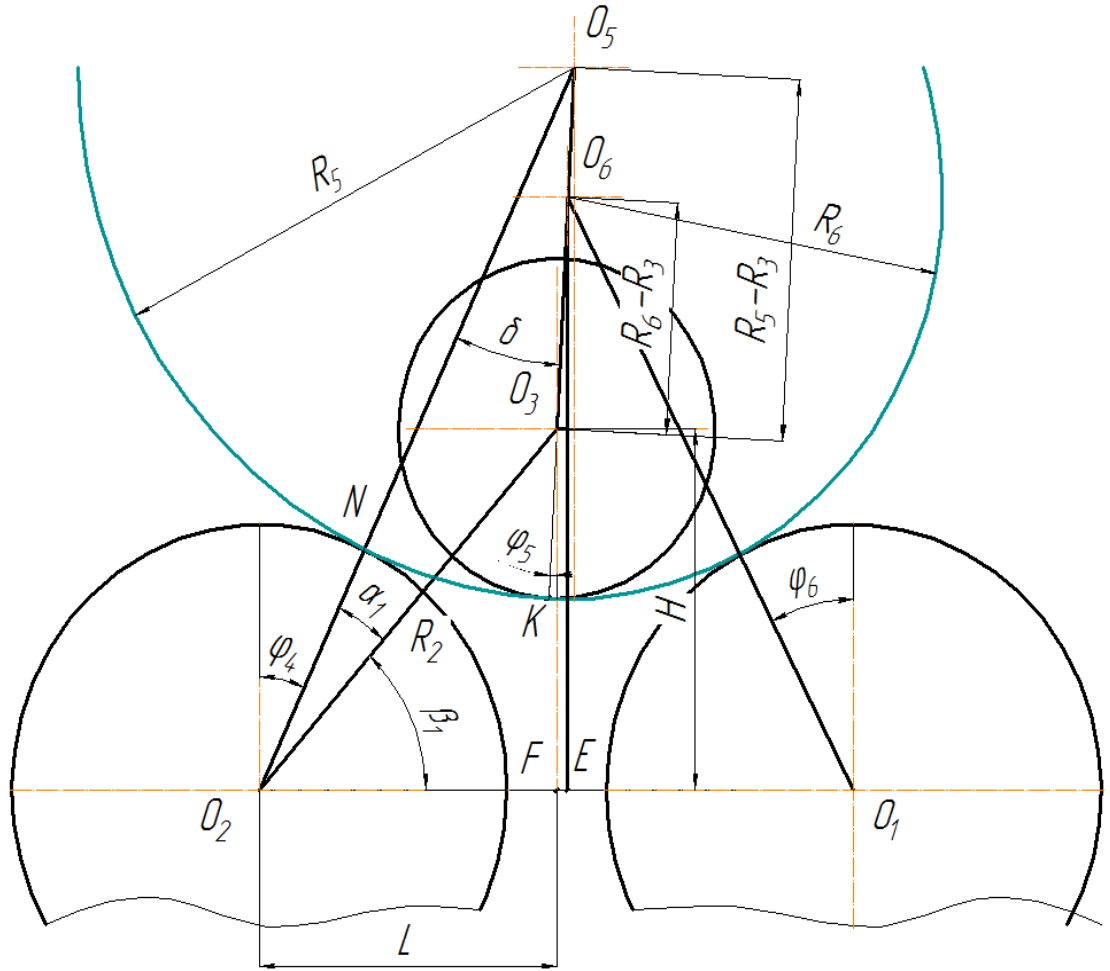


Рисунок 2.19 – Очаг деформации во втором проходе

В формуле (1.17):

$$\varphi_5 = 90^\circ - \alpha_1 - \beta_1 - \delta, \quad (2.18)$$

где, из треугольника  $O_2O_5O_3$ , имеем:

$$\alpha_1 = \arccos \frac{(R_2+R_5)^2+H^2+L^2-(R_5-R_3)^2}{2(R_2+R_5)\sqrt{H^2+L^2}}; \quad (2.19)$$

$$\delta = \arccos \frac{(R_2+R_5)^2+(R_5-R_3)^2-(H^2+L^2)}{2(R_2+R_5)(R_5-R_3)}. \quad (2.20)$$

Из треугольника  $O_2O_3F$ :

$$\beta_1 = \arctg \frac{H}{L}. \quad (2.21)$$

Углы  $\varphi_4$  и  $\varphi_6$  равны, соответственно:

$$\varphi_4 = \frac{\pi}{2} - \alpha_1 - \beta_1; \quad (2.22)$$

$$\varphi_6 = \arcsin \frac{EO_1}{R_1+R_6} = \frac{L-(R_6-R_3) \cdot \sin \varphi_5}{R_1+R_6}. \quad (2.23)$$

После прохождения очага деформации во втором проходе радиус заготовки  $R_7$ , с учетом распруживания, равен:

$$R_7 = \frac{R_6}{k_{\text{расп}}}. \quad (2.24)$$

В последующих проходах радиусы заготовки рассчитываются аналогично второму проходу.

На основании полученных формул определим остаточную длину  $L_{\text{пл}}$  плоского участка. Длина плоского участка равна:

$$L_{\text{пл}} = (R_3 + R_1 + s) \cdot tg(\beta), \quad (2.25)$$

где угол  $\beta$  равен:

$$\beta = \arccos\left(\frac{R_1}{O_1M}\right) = \arccos\frac{(R_3+R_1) \cdot \cos\left(\arctg\frac{H}{L}\right)}{L}. \quad (2.26)$$

Контроль перемещения листа в процессе формовки осуществляется с помощью инкрементального энкодера, установленного на опорном валке. В такой реализации опорный валок выполняет функцию датчика перемещения, который замеряет пройденное листом расстояние в пределах одного прохода.

При задаче листа в валки координата  $z$  обнуляется, производится погружение нажимного валка на малую величину, обеспечивающую захват листа валками, и его перемещение в стартовую позицию для первого прохода. Начальная координата  $z_{\text{н}}^{\text{H}}$  позиционирования, при этом, соответственно, равна 0.

Если принять, что перемещение заготовки при позиционировании происходит вплоть до контакта разделки кромок и валка, то конечная координата  $z_{\text{н}}^{\text{K}}$  позиционирования равна:

$$z_{\text{н}}^{\text{K}} = -(C + \frac{D_{\text{ов}}}{2} \cdot \varphi_1), \quad (2.27)$$

где  $C$  – расстояние от упора до оси опорного валка;

$D_{\text{ов}}$  – диаметр опорного валка, мм;

Для первого прохода начальная координата  $z_1^{\text{H}}$  равна конечной координате позиционирования  $z_{\text{н}}^{\text{K}}$ . Конечная координата для первого прохода определяется по формуле:

$$z_1^K = (B_{\text{л}} - C - L) + \frac{D_{\text{ов}}}{2} \cdot \varphi_1 + z_{\text{п}}^K, \quad (2.28)$$

где  $B_{\text{л}}$  – ширина листа, мм.

Для второго и последующих проходов алгоритм определения координат  $z$  аналогичный. При этом принято, что начальная координата в  $i+1$  проходе равна конечной координате в  $i$ -ом проходе, т.е.  $z_{i+1}^H = z_i^K$ .

## 2.5 Определение энергосиловых параметров формовки при одновременном перемещении верхнего валка и вращении валков

Для определения энергосиловых параметров процесса формовки, используем энергетический метод широко применяемый в процессах обработки металлов давлением [83,84] и примем для этого расчетную схему, изображённую на рисунке 2.20.

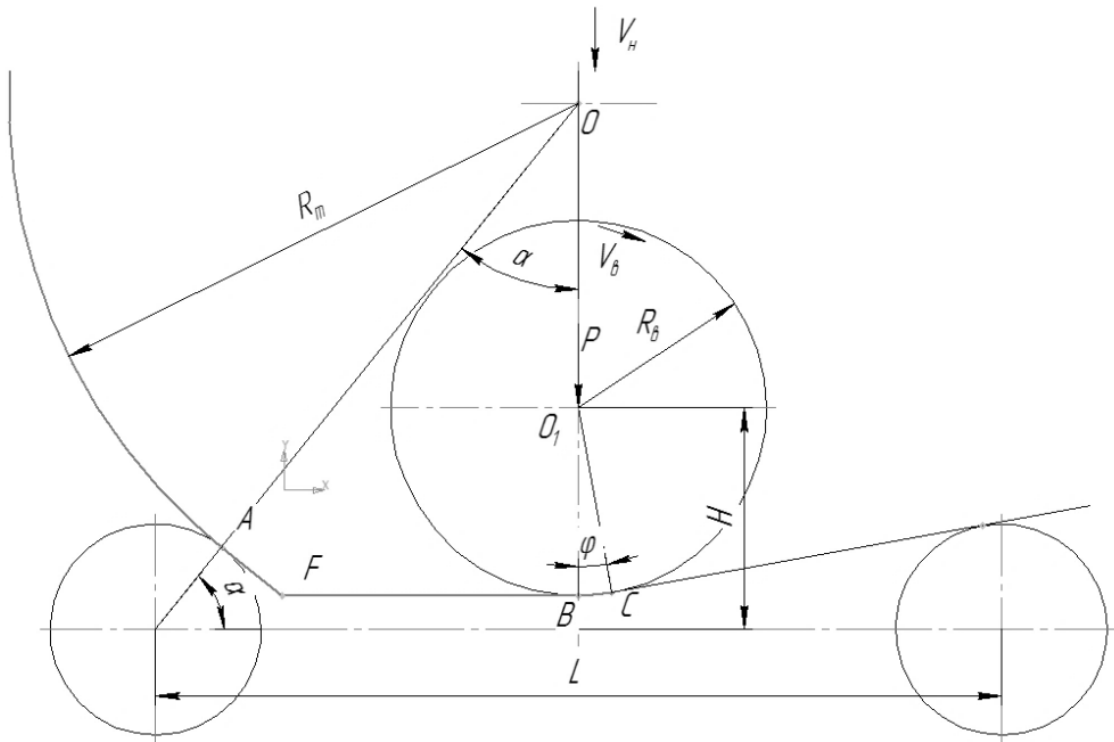


Рисунок 2.20 – Расчетная схема формовки для определения энергосиловых параметров

При построении расчетной схемы приняты следующие допущения:

1) Центр окружности трубной заготовки радиусом  $R_m$  лежит на вертикальной оси симметрии (точка  $O$ );

2) Неизвестная заранее кривизна листа на участке  $AB$  между точками контакта с верхним и нижним валком линейризуется и представляется ломаной линией  $AFB$ . Точка перегиба  $F$  является точкой пересечения касательной к поверхности нижнего левого валка в точке  $A$  и касательной к поверхности верхнего валка в точке  $B$ ;

3) Прогиб листа под действием сил тяжести на участке между точками касания с верхним и нижним правым валком отсутствует.

Запишем уравнение баланса мощности процесса с учетом сделанных допущений:

1) Мощность в рассматриваемую систему подводится за счет перемещения верхнего валка в вертикальном направлении со скоростью  $V_u$ .

Эта мощность равна:

$$N_p = PV_u, \quad (2.29)$$

где  $P$  – сила, действующая на валок при его погружении;

2) Мощность в рассматриваемую систему подводится за счет вращения верхнего валка с угловой скоростью  $\omega$ . Эта мощность равна:

$$N_m = M\omega, \quad (2.30)$$

где  $M$  – момент подводимый к верхнему валку.

С учетом того, что действие равно противодействию, подводимый к валку момент равен моменту сопротивления вращению, создаваемому силами трения  $T$  на дуге  $BC$ . Следовательно, имеем:

$$M = T \cdot R_B. \quad (2.31)$$

Примем, что силы трения подчиняются закону Амонтона-Кулона и равнодействующая вертикальной нагрузки приложена в середине дуги  $BC$ . Тогда:

$$M = R_B \cdot \mu \cdot P \cos \frac{\psi}{2}, \quad (2.32)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения; величина угла  $\psi$  заранее не известна.

3) Мощность в рассматриваемой системе затрачивается на изгиб листа в точке F на угол  $\alpha$ . При этом меняется направление вектора скорости при неизменном его уровне (Рисунок 2.21).

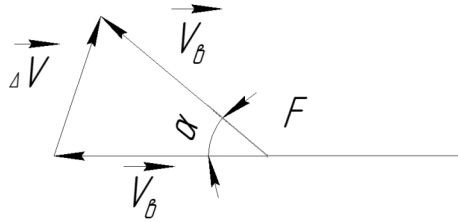


Рисунок 2.21 – Схема изменения вектора скорости

Как видно из представленного рисунка, в процессе изгиба происходит поворот вектора скорости  $\vec{V}_B$  со скоростью  $\Delta\vec{V}$ . Тогда, скорость поворота будет равна:

$$\Delta\vec{V} = 2V_B \sin \frac{\alpha}{2}. \quad (2.33)$$

В свою очередь:

$$\sin \alpha = \frac{L}{2(R_m + R_n)}, \quad (2.34)$$

где  $R_n$  – радиус нижнего валка.

Значит:

$$\Delta V = \frac{V_B L}{2(R_m + R_n)}. \quad (2.35)$$

Поворот вектора скорости происходит под действием сил среза.

Поскольку изменение углов вызывается касательными напряжениями, и в рассматриваемом случае имеет место пластический изгиб, касательные напряжения должны быть равны сопротивлению металла пластической деформации сдвига  $\tau_s$ . Это напряжение действует на площади, равной произведению толщины листа ( $h$ ) на его ширину. Если для удобства принять ширину листа равной единице, то мощность, затрачиваемая на изгиб, будет равна:

$$N_n = \frac{1}{2} \tau_s h \frac{V_B L}{(R_m + R_n)}. \quad (2.36)$$

С учетом сделанных выкладок, уравнение баланса мощности запишется в виде:

$$PV_H + \mu \frac{V_B}{R_B} \cdot R_B \cdot P \cdot \cos \frac{\psi}{2} = \frac{1}{2} \tau_s h \frac{V_B L}{(R_m + R_H)}, \quad (2.37)$$

откуда усилие, действующее на верхний валок, равно

$$P = \frac{\tau_s h L}{(R_m + R_H) \left( \frac{V_H}{V_B} + \mu \cos \frac{\psi}{2} \right)}. \quad (2.38)$$

Полученные уравнения содержат две неизвестных величины:  $P$  – усилие, действующее на верхний валок и  $\psi$  – угол, определяющий длину дуги контакта листа с верхним валком.

Следует отметить, что только в результате геометрических построений величину угла  $\psi$  определить нельзя, так как длина дуги контакта, величину которой он определяет, должна обеспечить достаточный резерв сил трения для продвижения и изгиба листа на участке  $AB$ . Следовательно, для решения задачи необходимо привлечь еще одно уравнение физического характера – условие равновесия сил участка листа  $AC$ .

4) Рассмотрим условия равновесия сил участка листа  $AC$ .

Расчетная схема представлена на рисунке 2.22.

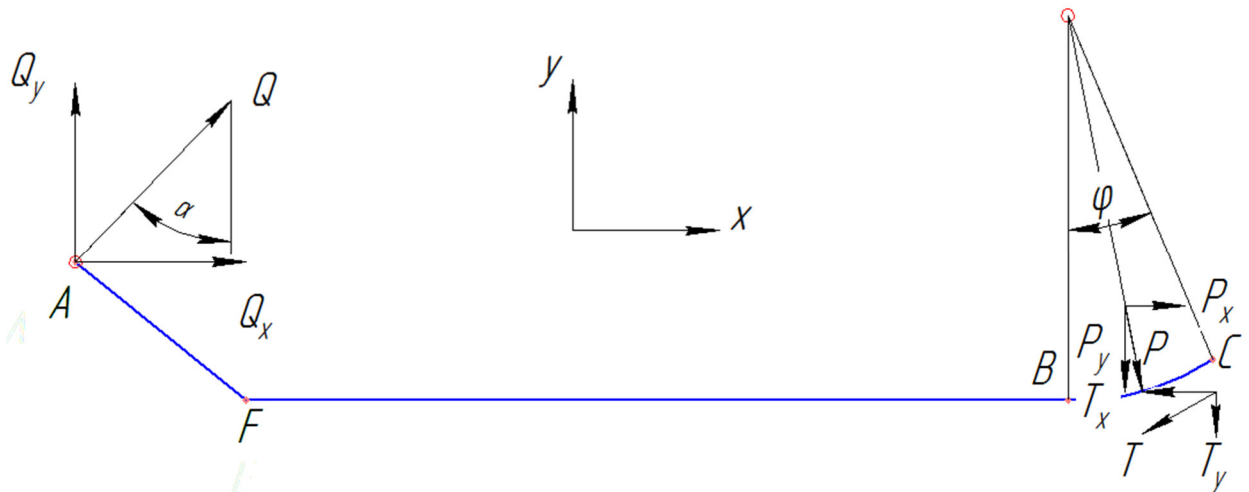


Рисунок 2.22 – Расчетная схема

В этом случае условие равновесия проекций сил на ось  $ox$  примет вид:

$$Q_x + P_x - T_x = 0, \quad (2.39)$$

или

$$Q \sin \alpha + P \sin \frac{\psi}{2} - T \cos \frac{\psi}{2} = 0, \quad (2.40)$$

где  $Q$  – реакция нажимного вала;  $T$  – сила трения, действующая на контакте с верхним валком.

Если принять за основу закон трения Амонтона–Кулона, получим:

$$Q \sin \alpha + P \sin \frac{\psi}{2} - P \mu \cos \frac{\psi}{2} = 0. \quad (2.41)$$

Условие равновесия проекций сил на ось  $oy$  примет вид:

$$Q_y - P_y - T_y = 0; \quad (2.42)$$

или

$$Q \cos \alpha + P \cos \frac{\psi}{2} - P \mu \sin \frac{\psi}{2} = 0. \quad (2.43)$$

Запишем основную систему уравнений:

$$\begin{cases} P = \frac{\tau_s h L}{(R_m + R_H) \left( \frac{V_H}{V_B} + \mu \cos \frac{\psi}{2} \right)}; \\ Q \sin \alpha + P \sin \frac{\psi}{2} - P \mu \cos \frac{\psi}{2} = 0; \\ Q \cos \alpha + P \cos \frac{\psi}{2} - P \mu \sin \frac{\psi}{2} = 0. \end{cases} \quad (2.44)$$

Записанная система из трех уравнений содержит три неизвестные величины:  $P$ ,  $Q$  и  $\psi$ . Следовательно, поскольку число уравнений равно количеству неизвестных, теоретически она может быть решена.

Введем обозначение:  $\sin \frac{\psi}{2} = z$ . Тогда  $\cos \frac{\psi}{2} = \sqrt{1 - z^2}$ .

С учетом этого, первое уравнение системы запишется следующим образом:

$$P = \frac{\tau_s h L}{(R_m + R_H) \left( \frac{V_H}{V_B} + \mu \sqrt{1 - z^2} \right)}. \quad (2.45)$$

Из второго уравнения системы имеем:

$$Q \sin \alpha = \mu P \sqrt{1 - z^2} - P z; \quad (2.46)$$

$$Q = \frac{P(\mu \sqrt{1 - z^2} - z)}{\sin \alpha}. \quad (2.47)$$

Подставим этот результат в последнее уравнение системы



$$P \frac{\cos\alpha}{\sin\alpha} - P\sqrt{1-z^2} - \mu Pz = 0; \quad (2.48)$$

$$P \frac{\cos\alpha}{\sin\alpha} (\mu\sqrt{1-z^2} - z) - P\sqrt{1-z^2} - \mu Pz = 0; \quad (2.49)$$

$$P [(\mu\sqrt{1-z^2} - z)\operatorname{ctg}\alpha - \sqrt{1-z^2} - \mu z] = 0. \quad (2.50)$$

Поскольку при упруго-пластическом изгибе  $P \neq 0$ , справедливо:

$$(\mu\sqrt{1-z^2} - z)\operatorname{ctg}\alpha - \sqrt{1-z^2} - \mu z = 0; \quad (2.51)$$

Решая уравнение относительно параметра  $z$ , находим:

$$z = \pm \frac{\mu \operatorname{ctg}\alpha - 1}{\sqrt{\mu(\mu + \operatorname{ctg}\alpha) + \operatorname{ctg}^2\alpha + 1}}. \quad (2.52)$$

Подставим выражение (2.46) в формулу (2.39). В результате получим зависимость для определения усилия погружения верхнего вала

$$P = \frac{\tau_s h L}{2(R_m + R_H) \left[ \frac{V_H}{V_B} + \mu \sqrt{1 - \frac{1}{(\frac{\mu + \operatorname{ctg}\alpha}{\mu \operatorname{ctg}\alpha - 1})^2 + 1}} \right]} = \frac{\tau_s h L}{2(R_m + R_H) \left[ \frac{V_H}{V_B} + \frac{\mu(\mu + \operatorname{ctg}\alpha)}{\sqrt{(\mu + \operatorname{ctg}\alpha)^2 + (\mu \operatorname{ctg}\alpha - 1)^2}} \right]} \quad (2.53)$$

С учетом того, что:

$$\sin\alpha = \frac{L}{2(R_m + R_H)}, \quad (2.54)$$

имеем

$$\operatorname{ctg}\alpha = \sqrt{4 \left( \frac{R_m + R_H}{L} \right)^2 - 1}. \quad (2.55)$$

Таким образом, на основе энергетического подхода получена зависимость для определения усилия, действующего на верхний валок в процессе формовки.

## 2.6. Определение прогиба верхнего вала

Прогиб верхнего вала ЛГМ создает неравномерность деформаций трубной заготовки в продольном направлении, что приводит к возникновению дополнительных остаточных напряжений после формовки и дефектам формы межкромочного зазора.

Прогиб вала определялся методом начальных параметров [85-87].

Принятая расчетная схема (рисунок 2.23) безопорного нажимного вала ЛГМ представляет собой двухопорную балку с консольным приложением нагрузки противоизгиба  $P_i$  на концах и распределенной нагрузкой  $q$  в середине.

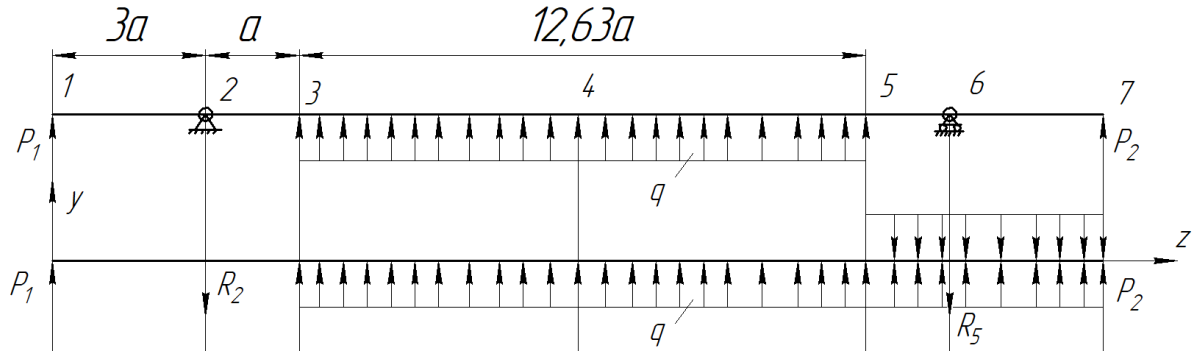


Рисунок 2.23 – Силовая схема безопорного вала

При расчетах методом начальных параметров следуют правилу – если на балку действует распределенная нагрузка и ее действие не заканчивается на конце балки, то распределенную нагрузку продлевают до конца балки и уравнивают распределенной нагрузкой обратного знака.

Реакции опор  $R_2$  и  $R_5$  определены из уравнения суммы моментов относительно точки 2:

$$\sum M_2 = -3a \cdot P + 12,63a \cdot q \left( \frac{12,63a}{2} + a \right) - R_5(2a + 12,63a) + P(3a + 2a + 12,63a) = 0; \quad (2.56)$$

$$R_5 = R_2 = P + 6,315qa. \quad (2.57)$$

Произведем проверку, записав сумму сил на ось  $y$ :

$$\sum F_y = 2P - R_5 - R_2 + 12,63a = 0. \quad (2.58)$$

Универсальное уравнение упругой линии балки для представленной схемы нагружения имеет вид:

$$y = y_0 + \varphi_0 z + \sum P_i \frac{(z - a_p)^3}{6 \cdot EI} + \sum q_i \frac{(z - q_q)^3}{24 \cdot EI}; \quad (2.58)$$

где  $y_0$  и  $\varphi_0$  – перемещение и угол поворота в начале координат (начальные параметры);

$\sum P_i$  – сумма всех сосредоточенных сил, включая реакции опор;

$\Sigma q_i$  – сумма всех распределенных нагрузок;

$z$  – координата сечения, в котором определяется перемещение;

$a_p$  – расстояние от начала координат до сосредоточенной силы;

$a_q$  – расстояние от начала координат до начала действия распределенной нагрузки.

Таким образом, с учетом всех действующих нагрузок, уравнение (2.58) примет следующий вид

$$y = y_0 + \varphi_0 z + \frac{1}{EI} \left[ P \frac{(z-0)^3}{6} - R_2 \frac{(z-3a)^3}{6} - R_5 \frac{(z-17,63a)^3}{6} \right] + \frac{1}{EI} \left[ q \frac{(z-4a)^4}{24} - q_d \frac{(z-16,63a)^4}{24} \right], \quad (2.60)$$

где  $q_d$  – дополнительная уравновешивающая распределенная нагрузка.

Начальные параметры  $y_0$  и  $\varphi_0$  определяются из условия закрепления в точках опор 2 и 3, где прогибы равны нулю:

$$y(3a) = 0; \quad y(17,63a) = 0. \quad (2.61)$$

Подставляем в уравнение (2.56) последовательно значения  $z = 3a$  и  $z = 17,63a$ . При этом оставляем только те слагаемые в квадратных скобках, значения  $(z - a_p)$  и  $(z - a_q)$ , которых больше нуля. Следуя данному правилу в формуле (2.56) не учтено действие сосредоточенной силы  $P$  на правом конце балки, потому что при любом  $z$  параметр  $(z - a_p) \leq 0$ .

Получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} y_0 + 3a \cdot \varphi_0 + \frac{1,5Pa^3}{EI} = 0; \\ y_0 + 17,63a \cdot \varphi_0 + \frac{1}{EI} \left[ P \frac{(17,63a-0)^3}{6} - R_2 \frac{(17,63a-3a)^3}{6} \right] + \frac{1}{EI} \left[ q \frac{(17,63a-4a)^4}{24} - q \frac{(17,63a-16,63a)^4}{24} \right] = 0, \end{cases} \quad (2.62)$$

решая которую, находим начальные параметры  $y_0$  и  $\varphi_0$ .

Изгибающие моменты в сечениях 1-7 определяются из следующих выражений:

$$M_i^{P_1} = P \cdot \frac{z_i^3}{6}; \quad (2.63)$$

$$M_i^{R_2} = R_2 \cdot \frac{(z_i-3a)^3}{6}; \quad (2.64)$$

$$M_i^{R5} = R_5 \cdot \frac{(z_i - 17,63a)^3}{6}; \quad (2.65)$$

$$M_i^q = q \cdot \frac{(z_i - 4a)^3}{6}; \quad (2.66)$$

$$M_i^{qд} = q_д \cdot \frac{(z_i - 16,63a)^3}{6}, \quad (2.67)$$

где  $i$ - номер сечения.

Перемещения  $y_i$  в сечениях 1-7 валка будут равны:

$$y_1 = y_0 + z_1 \cdot \varphi_0; \quad (2.68)$$

$$y_2 = y_0 + z_2 \cdot \varphi_0 - \frac{M_2^{P1}}{EI}; \quad (2.69)$$

$$y_3 = y_0 + z_3 \cdot \varphi_0 - \frac{(M_3^{P1} - M_3^{R2})}{EI}; \quad (2.70)$$

$$y_4 = y_0 + z_4 \cdot \varphi_0 - \frac{(M_4^{P1} - M_4^{R2})}{EI} + \frac{M_4^q}{EI}; \quad (2.71)$$

$$y_5 = y_0 + z_5 \cdot \varphi_0 - \frac{(M_5^{P1} - M_5^{R2})}{EI} + \frac{M_5^q}{EI}; \quad (2.72)$$

$$y_6 = y_0 + z_6 \cdot \varphi_0 - \frac{(M_6^{P1} - M_6^{R2})}{EI} + \frac{(M_6^q - M_6^{qд})}{EI}; \quad (2.73)$$

$$y_7 = y_0 + z_7 \cdot \varphi_0 - \frac{(M_7^{P1} - M_7^{R2} - M_7^{R2})}{EI} + \frac{(M_7^q - M_7^{qд})}{EI}. \quad (2.74)$$

Таким образом, получены аналитические зависимости для определения прогибов безопорного нажимного валка в любом по длине сечении, а также разработана программа автоматического расчета прогибов.

## 2.7 Численное исследование математической модели

### 2.7.1 Сравнительный анализ параметров формоизменения заготовки

Конечно-элементное моделирование формовки проведено в программе Marc.Mentat в 2D постановке. Конечно-элементная модель состоит из верхнего и нижних валков, которые заданы как абсолютно жесткие тела, и заготовки состоящей из шести слоев конечных элементов.

Механические свойства модели заготовки соответствовали стали группы прочности X70, для которой: плотность  $\rho = 7,7 \text{ г/см}^3$ , модуль упругости  $E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ , предел текучести  $\sigma_T = 550 \text{ МПа}$ , модуль упрочнения  $\Pi = 3 \cdot 10^3 \text{ МПа}$ . Толщина заготовки, диаметры верхнего валка, и параметры настройки валков варьировались в соответствии с данными таблицы 2.3.

Таблица 2.3 – Сравнительные результаты теоретических расчетов радиусов формовки в первом проходе с результатами, полученными на цифровой модели.

Исходные данные				D <sub>теор</sub> , мм	D <sub>циф</sub> , мм	Ошибка, %
Толщи на стенки h, мм	Раствор L, мм	Перемеще ние Δ, мм	Диаметр верхнего вала Rв, мм			
18	800	85	900	1309	1449	+10,7
24	800	81	900	1318	1433	+8,7
30	800	78	900	1336	1429	+6,9
25,4	800	100	780	1018	1038	+1,96
30	700	70,2	780	1099	1164	-5,9
25,8	800	79,5	780	1254	1420	+13,2
25,4	600	65	300	632	680	+7,59

В таблице 2.3 показаны результаты сравнения радиусов заготовки на выходе из очага деформации, рассчитанных по теоретическим формулам и полученных с помощью средств компьютерного моделирования.

Различие радиусов заготовки после первого прохода, полученных с помощью средств компьютерного моделирования и по теоретическим формулам, находится в диапазоне от 2 до 13%.

Наибольшее расхождение результатов наблюдается на относительно тонких стенках. Очевидно, это связано с тем, что с утонением стенки отклонение реальной формы очага деформации от принятой (прямой и окружности) возрастает.

### 2.7.2 Влияние радиуса формируемой заготовки на усилие формовки.

Для инженерных расчетов параметров формовки наибольший интерес представляет усилие, действующее на верхний валок. Это обусловлено низкой жесткостью верхнего валка, относительно нижних валков, которые имеют по длине дополнительные опорные ролики для минимизации прогиба.

На основании формул (2.8-2.28) проведено численное исследование зависимости радиуса  $R_m$  формируемой заготовки на усилие  $P$  действующее на верхний валок.

На рисунке 2.24 показан график зависимости  $P(R_m)$ . При этом, принято: для материала листа предел текучести  $\sigma_T = 520 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}$ ; толщина листа  $h = 18$  мм, межцентровое расстояние валков  $L = 600$  мм, радиусы нижнего и верхнего валков соответственно  $R_H = 250$  мм,  $R_B = 150$  мм, коэффициент трения  $\mu = 0,3$ . Значения  $R_m$  варьировались в интервале от 300 до 3000 мм.

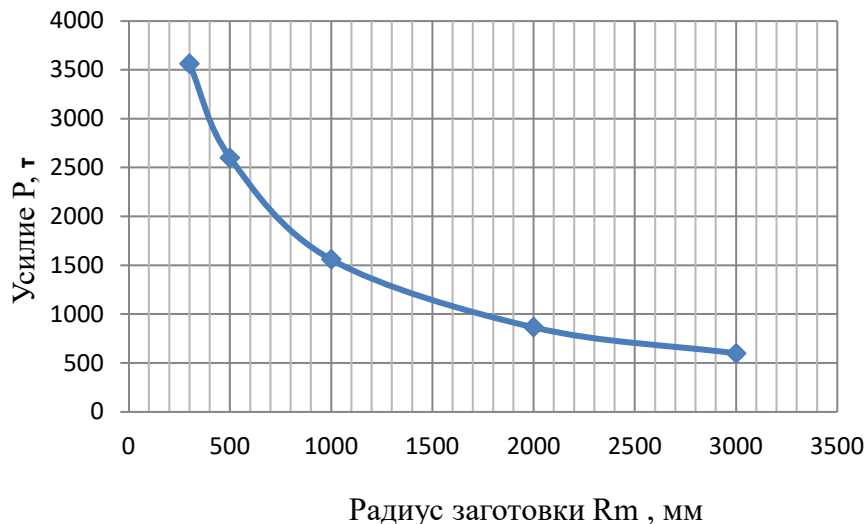


Рисунок 2.24 – Зависимость изменения усилия формовки в зависимости от радиуса заготовки

Из графика видно, что с ростом радиуса кривизны заготовки, при прочих равных условиях (постоянных  $h$ ,  $\sigma_T$ ,  $L$ ,  $R_H$ ,  $R_B$ ,  $\mu$ ) усилие формовки убывает, что согласуется с общими представлениями об упруго-пластическом изгибе стальной полосы в вальцах.

### 2.7.3 Влияние усилия противоизгиба на прогиб валка

Расчет прогибов производился для условий формовки трубы  $\varnothing 1220 \times 21,2$  мм из стали группы прочности X70. Усилие формовки рассчитывалось по формуле (2.38), что соответствовало распределённой нагрузке  $q = 866$  Н/мм.

Усилие противоизгиба  $P_{\text{пи}}$  варьировалось в диапазоне от 0 до 300 т с шагом 100 т. Диаметр верхнего валка принимался равным 900 мм.

На рисунке 2.25 представлен график зависимости прогиба валка по центру от усилия противоизгиба.

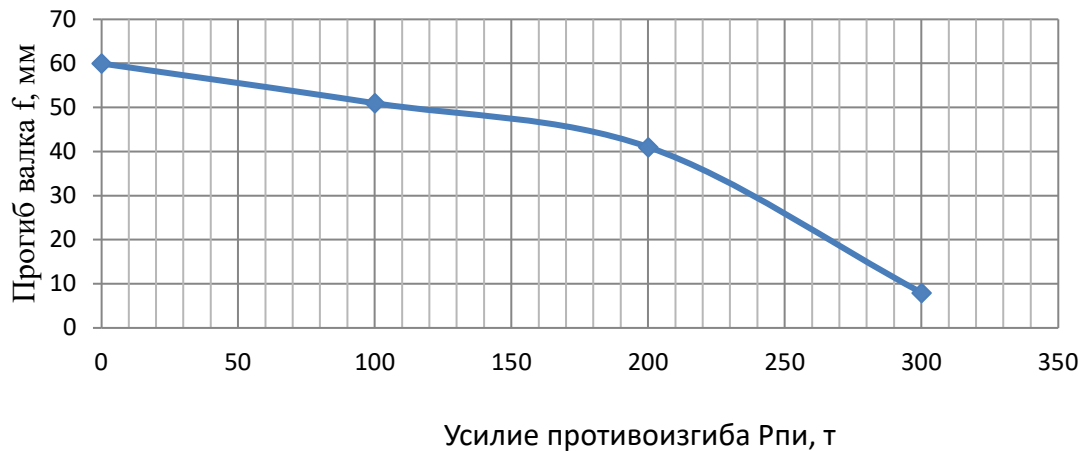


Рисунок 2.25 – Зависимость изменения прогиба валка в зависимости от усилия противоизгиба

Для принятых исходных данных и при  $P_{\text{пи}} = 100$  т, перемещения  $y_i$  в сечениях 1-7 валка (см. рисунок 2.23) составили

$$\begin{cases} y_1 = -28,3 \text{ мм;} \\ y_2 = 0,006 \text{ мм;} \\ y_3 = 10,49 \text{ мм;} \\ y_4 = 50,57 \text{ мм;} \\ y_5 = 10,49 \text{ мм;} \\ y_6 = 0,006 \text{ мм;} \\ y_7 = -28,3 \text{ мм.} \end{cases} \quad (2.75)$$

Значения перемещений удовлетворяют схеме нагружения представленной на рисунке 2.20, где в середине валка прогиб максимальный,

на опорах прогибы равны нулю, а на концах валка значения перемещения обратного знака.

В качестве примера произведем расчет прогиба валка при условии, что усилие противоизгиба  $P_{\text{пи}}=0$ . Такая силовая схема является типовой и имеет готовое решение в литературе, например в работе [85], где максимальный прогиб  $y_{P0}$  определяется из выражения

$$y_{P0} = \frac{(B^3 \cdot q) \cdot \left(2 \cdot L - \frac{B}{2}\right)}{192 \cdot E \cdot I} - \frac{q \cdot B \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I}, \quad (2.76)$$

где  $B$  – ширина листа;

$L$  – расстояние между цилиндрами  $X_1$  и  $X_2$ .

Подставив  $B = 12000$  мм,  $L = 13900$  мм и  $q = 865,9$  Н/мм, получим:

$$y_{P0} = -60,84 \text{ мм.}$$

Рассчитав перемещения при  $P=0$  согласно формулам раздела 2 настоящей работы, получим:

$$y_{P0}^{\text{МНП}} = 60,68 \text{ мм.}$$

Различие в знаках, объясняется выбором направления приложения распределенной нагрузки.

## **2.8 Разработка программы для расчета технологических и энергосиловых параметров трехвалковых листогибочных машин**

На основе разработанной математической модели была разработана программа «ТЭСЦ.Технолог», предназначенная для расчета технологических и энергосиловых параметров процесса формовки листовой заготовки в трехвалковой листогибочной машине (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017611243, см. Приложение Б).

Программа (Рисунок 2.26) позволяет на основе исходных данных, включающих механические свойства материала, параметры готовой трубы, коэффициент экспандирования, диаметры опорных и нажимных валков, количество проходов, распределение деформаций по проходам, вычислять



величину перемещения нажимного вала в соответствующем проходе, а также изгибающий момент и усилия, действующие на валки в процессе формовки, угловые координаты точек контакта валков с заготовкой и максимальные деформации в соответствующем проходе. Программа позволяет проводить расчеты от одного до четырех проходов деформации заготовки. Применение программы дает возможность оперативно и с достаточной степенью точности производить инженерные расчеты для настройки трехвалковых листогибочных машин на заданный профилаэрозмер.

**ИСХОДНЫЕ НАСТРОЙКИ ЛЕМ**

Расстояние между нижними валками L, мм: 600  
 Диаметр верхнего вала, Da (мм): 900  
 Количество проходов: [выпадающий список]  
 Форма поперечного сечения заготовки на выходе: [выпадающий список]

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ПО ПРОХОДАМ**

Проход	%	$\epsilon$	R, мм
1 проход	50	1.506	1213.302
2 проход	30	2.409	765.064
3 проход	15	2.861	647.106
4 проход	5	3.012	615.651

**ДРУГИЕ ПАРАМЕТРЫ**

Погружение позиционирования, мм: 10  
 Межкромочный зазор после формовки, мм: 70  
 Коэффициент экспандирования K<sub>э</sub>: 0.009

**СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ**

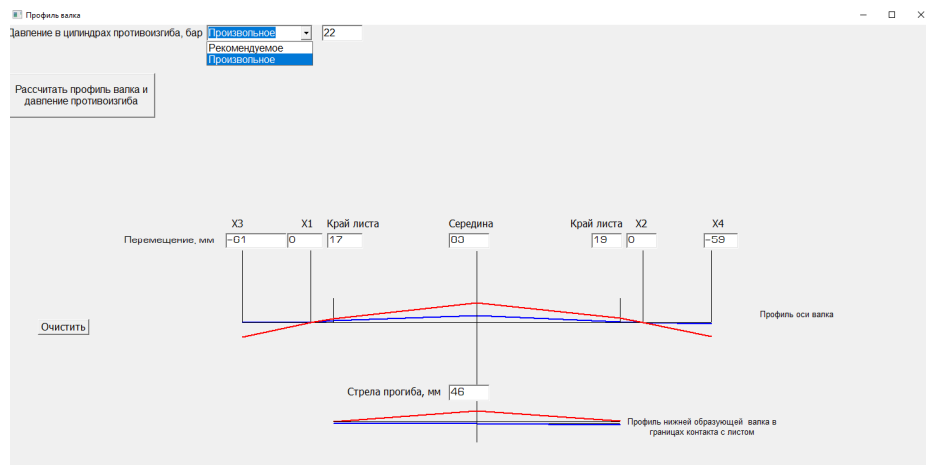
Максимально допустимое погружение H<sub>max</sub>, мм: 118.184  
 Внутренний диаметр после формовки D н ф, мм: 1159  
 Внутренний диаметр после сборки D с с, мм: 1137  
 Деформация после формовки, %: 3.012  
 Ширина листа L, мм: 5686.166

0 ПАРАМЕТРЫ

1 Подгиб	2 1 проход	3 2 проход	4 3 проход	5 4 проход	6 Надав	7 Надав
1 Технологические:						
2 Погружение H, мм	10	38.227	74.645	91.695	98.488	
3 Координата X1, X2	886.146	943.562	979.98	997.03	1003.823	
4 Начальная координата Z	0	-506.399	2353.461	-583.555	2410.259	1858
5 Конечная координата Z	-506.399	2353.461	-583.555	2410.259	-583.555	-88
6		532.421				
7 Геометрические:						
8 Радиус на выходе R, мм		1213.288	765.051	647.096	615.649	
9 Длина левой полки, мм		425.919	340.229	289.496	265.483	
10 Длина правой полки, мм		425.919	340.229	289.496	265.483	
11 Межкромочный зазор, мм		0	0	0	0	
12						
13 Энергосиловые:						
14 Усилие P1 (правый), кН		6988	372	1750	1303	
15 Усилие P2 (левый), кН		4971	1328	915	1828	
16 Усилие P3 (верхний), кН		11717	1584	2779	2376	
17 Крутящий момент M1 (правый), Нм		294	171	209	216	
18 Крутящий момент M2 (левый), Нм		281	177	204	219	
19 Крутящий момент M3 (верхний), Нм		958	590	712	746	
20 Изгибающий момент		1839117	1513009	1947625	1947620	
21						
22 Прочие:						
23 Коэфф. распуливания		0.91	0.942	0.95	0.952	
24 Угол $\alpha_1$ (правый)		14.257	18.807	26.693	27.133	
25 Угол $\alpha_2$ (левый)		6.029	22.739	24.671	28.109	
26 Угол $\alpha_3$ (верхний)		6.029	5.558	4.646	2.998	
27 Деформация до распуливания		1.657	2.563	3.016	3.167	

Сформировать FPS №Ф-40

а)



б)

Рисунок 2.26 – Интерфейс программы для ЭВМ:

а – окно расчета параметров формоизменения; б – окно расчета прогиба вала.

## 2.9 Выводы по главе 2

1. Разработана технология формовки, при которой в начале прохода за счет синхронного вращения валков и погружения верхнего валка трубная заготовка имеет меньшую неравномерность деформации в поперечном сечении в области перехода плоского участка в основной периметр, а привод валков подвергается меньшим нагрузкам по крутящему моменту.

2. Разработана математическая модель формовки листа, позволяющая определять основные технологические параметры процесса формовки, как по новой технологии, так и по классической.

Полученные зависимости позволяют определять геометрические параметры заготовки – радиус заготовки после формовки, длину плоских участков; настроечные параметры валков – перемещение верхнего валка, углы поворота валков; энергосиловые параметры процесса – усилия и крутящие моменты на валках.

3. Разработана методика расчета величины прогиба верхнего валка, позволяющая определять необходимое усилие противоизгиба, которое обеспечивает постоянную величину межкромочного зазора и равномерность остаточных напряжений по длине трубной заготовки.

### 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМОВКИ В ВАЛЬЦАХ

#### 3.1 Экспериментальное определение коэффициента трения в условиях вальцевой формовки

Для определения коэффициента трения в условиях идентичных условиям формовки применялся метод принудительного торможения полосы в валках [88,89]. В качестве экспериментальной машины был выбран двухклетевой прокатный стан «дуо 180» (Рисунок 3.1). Для создания тормозных сил было изготовлено специальное тормозное устройство.

Рабочая клеть стана выполнена в виде двух станин закрытого типа (1), установленных на плитовину (2) и связанных в единую несущую конструкцию.

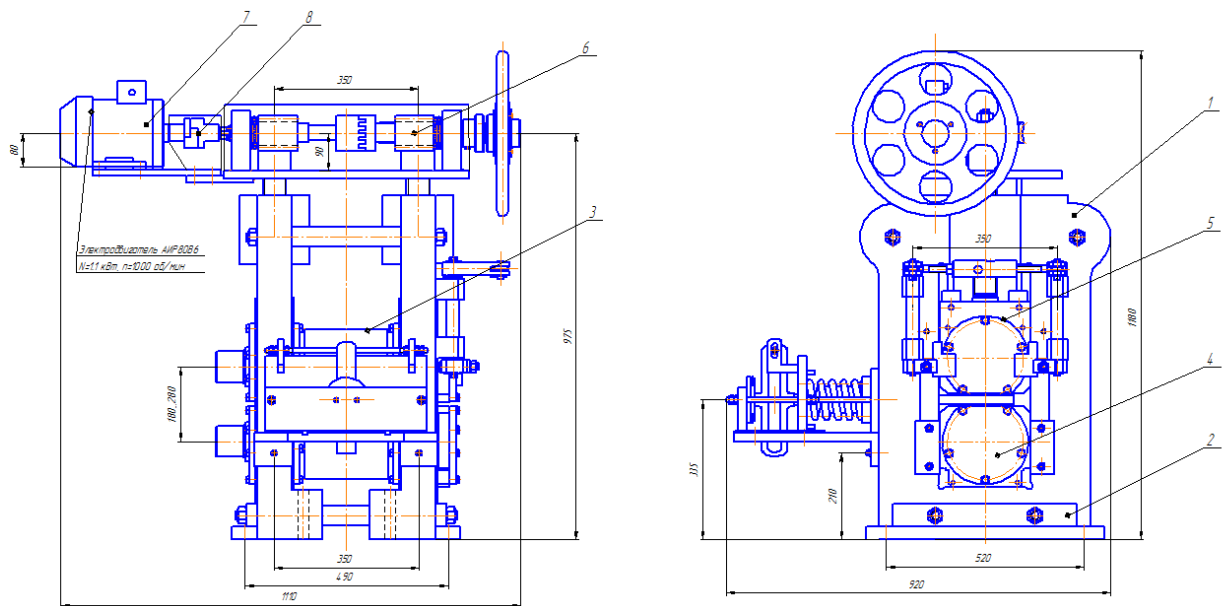


Рисунок 3.1 – Прокатная клеть дуо 180

В станине установлены валки с гладкой бочкой (3) диаметром 170 мм и длиной бочки 200 мм. Валки выполнены из стали 9Х2ФМ, обработаны до чистоты рабочей поверхности Ra 3,2 и термически обработаны до твердости ~90 HS (от 58 до 60 HRC). Валки установлены в подушках на подшипниках

качения и могут свободно в них вращаться. Подушки нижнего валка (4), а значит и сам нижний валок, установлены в станине неподвижно, т.е. не могут перемещаться вертикально.

Блок верхнего валка (5) может перемещаться под действием червячно-винтового нажимного механизма (6) от электропривода (7) и сблокированного через кулачковую муфту (8) штурвала.

Управление станом осуществляется дистанционно с пульта управления, который наряду с органами управления оборудован персональным компьютером для расчета, визуализации и регистрации измеряемых параметров.

### **3.1.1 Устройство для создания тормозных сил и контрольно-измерительные средства**

Клеть «дуо 180» позволяет приложить к образцу усилие  $P$  и изменять значение этого усилия в диапазоне возможностей нажимного механизма, которым она оборудована.

Привод вращения валков позволяет приложить тяговое усилие  $F$ , мощности которого достаточно, чтобы довести процесс до буксования во всем диапазоне возможных усилий  $P$  и коэффициентов трения  $\mu$ .

Задача состояла в обеспечении тормозящих сил, противоположенных тяговым силам.

Несущая конструкция устройства для создания тормозящих сил была выполнена в виде балки (1) (Рисунок 3.2, а), которая крепится к станине (5) прокатной клетки. В балке выполнено два отверстия, по высоте совпадающие с уровнем межвалкового зазора. Через эти отверстия пропущены шпильки (2), на которых в пространстве между валками и балкой закреплен гайками щелевой захват для фиксации образца при нагружении.

Создание тормозящих сил, монотонно растущих в процессе движения образца, обеспечивается установкой между задней траверсой (3) и балкой (1)

пружины (4), которая, в свою очередь, зафиксирована центрирующим пальцем, приваренным к задней траверсе.

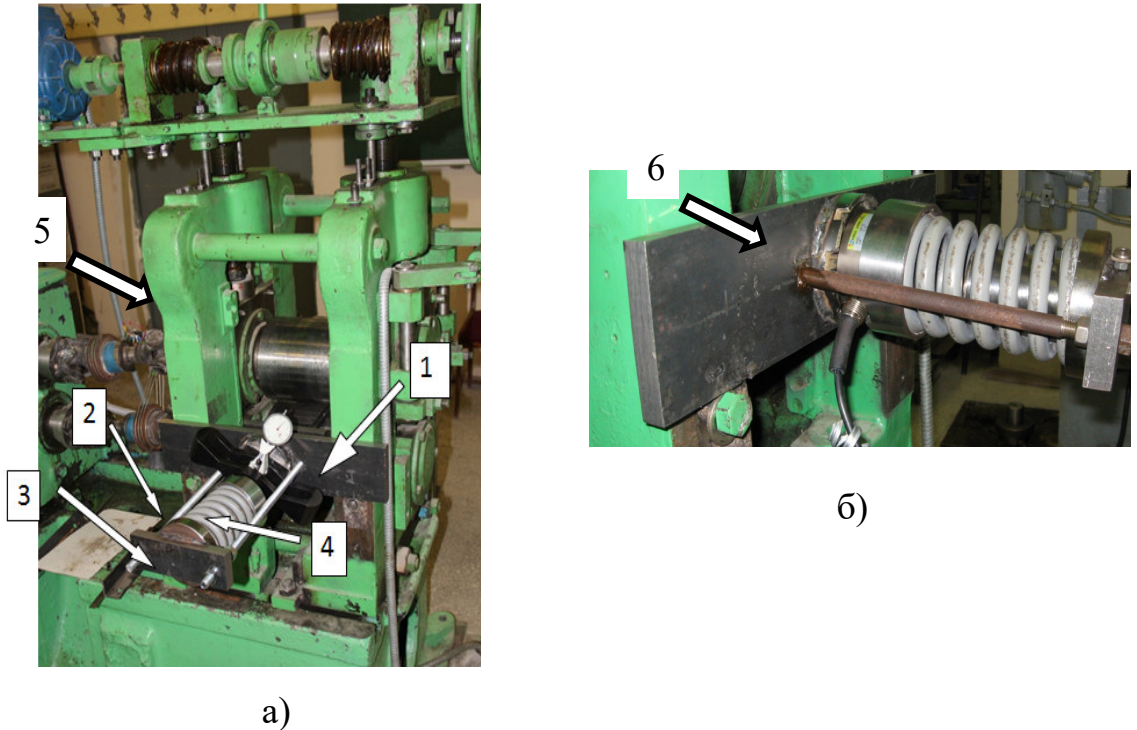


Рисунок 3.2 – Устройство торможения (а) и месдоса СМ –Т5 (б)

Таким образом, задняя траверса, шпильки и захват образуют раму, в которой в плоскости симметрии по высоте установлена пружина. Рама может свободно перемещаться в направлении движения образца до упора пружины с дальнейшим ростом усилия торможения, которое препятствует этому перемещению и создается действием пружины между задней траверсой и балкой.

Для измерения действующих на валки усилий в стане «дуо 180» между подушками верхнего валка и нажимными винтами установлены 2 месдозы (б) типа СМ –Т5 (Рисунок 3.2, б).

Измерение крутящих моментов осуществляется с использованием тензодатчиков, наклеенных по классической схеме – под углом 45 градусов к оси вращения шпинделей.

На одном из торцов упомянутой месдозы выполнен сферический выступ, за счет которого происходит самоустановка и компенсация непараллельности поверхностей, на которые опирается месдоза.

Проверка, включая целенаправленное проворачивание месдозы в различные азимутальные положения, подтвердила хорошую стабильность сигнала в идентичных условиях нагружения.

### 3.1.2 Программа эксперимента и материалы

Целью проведения эксперимента являлось определение коэффициента взаимосвязи фрикционных сил и сил прижатия контактирующих поверхностей в условиях, приближенных к условиям формовки на ЛГМ.

Для реализации цели эксперимента образец должен был иметь характеристики поверхности, соответствующие трубному штрипсу, поэтому были изготовлены образцы из листа толщиной 20 мм и шириной 75 мм из низкоуглеродистой микролигированной стали после горячей прокатки.

Образцы устанавливались между валками, зажимались между валками посредством нажимного механизма и протягивались под этой нагрузкой приводом вращения валков силами ( $F_{тр1} + F_{тр2}$ ), с приложением тормозящей силы  $F_{торм}$ , противоположенной направлению движения, вплоть до возникновения буксования (Рисунок 3.3).

Эти условия в полной мере соответствуют условиям формовки в диапазоне от оптимального режима работы приводов валков, когда эти скорости согласованы со скоростью штрипса с учетом деформации при изгибе, до буксования, когда имеет место рассогласование соответствующих скоростей.

Усилие прижатия  $P$  варьировалось в соответствии с диапазоном усилий формовки при изготовлении труб из материалов различных категорий прочности и с различными значениями отношения  $R/h$ .

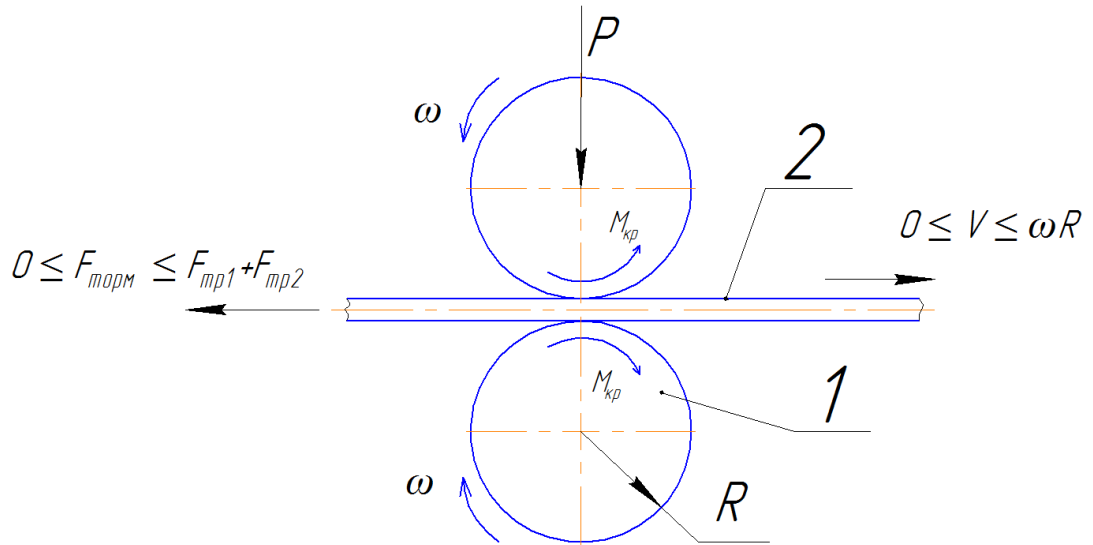


Рисунок 3.3 – Схема приложения нагрузок к образцу: 1– валки; 2– образец

Таким образом, для реализации цели эксперимента была технически обеспечена возможность приложения нагрузок соответствующей локализации, направления и уровня, варьирования этими нагрузками и регистрации соответствующих параметров процесса.

В эксперименте настройки выполнялись таким образом, что буксование в каждом опыте возникало на новой, «нетронутой» области поверхности образцов, чем обеспечивалась идентичность условиям реальной технологии. Одна серия образцов не подвергалась обезжириванию, а ещё одна обезжиривалась путем кратковременного воздействия высокой ( $800^{\circ}\text{C}$ ) температуры. За счет малого времени воздействия состав окалины поменяться не мог, а инородные вещества, которые могли находиться в порах окалины, были удалены. Третья серия образцов обезжиривалась спиртом.

### 3.1.3 Методика проведения эксперимента

Для оценки влияния технологического усилия настройки менялись таким образом, что погонное усилие варьировалось в диапазоне от 84 до 322 Н/мм.

Последовательность действий в эксперименте соответствовала следующему алгоритму:

1. Настройка межвалкового зазора и обезжиривание валков;
2. Установка образца в захват и обезжиривание образца;
3. Установка усилия прижатия;
4. Включение привода вращения валков;
5. Регистрация момента времени пробуксовки;
6. Остановка привода вращения;
7. Регистрация максимального усилия торможения;
8. Расчет коэффициента трения.

В процессе каждого испытания с пульта управления станом регистрировались значения тяговых усилий и усилий прижатия валков (Рисунок 3.4). Исходя из данных диаграмм определялся коэффициент трения.



Рисунок 3.4 – Диаграммы измеряемых нагрузок: 1– тяговое усилия; 2– усилие прижатия.

### 3.1.4 Анализ результатов эксперимента

Коэффициент трения рассчитывался по формуле:

$$\mu = \frac{F_{\text{торм}}}{2P}. \quad (3.1)$$

Для оценки достоверности полученных результатов применялись методы статистической обработки данных [76],[78]. Среднее значение коэффициента трения определялось по формуле:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i, \quad (3.2)$$

где  $n$  – число вариантов.



Среднее отклонение  $S$  и доверительный интервал  $\Delta x$  определялись по формулам:

$$S = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}}; \quad (3.3)$$

$$\Delta x = t \cdot \frac{S}{\sqrt{n}}, \quad (3.4)$$

где  $t=0,95$ -коэффициент Стьюдента.

Значения за фиксированных силовых параметров с месдоз и расчетные значения коэффициента трения приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты эксперимента по определению коэффициента трения на контакте штрипса и инструмента

№ серии	Группа прочности	Подготовка поверхности*	Усилие торможения $F_{\text{орм}}$ , кН	Полное усилие $P$ , кН	Погонное давление $P_{\text{п}}$ , Н/мм	Коэффициент трения $\mu^{**}$
1	2	3	4	5	6	7
1	X70	H/O	2,56	7,29	97,22	0,175
2	X70	H/O	4,49	7,76	103,46	0,289
3	X55	O	3,87	7,29	97,24	0,265
4	X70	O	3,03	6,32	84,29	0,240
5	X70	O	4,61	9,86	131,49	0,233
6	X70	H/O	7,27	16,09	214,57	0,225
7	X70	H/O	5,76	15,33	204,50	0,187
8	X70	O	7,82	15,44	205,97	0,253
9	X55	O	6,89	14,22	189,61	0,242
10	X70	T/O	5,76	9,52	126,93	0,302
11	X70	T/O	7,50	15,82	210,93	0,237
12	X70	T/O	9,94	17,92	238,93	0,277
13	X55	T/O	12,49	21,57	287,70	0,289
14	X70	T/O	8,28	18,41	245,57	0,224
15	X70	T/O	11,81	24,18	322,46	0,244
Среднее значение $\bar{x}$						0,245
Стандартное отклонение $S$						0,035
Доверительный интервал $\Delta x$						0,008

\*Н/О – необезжиренная поверхность, О – обезжиренная поверхность, Т/О – термообработанная поверхность.

\*\* – среднее значение для серии из трех опытов.

Таким образом с вероятностью 95% коэффициент трения в условиях вальцевой формовки можно считать равным  $\mu = 0,245 \pm 0,035$ .

На рисунке 3.5 результаты экспериментального определения коэффициента трения представлены в виде графика зависимости коэффициента трения от погонного усилия. Как видно из графика, коэффициент трения незначительно увеличивается с ростом погонного усилия.

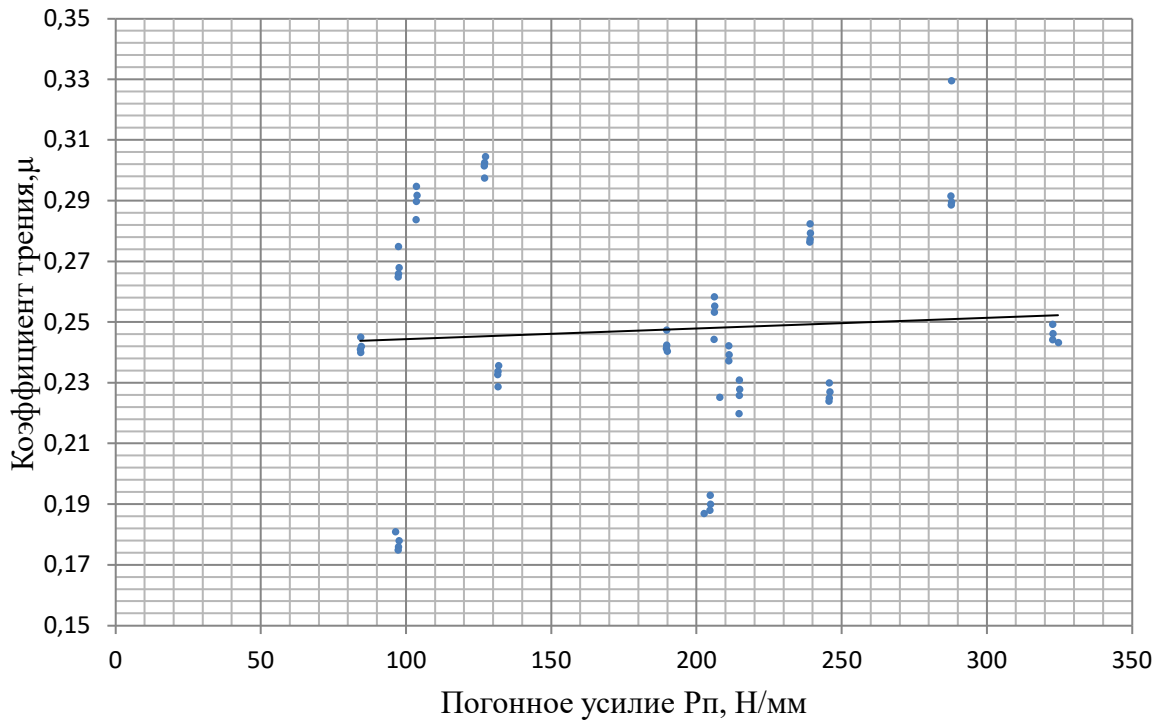


Рисунок 3.5 – График зависимости коэффициента трения от погонного усилия

Ожидаемо получено, что на образцах, которые не были обработаны после станочной резки коэффициент трения был меньше, чем на обезжиренных образцах. На термообработанных образцах коэффициент трения принимал наибольшее значение.

Таким образом, результаты экспериментального определения коэффициента трения согласуются с общими принципами трибологии и теории контактного трения и их можно считать адекватными.

### **3.2 Экспериментальное определение остаточных напряжений в трубной заготовке после вальцевой формовки**

Процесс формовки трубной заготовки в вальцах сопровождается неравномерностью деформации в продольном направлении по причине прогиба безопорного валка.

Нарушение равномерности деформации при выполнении формообразующих операций неизбежно приводит к появлению остаточных напряжений.

Из анализа методов и средств для определения остаточных напряжений следует, что применение рентгеновских, акустических, оптических методов [90] и методов основанных на изменении магнитных свойств материалов [91], с учетом габаритов объекта исследования, состояния поверхности горячекатаного листа, реальных условий технологического процесса передела «лист-труба» не представляется возможным.

Метод оценки остаточных напряжений по твердости [92] требует подготовки поверхности, что затруднительно на крупных образцах, а результаты, недостаточно достоверны, поскольку являются косвенными.

Для исследований остаточных напряжений в полых цилиндрах известен метод Г.Закса, при котором при послойном удалении слоев с помощью средств тензометрии измеряются деформации исследуемого объекта. Однако, получаемые при этом методе перемещения довольно малы и их измерение сопровождается большими погрешностями. Кроме этого, применение тензометрии в условиях реального производства весьма затруднительно, а удаление слоев на трубе большого диаметра практически нереально.

С учетом этих обстоятельств, в качестве базового выбран метод колец, изложенный в работах Н.Н.Давиденков и И.А.Биргера, который предполагает разрезку кольца вдоль образующей и последующее снятие слоев травлением или механической обработкой [55],[56].

Этот метод основан на принципе приложения обратных остаточных напряжений на поверхностях объекта исследования при разрезе или снятии слоев. В результате, образуется новая взаимно уравновешенная система, которая деформирована в соответствии с напряженно-деформированным состоянием, сформированным с учетом этих дополнительных напряжений.

В качестве средства послойного удаления металла в эксперименте применялось электрохимическое травление, поскольку механическое удаление с криволинейных образцов переменной кривизны технически сложно реализуемо, а наклеп от действия инструмента создает дополнительные напряжения, величину которых определить практически невозможно, поскольку их нельзя выделить из общих напряжений.

При планировании эксперимента учитывалось, что в процессе отбора образцов происходит поэтапная разгрузка, поэтому после каждой операции, начиная с отбора темплетов, проводились измерения для прослеживания картины формирования напряжений на конечных образцах.

Согласно программе эксперимента, в соответствии с рисунком 3.6, от трубной заготовки отрезалось кольцо шириной  $B=330$  мм, затем, из области основного периметра на три часа и области перегибов вырезались темплеты, которые в дальнейшем распускались на полосы шириной  $b=30$  мм. Поскольку отбор кольца и темплетов выполнялся при помощи огненной резки, перед вырезкой образцов у темплета удалялась зона термического влияния.

Контроль изменения кривизны темплетов осуществлялся, непосредственно, после формовки трубной заготовки затем, после отрезки кольца от заготовки, после вырезки темплетов из кольца и после порезки темплетов на образцы.

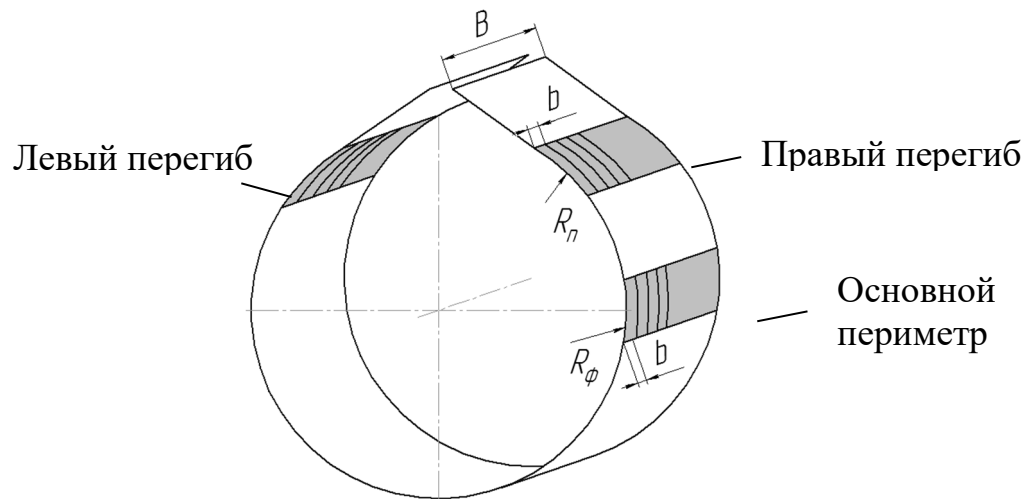


Рисунок 3.6 – Схема вырезки образцов от кольца после формовки

Предварительно от недоформованных плоских участков было отобрано по три образца для определения механических характеристик в продольном и поперечном направлениях. Механические характеристики и типовая диаграмма растяжения приведены в таблице 3.2 и на рисунке 3.7 соответственно.

Таблица 3.2 – Механические характеристики листа в продольном и поперечном направлениях

№ п/п	№ обр.	Диаметр образца, мм	Временное сопротивление, $\sigma_B$		Предел текучести, $\sigma_{0,2}$	
			Н/мм <sup>2</sup>	Сред.значение	Н/мм <sup>2</sup>	Сред.значение
1	⊥ 1	9,01	641	640,3	549	545,6
2	⊥ 2	9,05	639		543	
3	⊥ 3	9,02	641		545	
4	∥ 1	8,99	612	612	515	515
5	∥ 2	9,01	613		518	
6	∥ 3	8,99	611		514	

Величина остаточных напряжений в трубной заготовке после формовки  $\sigma_{ост}$  равна сумме снятых напряжений после каждой стадии порезки:

$$\sigma_{ост} = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \sigma_4, \quad (3.1)$$

где  $\sigma_1$  – напряжения снимаемые после отрезки кольца;

$\sigma_2$  – напряжения снимаемые после вырезки темплета из кольца;

$\sigma_3$  – напряжения снимаемые при порезке темплетов на образцы;

$\sigma_4$  – напряжения снимаемые при травлении образцов.

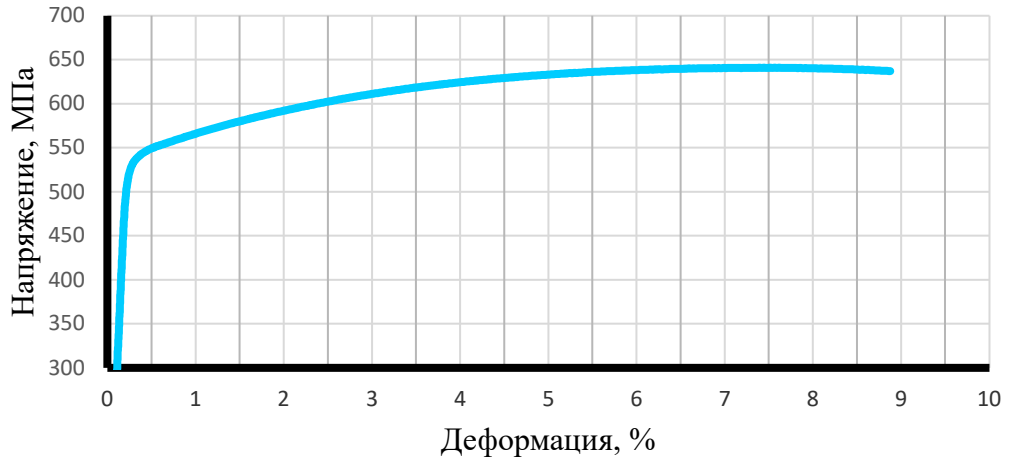


Рисунок 3.7 – Диаграмма растяжения поперечного образца

В таблице 3.3 приведены результаты измерения кривизны темплетов в ходе отбора образцов.

Таблица 3.3. Результаты контроля радиусов темплетов в ходе отбора образцов (в миллиметрах)

Место вырезки темплета	Код образца	Внутренний диаметр темплета			Внутренний диаметр образца	Толщина образца
		До отрезки кольца	После отрезки кольца	После вырезки из кольца		
Основной на 3ч	ФО1	1418,6	1401,6	1373,05	1366,28	26,30
	ФО2				1366,28	26,20
	ФО3				1366,28	26,17
Перегиб на 11ч (левый)	ФПЛ1	924,2	985,5	979,20	976,67	26,11
	ФПЛ2				984,60	26,17
	ФПЛ3				979,30	26,22
Перегиб на 1ч (правый)	ФПП1	919	985,5	980,30	971,46	26,30
	ФПП2				980,62	26,27
	ФПП3				987,27	26,18

Как показали измерения, кривизна темплетов при вырезке из кольца и при порезке образцов изменилась несущественно, соответственно, величина напряжений  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$  значительно меньше по сравнению с  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$ , что позволяет пренебречь этими напряжениями.

В связи с принятыми допущениями остаточные напряжения равны:

$$\sigma_{\text{ост}} = \sigma_1 + \sigma_4. \quad (3.2)$$

Незначительные деформации при раскрое кольца на темплеты и их порезке на образцы позволяют полагать, существенную роль играет соседний по длине участок, т.е. подтверждается существенная неравномерность перемещения по длине очага деформации.

### 3.2.1 Остаточные напряжения, снимаемые при отрезки кольца

Как видно из рисунка 3.8, при отрезке кольца от трубной заготовки после формовки имело место уменьшение его диаметра. Замеры показали (см.таблицу 3.3), что после отрезки кольца диаметр темплета уменьшился на 17 мм, а затем еще на 28,5 мм при вырезки темплета из кольца. Итого суммарное уменьшение  $\delta$  диаметра составило 45,5 мм.

Такое поэтапное уменьшение диаметра темплета, очевидно, связано с тем, что в момент отрезки кольца остаточные напряжения снялись неполностью из-за контакта кромок друг с другом.

Для определения снимаемых при отрезке кольца напряжений  $\sigma_1$ , справедливо будет применить методику, применяемую при распиле кольца вдоль образующей, поскольку сдерживающее усилие для данного случая создается соседним по длине участком заготовки.

Если уменьшение диаметра  $\delta$  вызвано действием изгибающего момента  $M_p$ , созданного остаточными напряжениями  $\sigma_1$ , то величина  $\delta$  равна [56]:

$$\delta = \frac{D_{\text{ср}}^2}{2EI} M_p, \quad (3.3)$$



Рисунок 3.8 – Изменение диаметра кольца в результате отрезки от трубной заготовки

где  $EI$  – жесткость кольца на изгиб;  $D_{cp}$  – средний диаметр кольца.

Снимаемое напряжение  $\sigma_1$  в слое на расстоянии  $a$  от наружной поверхности равно:

$$\sigma_1(a) = \frac{M_p}{I} \left( \frac{h}{2} - a \right) \quad (3.5)$$

или, с учетом (3.3)

$$\sigma_1(a) = 2 \frac{E\delta}{D_{cp}^2} \left( \frac{h}{2} - a \right). \quad (3.6)$$

Тогда, приняв  $a = 0$ ,  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа,  $h=26,2$ мм,  $D_{cp} = 1412,3$  мм получим максимальное напряжение на поверхности кольца, равное:

$$\sigma_1^{max} = 124,36 \text{ МПа.}$$

Поскольку после отрезки кольца произошло его диаметра кольца, то остаточные напряжения на внешней поверхности были сжимающие, а на внутренней – растягивающие.



### 3.2.2 Остаточные напряжения, снимаемые при удалении слоев

Перед началом травления образцов, с целью прогнозирования ожидаемых результатов и определения границ снимаемых слоев при травлении, производился расчет остаточных напряжений по теоретическим формулам.

В качестве аппроксимирующей зависимости кривой  $\sigma(\varepsilon)$  была принята билинейная кривая с линейным упрочнением в пластической области.

При расчете остаточных напряжений для образца основной части периметра заготовки, который имеет остаточный фактический радиус по наружной поверхности  $\rho_{\text{ост}}^{\phi} = 725,82$  мм и толщину  $h=26,2$  мм, радиус под нагрузкой составил  $\rho_{\text{нагр}} = 592$  мм. Значение  $\rho_{\text{нагр}}$  получено методом последовательных приближений и дает расчетный остаточный радиус  $\rho_{\text{ост}}^p = 725,92$  мм.

Тогда, высота упругого слоя равна:

$$\frac{h_1}{2} = \varepsilon_T \cdot \rho_{\text{ост}}^{\phi} = 0,0027 \cdot 592 = 1,59 \text{ мм.} \quad (3.7)$$

Если принять билинейную модель поведения материала, то изгибающий момент  $M_{\text{нагр}}$  равен:

$$M_{\text{нагр}} = 2 \left( \int_0^{\frac{h_1}{2}} \sigma_T \cdot \frac{y}{h_1} \cdot b \cdot y \cdot dy + \int_{\frac{h_1}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_s \cdot y \cdot b \cdot dy \right), \quad (3.8)$$

где  $b = 12000$  мм – ширина листа;

$\sigma_T = 545$  МПа – предел текучести материала;

$\sigma_s = 610$  МПа – напряжения на поверхности образца.

В соответствии с выражением (3.7) остаточные напряжения на расстоянии  $\frac{h}{2}$  от нейтральной линии равны:

$$\sigma_{\text{ост}}^{h/2} = \sigma_T - \frac{6M_{\text{нагр}}}{bh^2} = -299,5 \text{ МПа,} \quad (3.8)$$

а на расстоянии  $\frac{h_1}{2}$

$$\sigma_{\text{ост}}^{h_1/2} = \sigma_T - \frac{6M_{\text{нагр}}}{bh^2} \cdot \frac{h_1}{h} = 495,18 \text{ МПа} \quad (3.9)$$

Для сравнения с билинейной моделью с упрочнением рассчитаем остаточные напряжения для материала без упрочнения.

Если материал не упрочняется, то изгибающий момент  $M'_{\text{нагр}}$  определяется по выражению:

$$M'_{\text{нагр}} = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma y b dy = \frac{1}{4} \sigma_T b (h^2 - h_1^2)^2 + \frac{1}{6} \sigma_T b h_1^2, \quad (3.10)$$

тогда остаточные напряжения на расстоянии  $\frac{h}{2}$  от нейтральной линии равны:

$$\left(\sigma_{\text{ост}}^{h/2}\right)' = \sigma_s - \frac{6M_{\text{нагр}}}{bh^2} = -271,48 \text{ МПа}, \quad (3.11)$$

а на расстоянии  $\frac{h_1}{2}$ :

$$\left(\sigma_{\text{ост}}^{h_1/2}\right)' = \sigma_T - \frac{6M_{\text{нагр}}}{bh^2} \cdot \frac{h_1}{h} = 495,18 \text{ МПа} \quad (3.12)$$

Знак «-» в численных результатах выражений (3.8) и (3.11) означает, что напряжения сжимающие.

Таким образом, для данных условий эксперимента, пренебрежение упрочнением в расчете остаточных напряжений в поверхностных слоях, вносит погрешность не более 10%.

В соответствии с рисунком 3.9, на эпюре остаточных напряжений

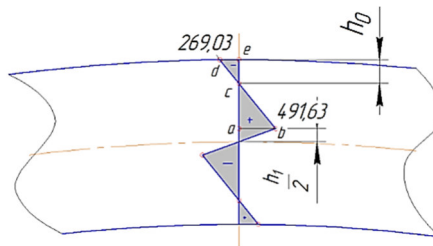


Рисунок 3.9 – Эпюра остаточных напряжений

координата  $h_0$  является границей между слоями с растягивающими и сжимающими напряжениями. Поскольку треугольники  $abc$  и  $cde$  являются подобными, то:

$$h_0 = \frac{\frac{h}{2} - h_1}{1 - \frac{\sigma_{\text{ост}}^{h_1/2}}{\sigma_{\text{ост}}^{h/2}}} = 4,07 \text{ мм.} \quad (3.13)$$

В таблице 3.4 приведены расчетные параметры, характеризующие распределение остаточных напряжений по толщине стенки для остальных образцов.

Таблица 3.4 – Результаты расчета остаточных напряжений после формовки

Место вырезки темплета	Код образца	Внутренний диаметр образца, мм	Толщина образца, мм	$\sigma_{\text{ост}}^{h/2}$ , МПа	$\sigma_{\text{ост}}^{h_1/2}$ , МПа	$h_0$ , мм	$\frac{h_1}{2}$ , мм
Основной на 3 ч	ФО1	1366,28	26,20	299,91	497,11	4,085	1,53
	ФО2	1361,14	26,20	299,96	497,37	4,086	1,52
	ФО3	1366,28	26,17	299,93	497,23	4,081	1,53
Перегиб на 11 ч (левый)	ФПЛ1	976,67	26,17	302,00	508,25	4,15	1,17
	ФПЛ2	981,94	26,17	301,97	508,04	4,14	1,18
	ФПЛ3	979,30	26,22	302,00	508,23	4,15	1,17
Перегиб на 1 ч (правый)	ФПП1	971,46	26,30	302,04	508,51	4,17	1,17
	ФПП2	980,62	26,27	302,04	508,47	4,16	1,17
	ФПП3	987,37	26,18	301,95	507,92	4,15	1,18

Результаты расчета показывают, что остаточные напряжения на участке перегиба и основного периметра несколько различаются (на  $\sim 11$  МПа) на расстоянии  $\frac{h_1}{2}$  от нейтральной линии поперечного сечения, но при этом практически равны на поверхности.

После устранения влияния тела заготовки торец трубы, напряжения в отрезанном кольце снялись в результате чего произошло уменьшение диаметра кольца, а оставшейся части заготовки произошло увеличение зазора с 83 до 130 мм.

Другие остаточные напряжения (тангенциальные) относительно однородны по периметру трубной заготовки.

Из этого следует, что дополнительные остаточные напряжения возникающие при формовке обусловлены, прежде всего, неравномерностью деформаций по длине трубной заготовки из-за деформации инструмента.

### **3.2.3 Травильная установка и режимы травления**

Послойное удаление металла осуществлялось путем электрохимического травления при погружении образца в травильную ванну с таким расчетом, что удалялся слой только с наружной поверхности.

Травильная установка (рисунок 3.10) состоит из открытой полимерной ванны (1) размерами 520x130 мм, на дно которой по всей длине уложен свинцовый катод (2) толщиной 2 мм и шириной 130 мм. Для равномерного распределения токов в ванне, катод имеет токопроводящие ответвления в срединной по длине части, которые соединены параллельно с токоотводами на торцах катода.

Образец (3), выступающий в роли анода, удерживается траверсой с двумя токопроводящими захватами (4), которая крепится на стойке штатива (5). Путем перемещения траверсы по стойке штатива регулируется глубина перемещения образца в раствор. Для исключения контакта анода и катода при выпадении образца из захватов предусмотрено страховочное крепление образца к стойке штатива струнами (6).

С учетом потребного значения тока в качестве источника для электрохимического травления был использован сварочный инвертор с величиной тока на выходе до 250 А.

Травильная установка была помещена в вытяжной шкаф (8), а источник тока выведен за пределы шкафа.

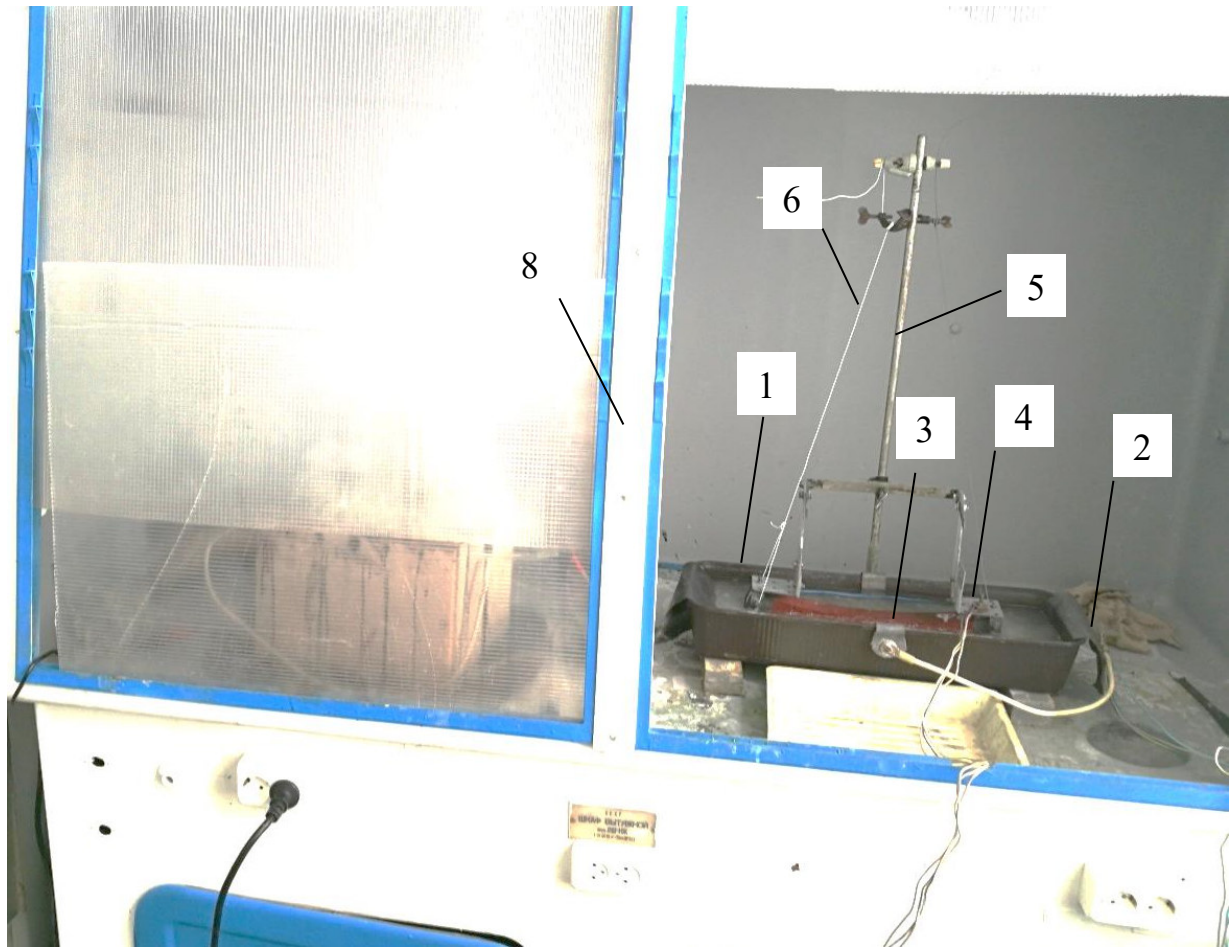


Рисунок 3.10 – Травильная установка.

Режимы травления и концентрация раствора подбирались таким образом чтобы, с одной стороны, обеспечить высокую скорость стравливания, с другой – не допустить нагрева образца и раствора свыше  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Так, средняя величина тока в цепи составила  $60\text{ A}$ , при этом температура образца находилась на уровне  $45\text{-}50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В качестве травильного раствора применялась 20% серная кислота.

Образец погружался в раствор таким образом, что травлению подвергалась только его наружная сторона. С целью равномерного травления по длине, катоду придавалась кривизна, соответствующая кривизне образца.

Слой снимались поэтапно, с шагом в среднем  $1\text{ мм}$ . После каждого шага образец извлекался из ванны, промывался и проводились измерения кривизны.

### 3.2.4 Обработка и анализ результатов эксперимента

Методика расчета остаточных напряжений методом последовательного удаления слоев достаточно подробно изложена в работе [56].

Согласно методике, предполагается, что на какой-то момент времени уже снят слой толщиной  $\xi$  ( рисунок 3.11) и проводится снятие бесконечно малого слоя  $d\xi$ .

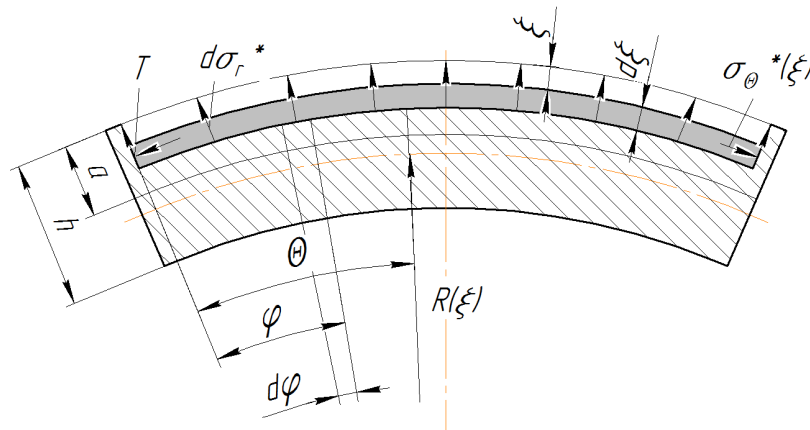


Рисунок 3.11 – К вопросу определения остаточных напряжений, снимаемых при удалении слоев

Удаление этого слоя эквивалентно приложению к оставшемуся сечению центральной растягивающей силы  $\sigma_{\theta}^*(\xi)d\xi$  и изгибающего момента  $dM$  в сечении  $\theta$ , изменяющего кривизну образца.

Для уравнивания растягивающей силы к поверхности среза должно быть приложено радиальное напряжение  $d\sigma_r^*(\xi)$ , которое определяется как:

$$d\sigma_r^*(\xi) = \frac{\sigma_{\theta}^*(\xi)d\xi}{R(\xi) + \frac{1}{2}(h - \xi)}, \quad (3.14)$$

где  $R(\xi)$  – радиус осевой линии оставшейся части кольца.

Изгибающий момент в сечении  $\theta$  относительно оси, проходящий через центр тяжести, с учетом (3.14), равен:

$$dM = -\sigma_{\theta}^*(\xi) \frac{1}{2}(h - \xi)d\xi. \quad (3.15)$$

Под действием этого момента увеличение диаметра кольца равно:

$$d\delta = \frac{D^2(\xi)}{2EI(\xi)} dM, \quad (3.16)$$

где  $I(\xi) = \frac{b(h-\xi)^3}{12}$  – момент инерции сечения кольца;

$D(\xi) = D_{\text{вн}}(\xi) + h - \xi$  – диаметр осевой линии после снятия слоя  $\xi$ .

С учетом равенств (3.15) и (3.16) снимаемое напряжение  $\sigma_{\theta}^*(\xi)$  равно:

$$\sigma_{\theta}^*(\xi) = -\frac{4EI(\xi)}{D^2(\xi) \cdot (h-\xi) \cdot b} \frac{d\delta}{d\xi}. \quad (3.17)$$

Если требуется найти напряжение в каком-либо слое на расстоянии  $a$  от наружной поверхности, то в сечении  $\theta$  возникает дополнительное усилие  $dN$ , которое создает дополнительное напряжение в слое  $a$ , равное:

$$\sigma_{\theta}(a) = -\frac{2E}{3D^2(a)} (2h - 3a + \xi) \frac{d\delta}{d\xi} d\xi. \quad (3.18)$$

Тогда, суммарное напряжение равно:

$$\sigma_4 = \sigma_{\theta}^*(\xi) + \sigma_{\theta}(a) \quad (3.19)$$

Для расчета  $\sigma_4$  на основании данных эксперимента определена эмпирическая зависимость  $f = D(\xi)$ , аппроксимированная линейной функцией (Рисунки 3.12-3.14).

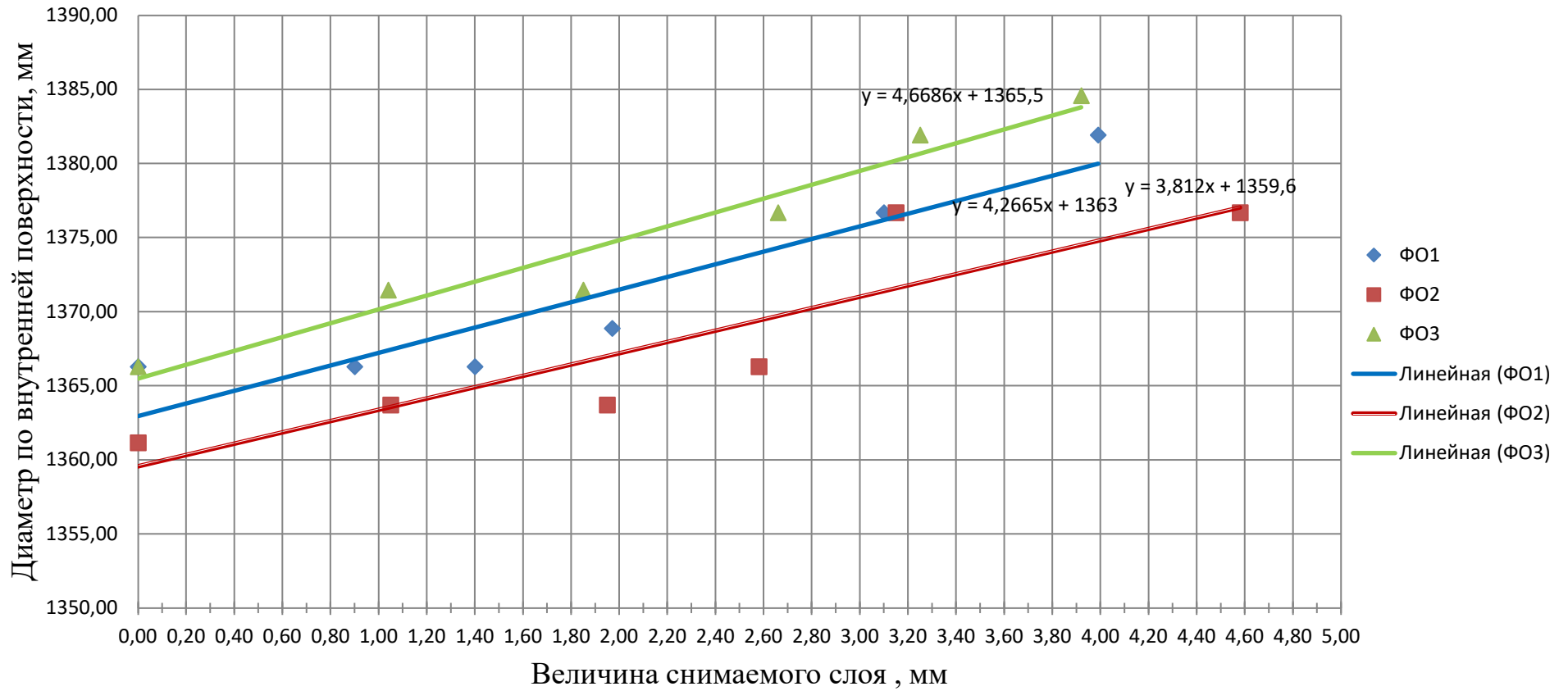


Рисунок 3.12 – Изменение диаметров образцов, отобранных из области основного периметра



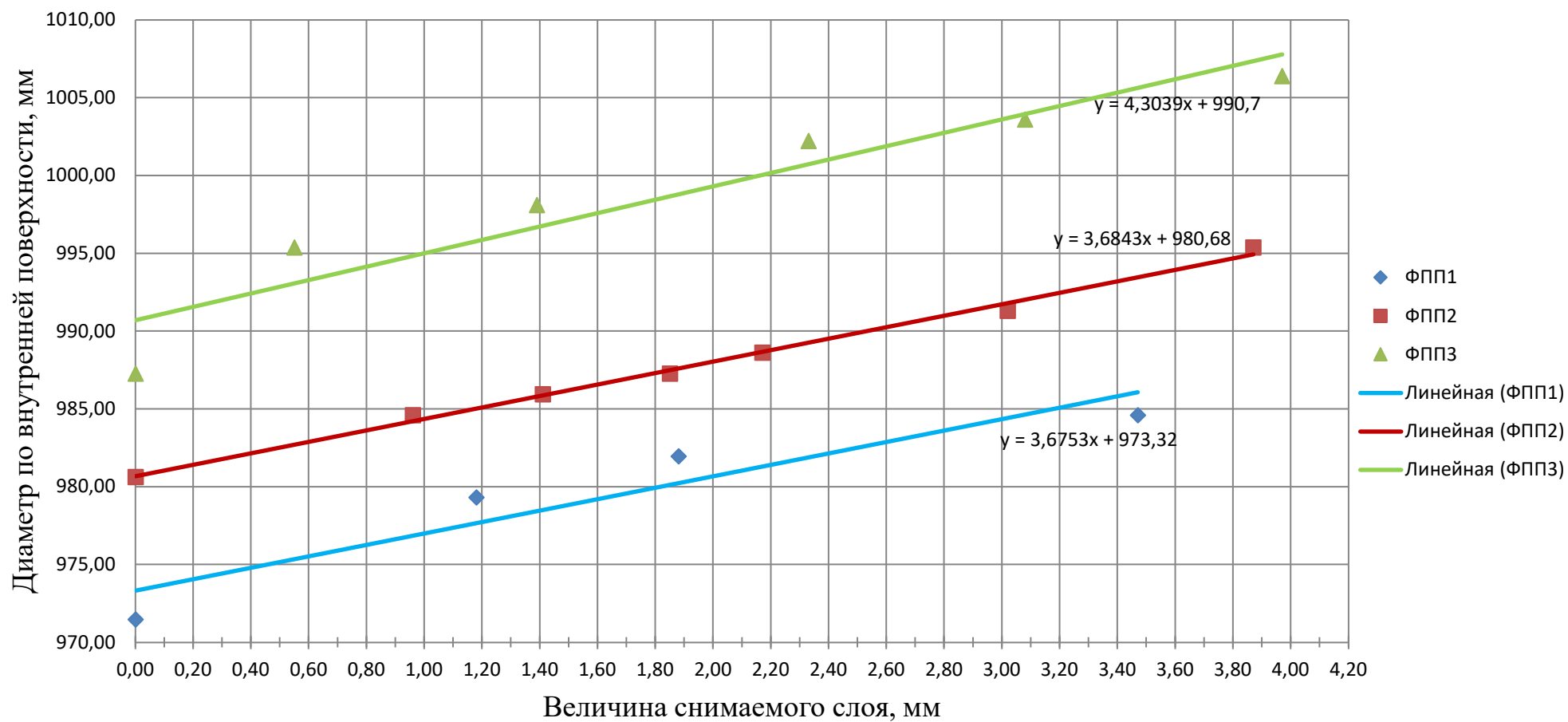


Рисунок 3.13 – Изменение диаметров образцов, отобранных из области правого переходного участка

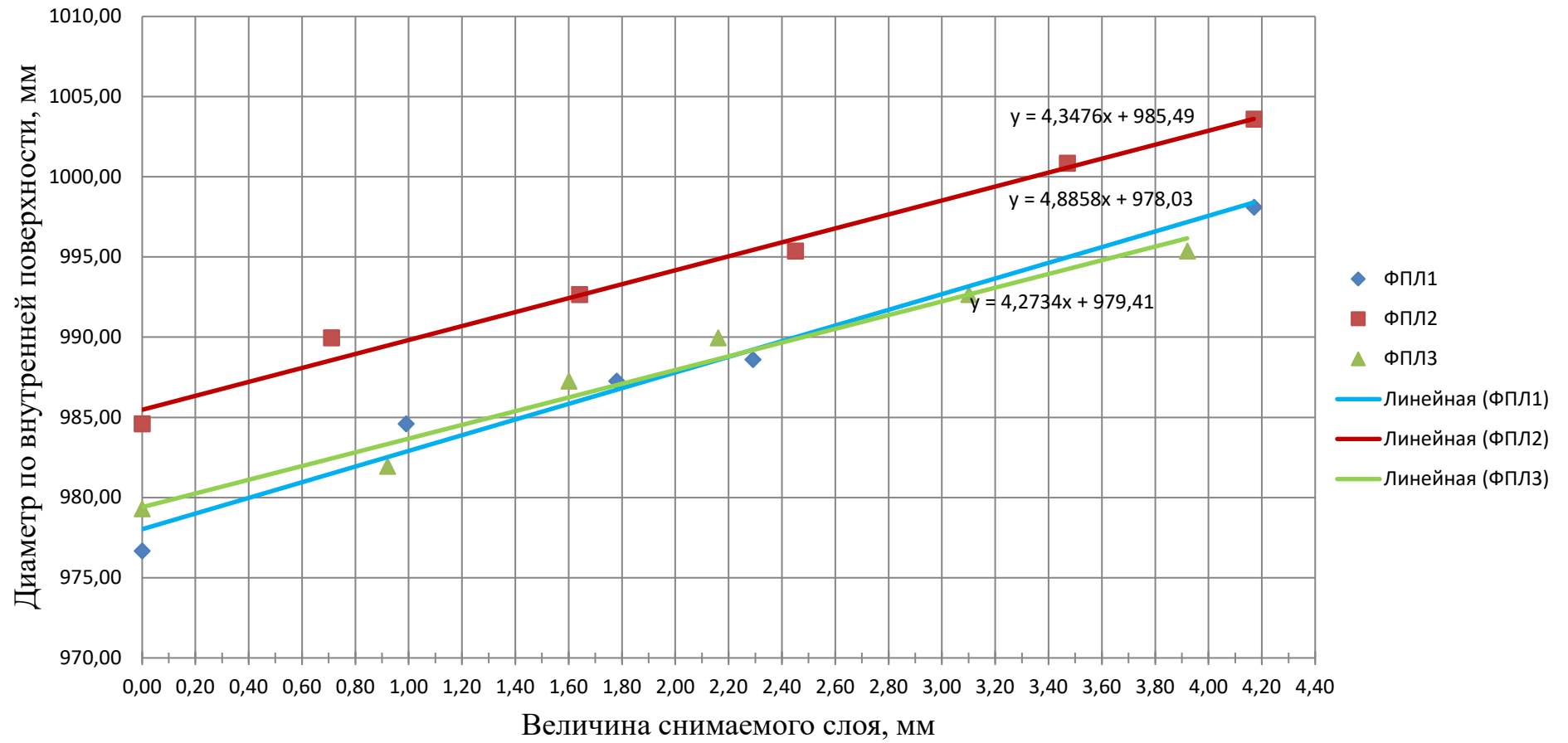


Рисунок 3.14 – Изменение диаметров образцов, отобранных из области левого перегиба

В таблице 3.5 представлены значения остаточных напряжений на поверхности образца, полученные расчетом по теоретическим формулам, и напряжения снимаемые в результате травления.

Таблица 3.5 – Результаты расчета остаточных напряжений по толщине стенки после формовки

Место вырезки темплета	Код образца	Внутренний диаметр образца, мм	Толщина образца, мм	$\sigma_{\text{ост}}$ , МПа	
				Расчет ( $\sigma_{\text{ост}}^{h/2}$ )	Эксперимент
Основной на 3 ч	ФО1	1366,28	26,20	299,91	291
	ФО2	1361,14	26,20	299,96	271
	ФО3	1366,28	26,17	299,93	290
Перегиб на 11 ч (левый)	ФПЛ1	976,67	26,17	302,00	318
	ФПЛ2	981,94	26,17	301,97	320
	ФПЛ3	979,30	26,22	302,00	316
Перегиб на 1 ч (правый)	ФПП1	971,46	26,30	302,04	332
	ФПП2	980,62	26,27	302,04	315
	ФПП3	987,37	26,18	301,95	305

Как видно из таблицы 3.5, значения остаточных напряжений полученные экспериментально согласуются со значениями остаточных напряжений, полученными расчетным путем. Расхождение значений остаточных напряжений, полученных в эксперименте, с теоретическим расчетом находится в диапазоне от 2 до 10%.

Результаты проведенного эксперимента показывают, что большая часть остаточных напряжений снимается на этапе отрезки кольца, что повреждает неоднородное напряженно-деформированное состояние трубной заготовки после формовки.

На рисунке 3.15 показана трансформация эпюры остаточных напряжений, вызванная неравномерностью деформации по длине трубной заготовки из-за прогиба нажимного вала.

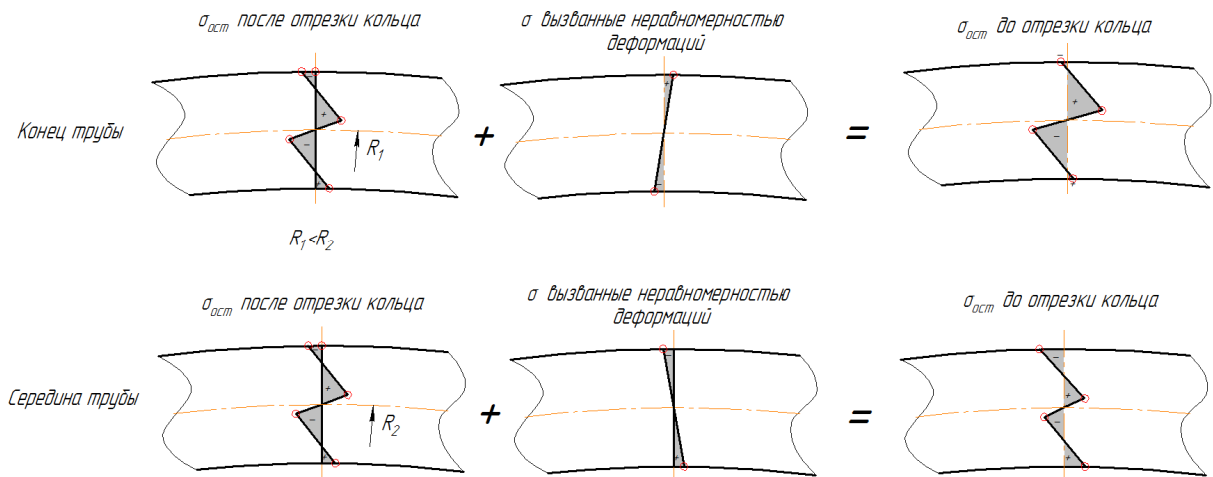


Рисунок 3.15 – Напряженно-деформированное состояние трубной заготовки после формовки в вальцах

Как видно из рисунка 3.15, напряженно-деформированное состояние трубной заготовки после формовки в ЛГМ нестабильно по длине. Кромки по концам трубы пытаются сблизиться, а в средней по длине части – разойтись.

### 3.3 Экспериментальное исследование прогиба нажимного вала в процессе формовки в вальцах

Как следует из проведенного экспериментального исследования остаточных напряжений, задача контроля прогиба безопорного нажимного вала при формовке играет важную роль в получении заготовки с равномерным распределением по длине остаточных напряжений и деформаций.

Помимо получения количественных значений прогиба вала перед экспериментальным исследованием стояли следующие актуальные вопросы:

- какова форма упругой линии прогиба вала;
- как изменяется прогиб вала на стадиях перемещения и вращения;
- как влияет на прогиб вала изменение жесткости системы «валок-заготовка».

### 3.3.1 Обоснование измерения прогиба методами фотограмметрии

Учитывая габаритные размеры валка и условия работы приводов, реализуемыми в промышленных условиях, являются оптические бесконтактные методы измерения деформации.

В промышленности, для контроля размеров производимых изделий, широкое применение получили системы измерения с использованием опто-электрических триангуляционных датчиков [93,94].

Применительно к измерению прогиба верхнего валка ЛГМ рассматривался вариант установки нескольких триангуляционных датчиков на опорном портале машины вальцевой формовки (Рисунок 3.16) либо под листом между опорными валками.

К достоинствам данного метода следует отнести:

- высокую точность измерения расстояния до объекта (до сотых долей миллиметра);
- возможность в режиме on-line контролировать величину прогиба.

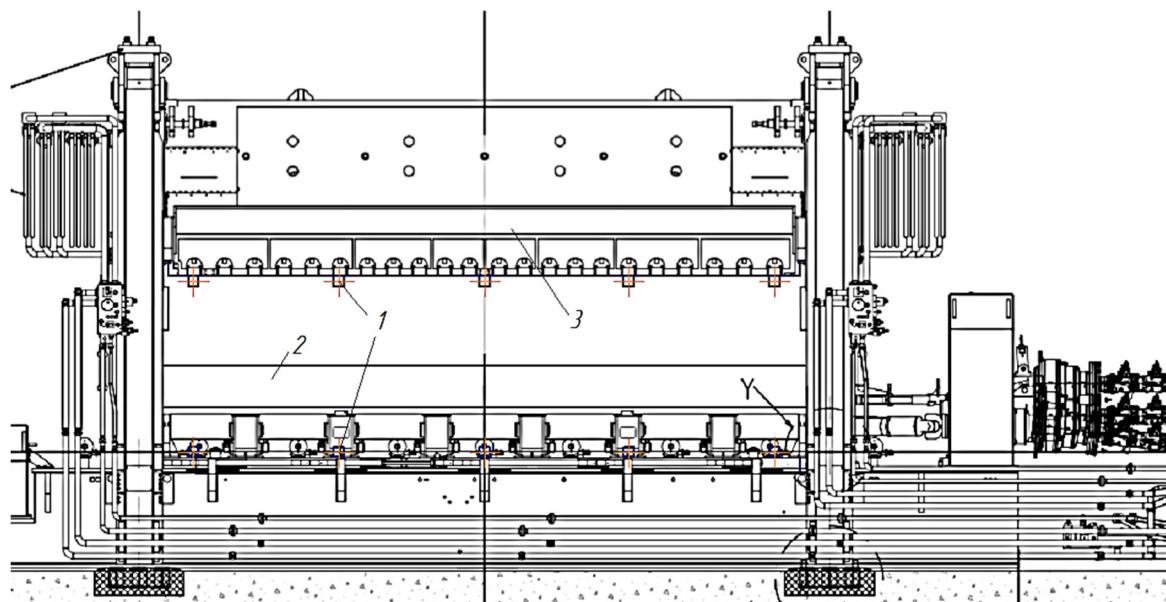


Рисунок 3.16 – Схема измерение профиля нажимного валка с помощью триангуляционных датчиков

1 – триангуляционные датчики; 2 – верхний валок; 3 – опорный портал

К недостатками относятся следующие условия:

- высокая стоимость триангуляционных датчиков;
- длительное время на подготовку эксперимента (монтаж и настройка положения датчиков, разработка ПО для обработки и визуализации получаемых сигналов);
- ограниченное время доступа к валку из-за закрытия валка листом во время формовки при расположении датчиков над валком;
- при расположении датчиков под валком измерения принимают косвенный характер, т.к. сканируется не сам валок, а находящийся под ним лист;
- при расположении датчиков под валком возможно загрязнение датчиков окалиной.

Альтернативным изложенному выше варианту является измерение деформации валка средствами фотограмметрии.

Фотограмметрия – научно-техническая дисциплина, предметом которой является получение геометрической и семантической информации об объектах по их фотограмметрическим снимкам (фотографиям) [95].

Преимуществами данного метода являются:

- одно измерительное устройство (фотокамера);
- оперативный монтаж и настройка измерительного устройства и вспомогательного оборудования;

К недостаткам фотограмметрии следует отнести: длительное время на обработку снимков при «ручном» измерении и более низкую точность по сравнению с лазерно-триангуляционным методом.

Процесс измерения возможно автоматизировать с помощью математических алгоритмов, применяемых в технологиях машинного зрения.

### 3.3.2 Средства измерения

Контроль прогиба нажимного вала осуществлялся при помощи измерительного комплекса (Рисунок 3.17), состоящего из лазерного дальномера Leica Disto D510 (1) и фотоаппарата Nikon D 5100 (2). Приборы были закреплены на общей платформе (3), расположенной на штативе (4).

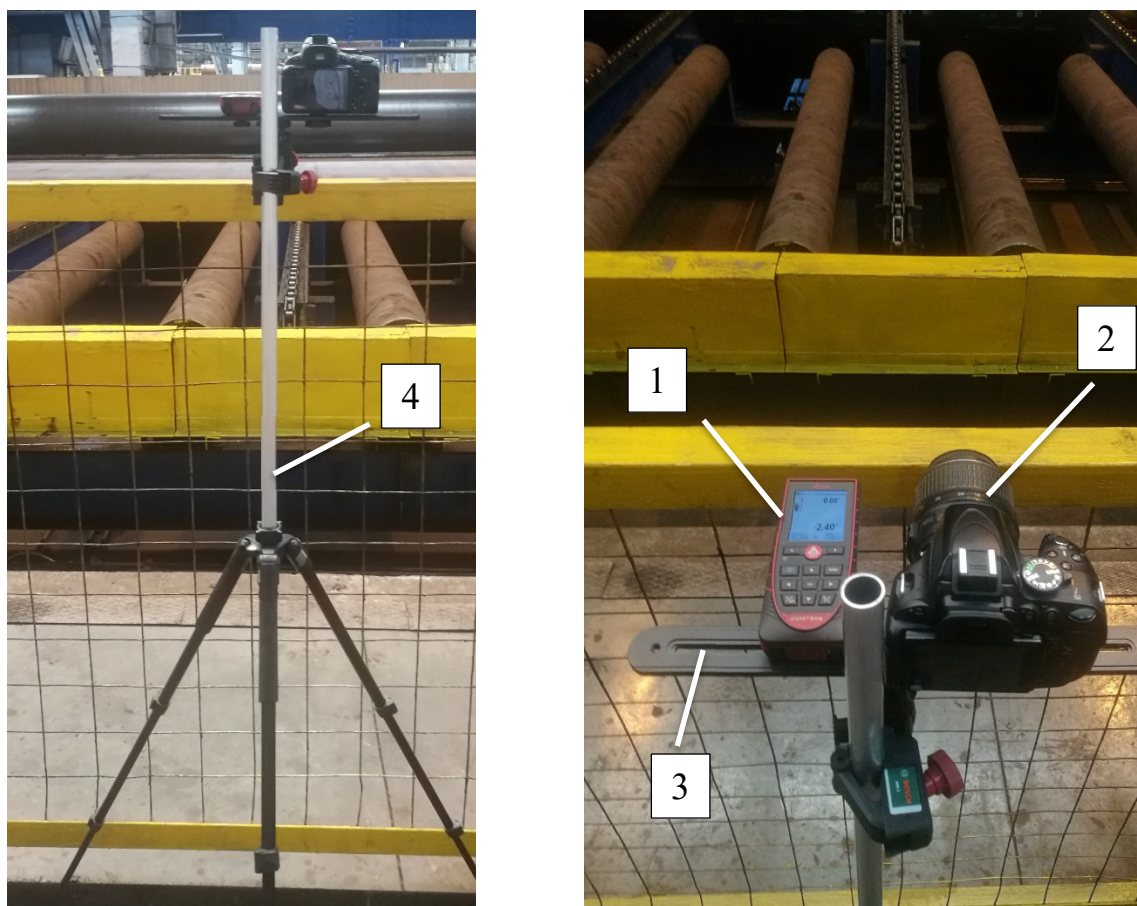


Рисунок 3.17 – Измерительный комплекс:

1-лазерный дальномер; 2-фотокамера; 3– платформа; 4 – штатив

С помощью лазерного дальномера определялось расстояние до объекта измерения, а также контролировался угол наклона платформы и высотное положение камеры относительно верхней образующей валка. Разрешение матрицы фотоаппарата составляло 4982x3267 пикселей, что является достаточным для условий данного эксперимента.

### 3.3.3 Методика проведения эксперимента

После формовки получали заготовку под сварку с длиной плоских участков 250 мм и шириной межкромочного зазора по переднему торцу 100 мм, по заднему – 130 мм. Давление противоизгиба в первом и втором проходах составляло 22 бара.

Перед началом серийной съёмки, при помощи дальномера были произведены замеры длины  $L$  рабочей зоны валка, которая составила 12 300 мм.

Измерительный комплекс устанавливался со стороны задающего стола ЛГМ на половине длины нажимного валка, как показано на рисунке 3.18.

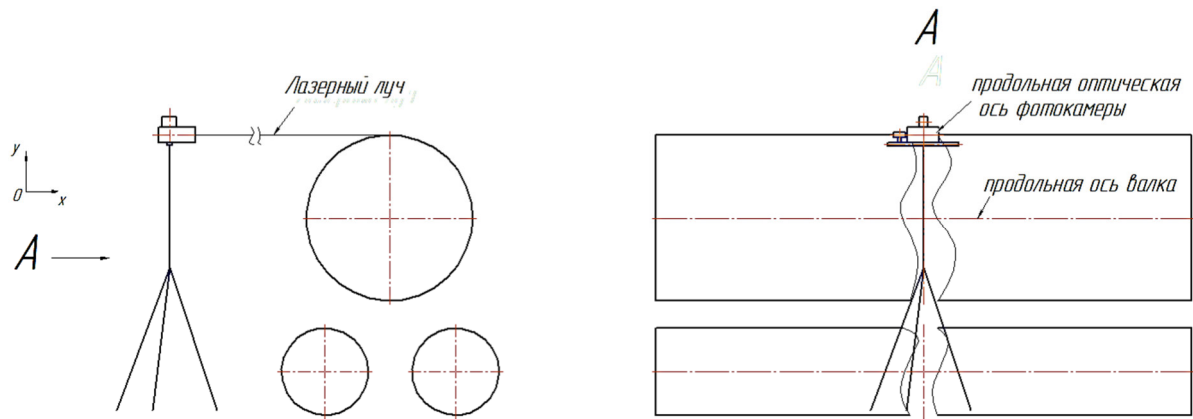


Рисунок 3.18 – Расположение средств измерения относительно исследуемого объекта

Фотокамера выставлялась по центру валка на уровень верхней образующей.

Измерение прогиба валка по фотограмметрическим изображениям проводилось в специализированном графическом редакторе.

Суть измерений сводилась к определению координат пикселей в точках А, В и С (Рисунок 3.19), через которые, определяется масштаб изображения и вычислялся прогиб нижней образующей вала.

Фотография в редакторе представляет собой пиксельную сетку, на которой каждый пиксел имеет координаты  $x_i$  и  $y_i$ . Начало координат определено программой и расположено в верхнем левом углу изображения.



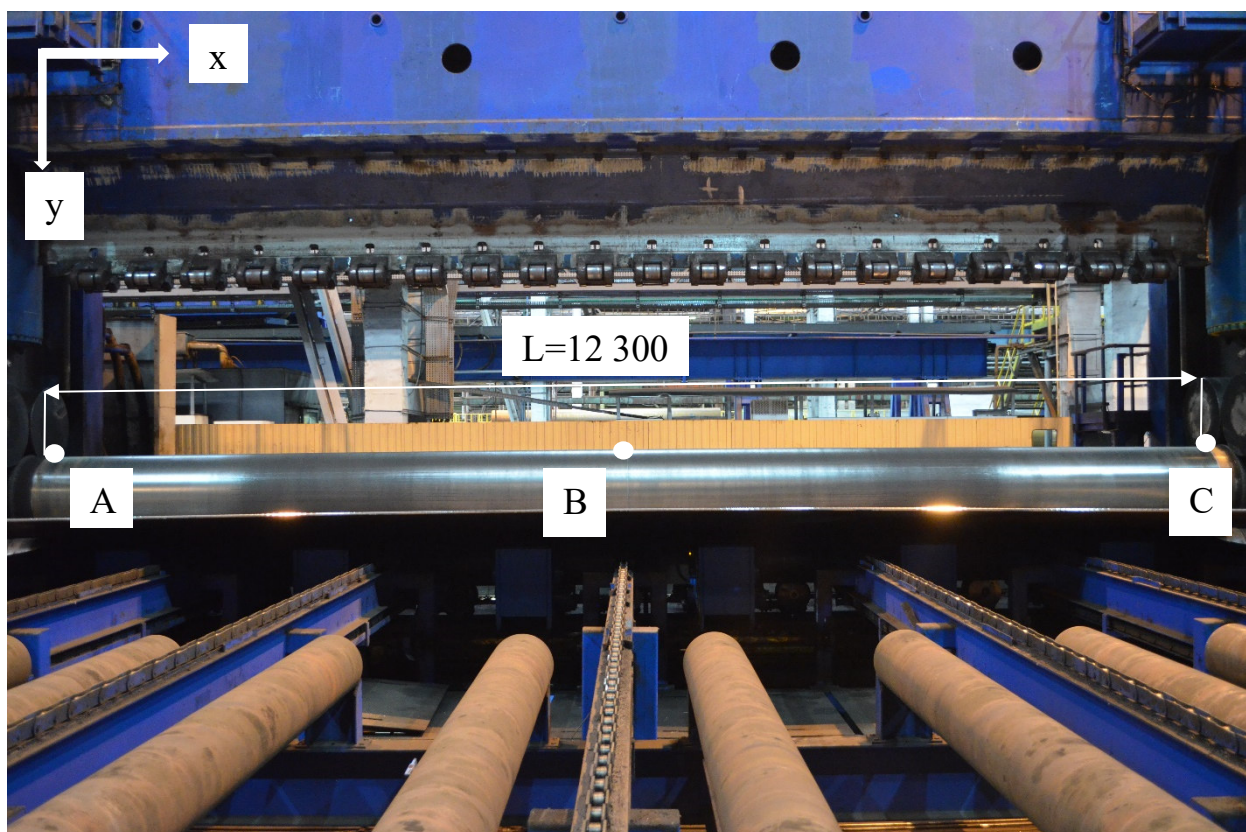


Рисунок 3.19 – Типовое изображение верхнего валка полученное в эксперименте

Стрела прогиба верхней образующей из  $\Delta BEK$  (Рисунок 3.20) равна:

$$f_b = BE = BK \cdot \cos(\alpha), \quad (3.20)$$

где угол  $\alpha$  из  $\Delta ACN$  (рисунок 3.18, а) равен:

$$\alpha = \arctg \left( \frac{y_A - y_C}{x_C - x_A} \right). \quad (3.21)$$

Длина отрезка  $BK$  определяется из  $\Delta ADK$  и  $\Delta BEK$ :

$$BK = (BD) - (KD) = (y_A - y_B) - ((x_B - x_A) \cdot \tg(\alpha)), \quad (3.22)$$

где  $x_i$  и  $y_i$  – координаты пиксела в соответствующей точке.

Поскольку нажимной валок имеет переменный по длине диаметр, то верхняя и нижняя образующие валка будут иметь разный профиль.

Геометрические параметры заготовки в продольном направлении, как и распределение остаточных напряжений после формовки, будут зависеть от профиля нижней образующей нажимного валка.

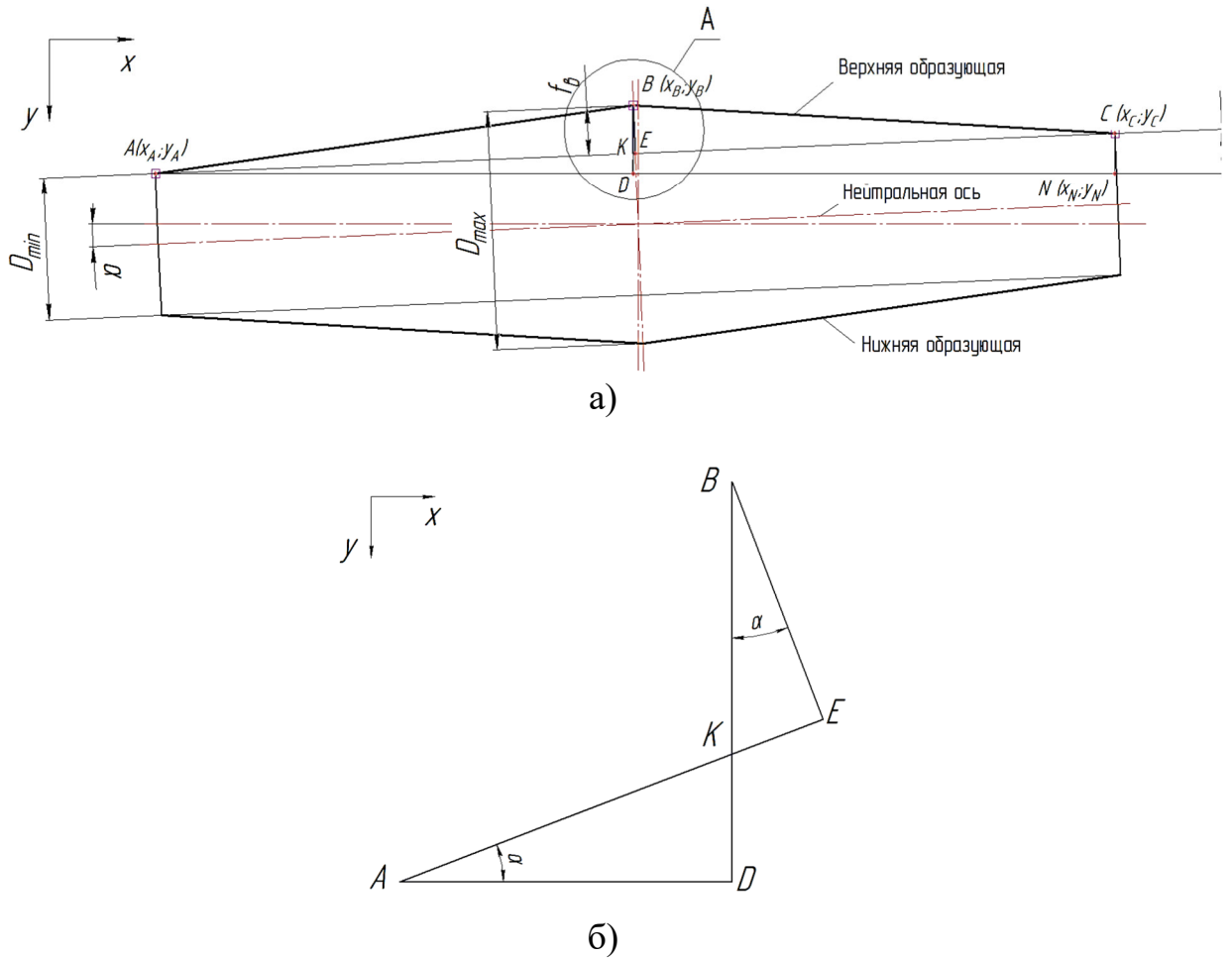


Рисунок 3.20 – Схема измерения прогиба валка по координатам пикселей

Измерение стрелы прогиба нижней образующей в условиях данного эксперимента невозможно, поскольку нажимной валок в нижней части закрыт листом, либо опорным валком.

Стрела прогиба нижней образующей (Рисунок 3.21)  $f_n$  с учетом стрелы прогиба верхней образующей  $f_b$  и диаметра вала равна:

$$f_n = D_{max} - (D_{min} + f_b), \quad (3.23)$$

где  $D_{min}$  – минимальный диаметр нажимного валка в рабочей зоне;

$D_{max}$  – максимальный диаметр нажимного валка в рабочей зоне.

Для оценки достоверности результатов измерений прогиба валка была измерена разность диаметров  $\Delta D$  нажимного валка, когда тот находился в ненагруженном состоянии и опирался на цилиндры противоизгиба.

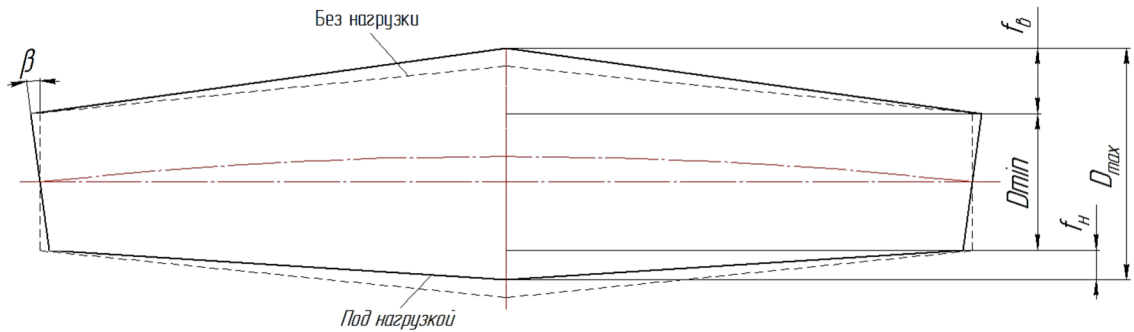


Рисунок 3.21 – Схема измерения стрелы прогиба по нижней образующей

Величина  $\Delta R$  составила 13,5 мм, в то время как по данным технической документации  $\Delta R = 18$  мм. Расхождение результатов составило 4,5 мм, что, очевидно, связано с прогибом вала под действием собственного веса.

Поскольку в третьем проходе валок был полностью закрыт листом, то фотосъёмка вала производилась только в первом и втором проходах (рисунок 3.22) в следующей последовательности:

1-й кадр – в первом проходе непосредственно перед включением привода вращения;

2-й, 3-й и 4-й кадры – в первом проходе с шагом  $\sim 3$  с.;

5-й и 6-й кадр – во втором проходе.

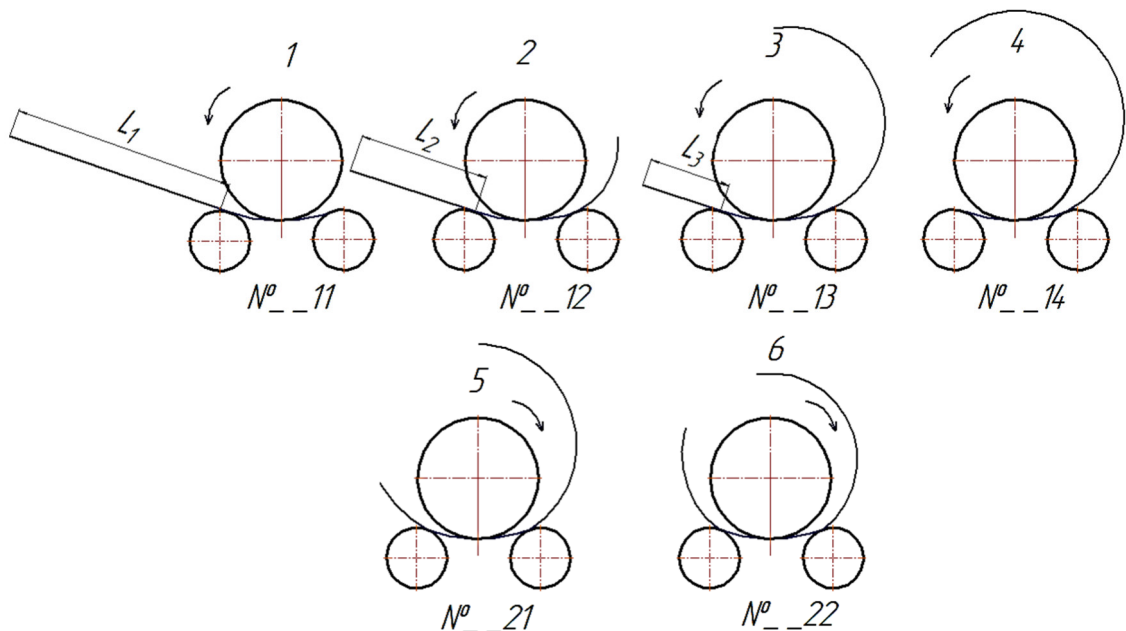


Рисунок 3.22 – Последовательность выполнения снимков при формовке

Таким образом, для каждой трубы соответствует серия из 5-6 снимков.

Каждому снимку присваивался четырехзначный номер, в котором первые две цифры означают номер трубы, третья цифра – номер прохода, четвертая цифра номер снимка в проходе. Например, снимок № 0311 – труба №03, первый проход, первый снимок.

### 3.3.4 Анализ результатов эксперимента

Выборочная совокупность значений прогибов каждой стадии формовки представлена в таблице 3.6 в виде вариационного ряда, для которого определялись: среднее значение, стандартное отклонение и доверительный интервал.

Таблица 1.6 – Экспериментальные данные замеров прогиба нажимного вала (в миллиметрах)

№ опыта	Первый проход			Второй проход		
	Стадия формовки					
	1	2	3	4	5	6
1	1,07	-5,59	-2,18	0,71	-4,06	-0,32
2	1,15	-3,63	-1,96	1,41	-3,66	2,76
3	1,20	-2,22	1,15	2,52	-0,29	2,80
4	2,72	-1,35	1,22	4,52	1,73	4,44
5	2,76	-1,12	2,43	4,59	2,80	4,48
6	2,77	-0,51	2,78	6,17	2,99	4,62
7	2,82	1,10	2,78	6,77	3,62	5,92
8	2,90	1,11	3,50	7,73	4,42	6,09
9	4,41	1,17	3,57	7,75	5,06	6,10
10	4,51	1,97	3,84	7,89	5,62	6,15
11	4,69	2,70	4,43	7,95	5,93	6,24
12	5,17	2,80	4,44	7,97	5,93	6,25
13	5,22	2,98	4,57	8,90	6,12	6,27
14	6,10	4,26	4,65	9,62	6,24	6,28
15	6,15	4,43	4,74	9,63	7,85	6,31
16	6,82	4,59	5,09	9,65	7,85	6,31
17	7,70	4,64	5,81	12,80	7,88	6,42
18	7,75	6,11	6,10	12,97	7,98	7,82
19	7,91	6,24	6,27	17,96	8,13	7,84
20	7,92	6,31	6,30	19,44	9,64	7,87

Окончание таблицы 3.6

21	7,94	6,32	6,31	19,62	11,28	7,89
22	8,96	6,76	7,60	19,66	12,80	7,92
23	9,08	6,82	7,74	22,78	12,87	7,98
24	9,27	7,77	7,84	24,30	14,56	11,28
25	9,33	7,79	7,99	26,31		14,46
26	9,46	7,96	8,42	29,49		15,46
27	9,56	7,99	9,63	30,77		
28	9,64	9,49	9,66	32,82		
29	9,64	9,59	9,67	34,59		
30	9,66	9,60	9,78	39,06		
31	10,55	9,65	11,08	39,44		
32	11,18	9,67	11,14	47,94		
33	11,24	10,33	11,29			
34	11,27	11,08	16,09			
35	11,28	12,84	17,96			
36	11,32	12,86	24,16			
37	12,01	14,14	29,63			
38	12,98	16,10	36,28			
39	14,50	16,29				
40	16,28	16,87				
41		17,55				
Среднее значение $\bar{x}$ *	7,45	5,87	8,2	16,68	5,97	6,75
Стандартное отклонение $S$ **	3,8	5,71	7,81	12,67	4,70	3,25
Доверительный интервал $\Delta x$ ***	1,21	1,8	2,57	4,57	1,98	1,31
*– $\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i$ ; где n – число опытов.						
**– $S = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}}$ .						
***– $\Delta x = t \cdot \frac{S}{\sqrt{n}}$ где t-коэффициент Стьюдента.						

Средние значения прогибов, при заданных настройках ЛГМ, в выбранных стадиях формовки, с вероятностью 95% будут равны:

$$\bar{x}_1 = 7,45 \pm 1,21; \quad \bar{x}_2 = 5,87 \pm 1,8; \quad \bar{x}_3 = 8,20 \pm 2,57; \quad \bar{x}_4 = 16,68 \pm 4,57;$$

$$\bar{x}_5 = 5,97 \pm 1,98; \quad \bar{x}_6 = 6,75 \pm 1,31.$$

Результаты измерений представленные на рисунке 3.23 показывают, что прогиб валка в процессе формовки нестабилен.

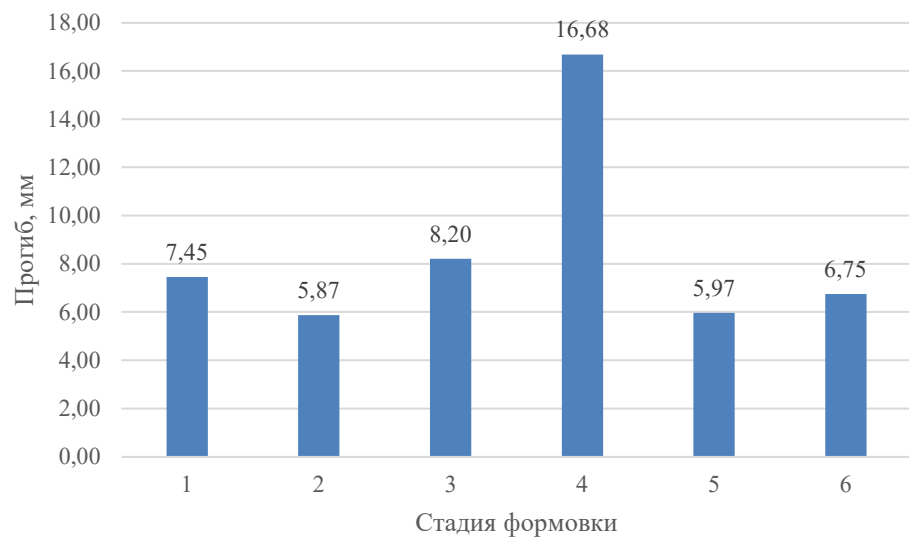


Рисунок 3.23 – Средние значения прогиба вала

Среднее значение прогиба в первом проходе после завершения перемещения (стадия 1) составило 7,45 мм, затем, при включении привода вращения (стадии 2-4) прогиб снижался по отношению к стадии 1, а затем нарастал по экспоненциальной зависимости.

Стадии 5 и 6 второго прохода являются, по сути, аналогами стадий 2 и 3 первого прохода. Здесь также наблюдается рост прогиба, но уже с меньшей интенсивностью.

Изменение прогиба вала в пределах прохода подтверждает гипотезу о меняющейся жесткости системы «валок-заготовка», управление которой по существу невозможно.

### 3.4 Выводы по главе 3

1. Методом торможения полосы в валках определен коэффициент трения для условий вальцевой формовки. Полученные данные о коэффициенте трения позволяют достоверно определять ресурс фрикционных сил на границе «инструмент – заготовка».

2. Результаты проведенного средствами фотограмметрии эксперимента показывают, что в процессе формовки прогиб валка нестабилен и изменяется как в пределах одного прохода, так и от прохода к проходу.

3. Показано, что по причине прогиба в трубной заготовке после формовки формируется неоднородность остаточных напряжений по длине, что подтверждается изменением диаметра отрезанных колец от тела трубной заготовки. При этом, на концах трубы могут возникать дополнительные остаточные напряжения, величина которых достигает уровня  $0,24\sigma_T$ .

## 4 РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИХ ПРЕДЛОЖЕНИЙ И ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОЕ АПРОБИРОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 4.1 Разработка концепции автоматического регулирования прогибом

Задача обеспечения минимального и неизменного прогиба безопрного нажимного валка трехвалковых листогибочных машин может быть решена реализацией системы автоматического регулирования (САР) [96-99] прогибом валка .

Объектом управления в данном случае является нажимной валок (1) ЛГМ (Рисунок 4.1). Целью управления является поддержание минимального прогиба вала с заданной точностью. Управляющим устройством являются цилиндры противоизгиба (2), а измеряющим устройством – установка технического зрения (3).

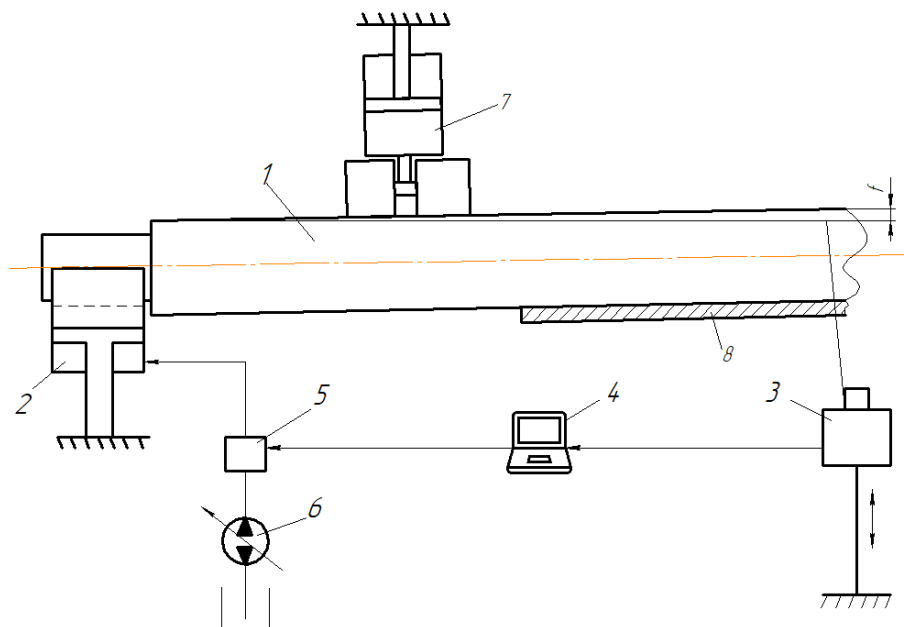


Рисунок 4.1 – Структурная схема АСУ прогибом нажимного вала

Заданное значение прогиба  $f_3$  вала вводится пользователем в вычислительный блок (4). В него же поступают данные с камеры технического зрения, где после обработки снимка фактическое значение



прогиба  $f_3$  сравнивается с заданным  $f_3$  и формируется команда управления, регулирующая давление противоизгиба гидроаппаратурой (5), либо гидронасосом (6).

Поскольку имеет место применение нажимных валков разного диаметра и само перемещение вала при погружении достаточно велико, то необходимо обеспечить привод вертикального перемещения камеры технического зрения и систему наведения оптической оси камеры на уровень верхней образующей валка.

Количество проходов, доступных для контроля прогиба, зависит от типоразмера трубы, диаметра валка и величины деформации в отдельно взятом проходе. Увеличить время контроля прогиба можно путем установки двух камер технического зрения, по одной с каждой стороны валка.

Использование системы технического зрения позволяет, помимо решения задачи контроля прогиба валка, выявлять на ранних стадиях формовки (при первом погружении) изменение механических свойств листа и вносить соответствующие корректировки в настройки перемещения.

#### **4.2 Конечно-элементное моделирование разработанной технологии формовки**

Целью исследования на данном этапе работы является апробирование с помощью средств компьютерного моделирования разработанной технологии формовки «погружение+вращение».

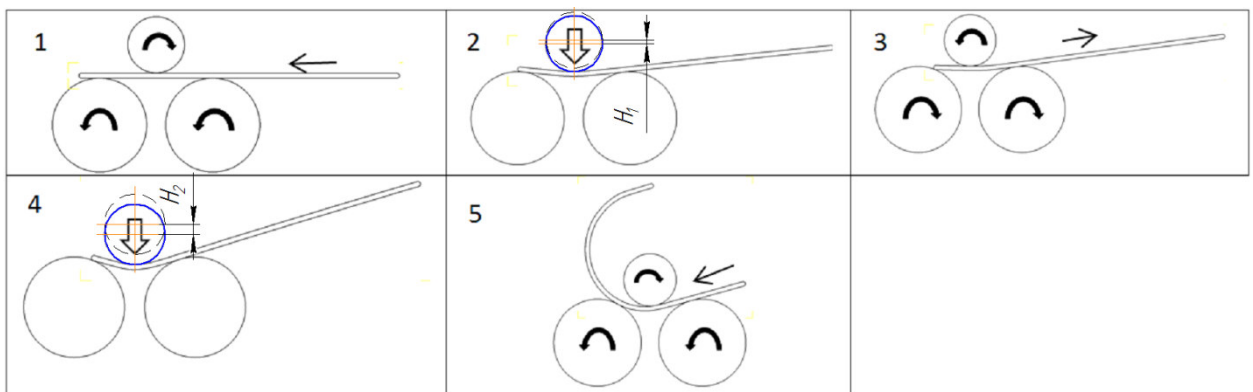
Разработанная технология, прежде всего, направлена на улучшение геометрических характеристик переходного участка, а именно, на уменьшение неравномерности деформаций и устранение перегиба в зоне перемещения нажимного валка при полном статическом погружении.

Для обеспечения возможности сравнительного анализа и оценки эффективности разработки, моделирование процесса формовки проводилось для условий и стандартной технологии, и разработанной.

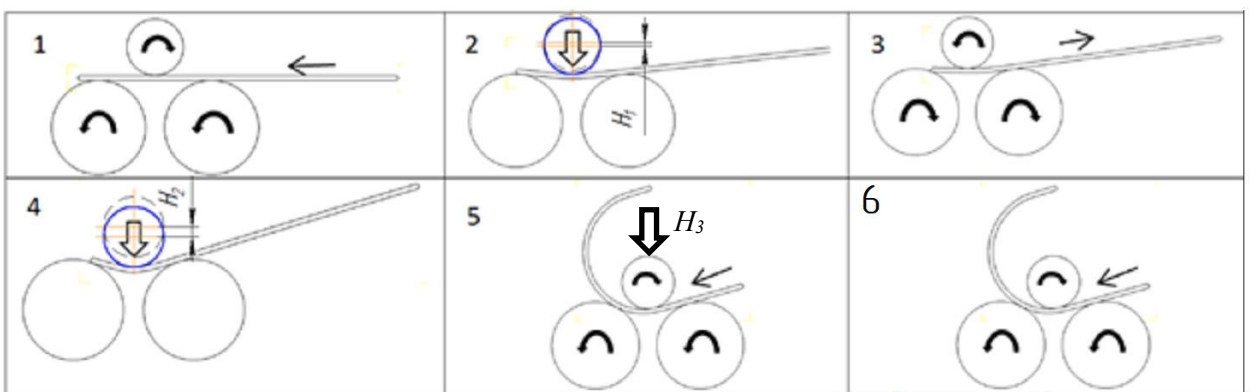
Стандартную технологию формовки (Рисунок 4.2, а) условно можно разделить на пять стадий. При первой стадии производится подача и начальное позиционирование листа в валках.

Вторая стадия заключается в изгибе листа посредством предварительного перемещения верхнего валка на величину  $H_1$ , обеспечивающую уровень сил трения, достаточный для перемещения заготовки на третьей стадии в направлении от кромки к центру листа с целью укорочения полки.

При четвертой стадии производится перемещение верхнего валка до значения  $H_2$ , для получения заданного радиуса заготовки на выходе, либо промежуточного радиуса, если формовка осуществляется в несколько проходов.



а)



б)

Рисунок 4.2 – Схемы формовки: а – действующая; б) – усовершенствованная.

Пятая стадия предполагает формовку основной части периметра посредством вращения валков.

Разработанная технология (Рисунок 4.2, б) условно состоит из шести стадий процесса.

Первые три стадии процесса формовки аналогичны стандартной технологии.

При четвертой стадии производится перемещение верхнего валка на величину  $H_2$ .

При пятой стадии осуществляется одновременное перемещение нажимного валка до величины  $H_3$  и подача заготовки в очаг деформации. При этом, необходимо обеспечить вплоть до завершения перемещения заданное соотношение скорости перемещения верхнего валка и скорости вращения валков. Это условие обеспечивает необходимое распределение деформаций по длине переходного участка.

На шестой стадии выполняется формовка основного периметра аналогично стандартной технологии.

Моделирование формовки для двух принятых вариантов технологии проводилось в программном пакете для конечно-элементного моделирования Deform 3D, который часто используется для моделирования процессов гибки изделий из листового проката [101,102].

Выбранные для моделирования профилеразмеры труб представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1- Моделируемые профилеразмеры труб

№ п/п	Диаметр, мм	Толщина стенки, мм	Класс прочности
1	1420	25,8	K60
2	720	9	K60
3	711	25,4	K55

Поскольку моделирование крупногабаритных изделий, какими являются трубы большого диаметра, из-за большого числа конечных элементов является весьма трудоемким по временным затратам, при моделировании приняты следующие допущения, направленные на сокращение расчетного времени:

- формовка осуществлялась в один проход на всех профилеразмерах. В реальной же технологии при толщине стенки относительно большой формовка осуществляется в несколько проходов с целью уменьшения нагрузок на инструмент;

- модель инструмента (валков) задается как абсолютно жесткое тело;

- длина листа в модели уменьшена до 100 мм.

Результаты моделирования представлены на рисунках 4.3-4.5 в синхронных масштабах шкал деформаций с целью наглядного представления материала и возможности сравнительного анализа базовой и разработанной технологий.

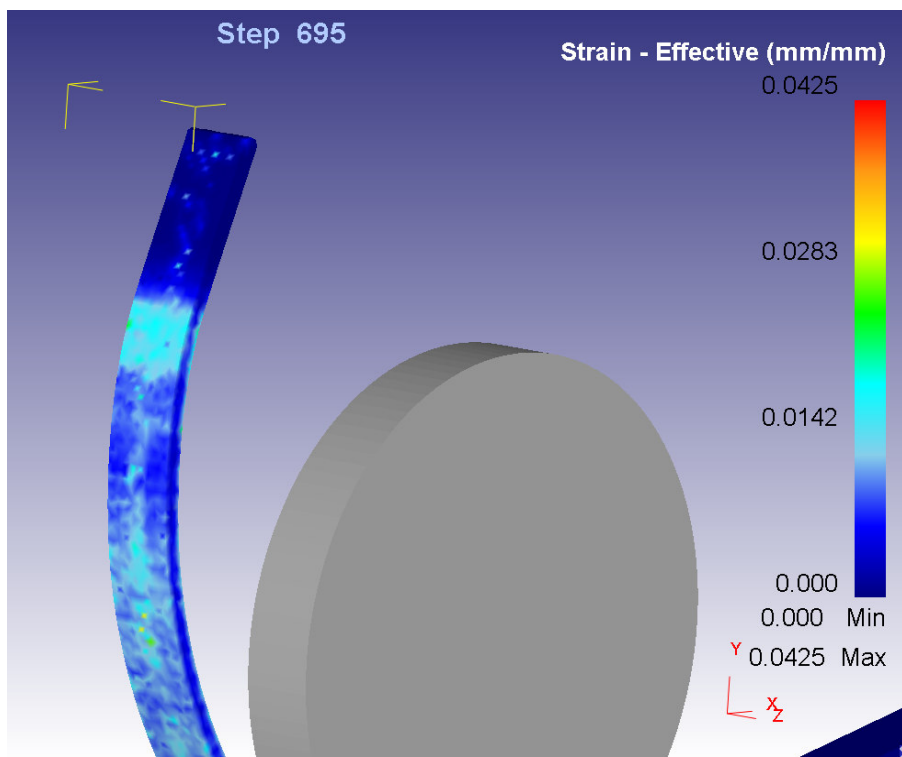
Как видно из рисунков 4.3, а, 4.4, а и 4.5, а, в месте контакта нажимного вала и заготовки при выполнении четвертой операции по стандартной технологии формовки, образуется локальный участок с высокими, относительно участка основного периметра, остаточными деформациями.

Наличие этого участка, кроме необходимости его устранения в процессе экспандирования, приводит к увеличению протяженности непроформованного участка за счет изменения точки приложения опорной реакции на выходном валке.

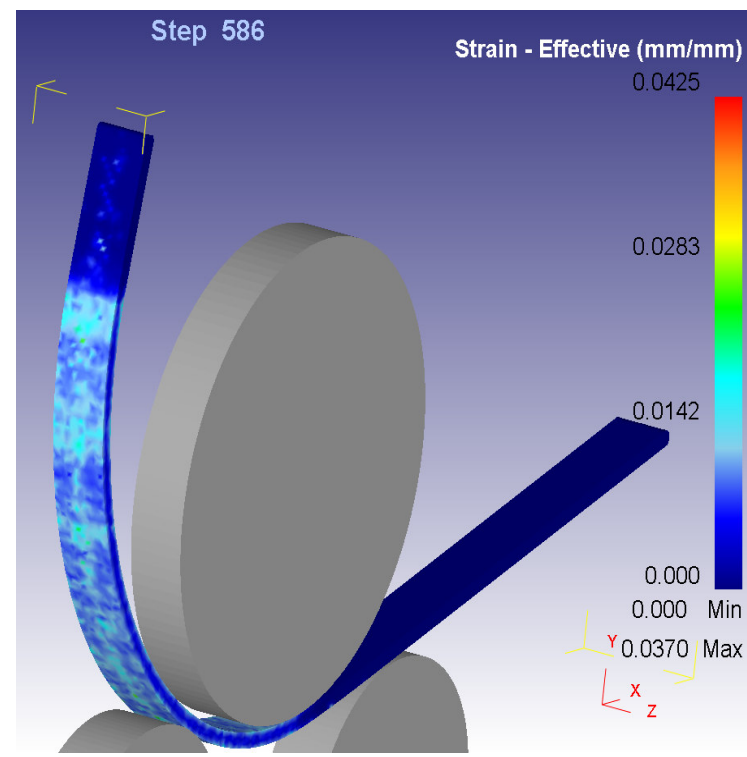
Деформации при изгибе  $\varepsilon$ , как известно [103], связаны с радиусом  $R$  зависимостью:

$$\varepsilon = \frac{y}{R}, \quad (4.1)$$

где,  $y$  – расстояние от нейтрального слоя до рассматриваемого, поэтому повышенные остаточные деформации соответствуют зоне с увеличенной кривизной.



a)



б)

Рисунок 4.3 – Остаточные деформации после формовки трубы размерами 1420x25,8мм:

а – по действующей схеме; б – по разработанной

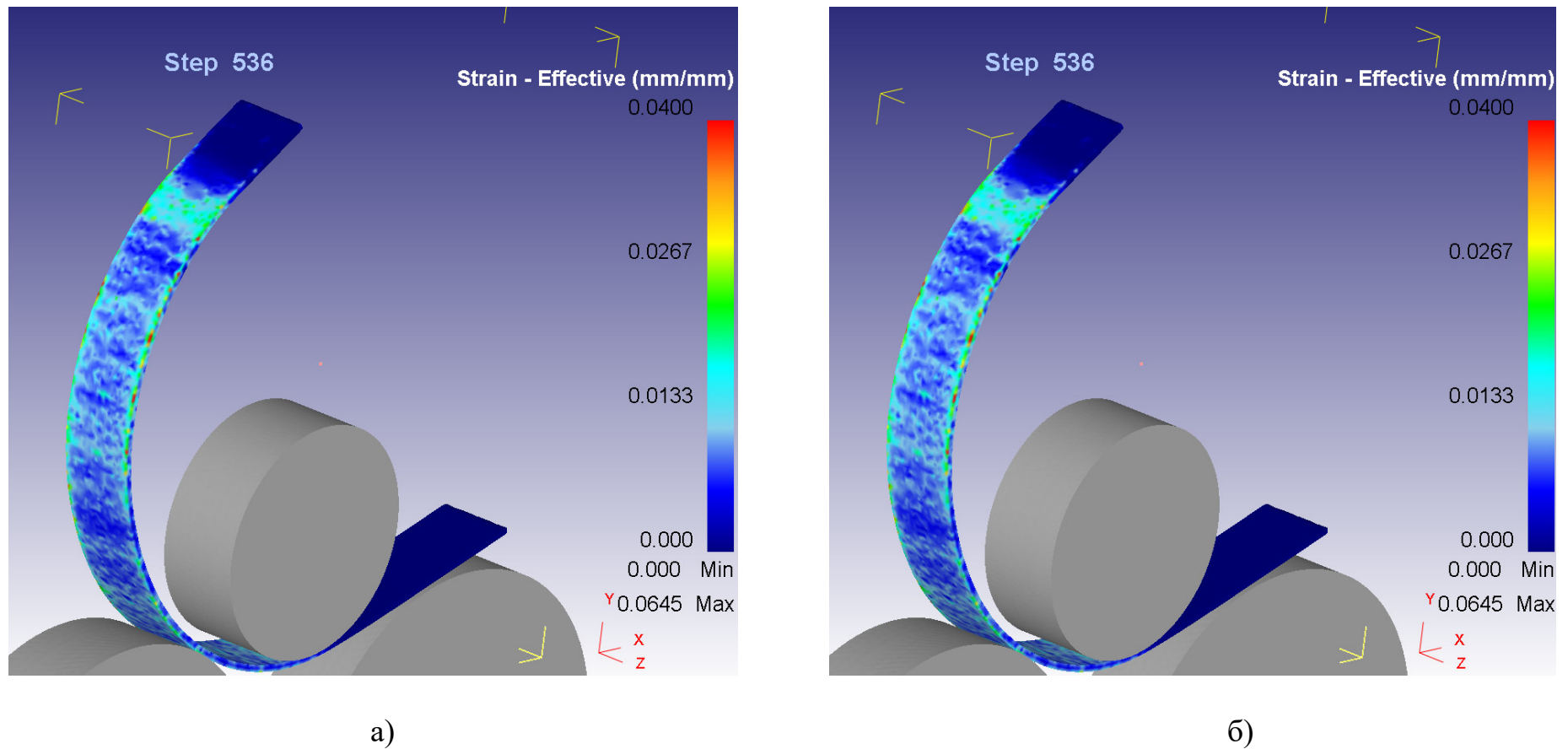


Рисунок 4.4 – Остаточные деформации после формовки трубы размерами 720x19 мм:

а – по действующей схеме; б – по разработанной

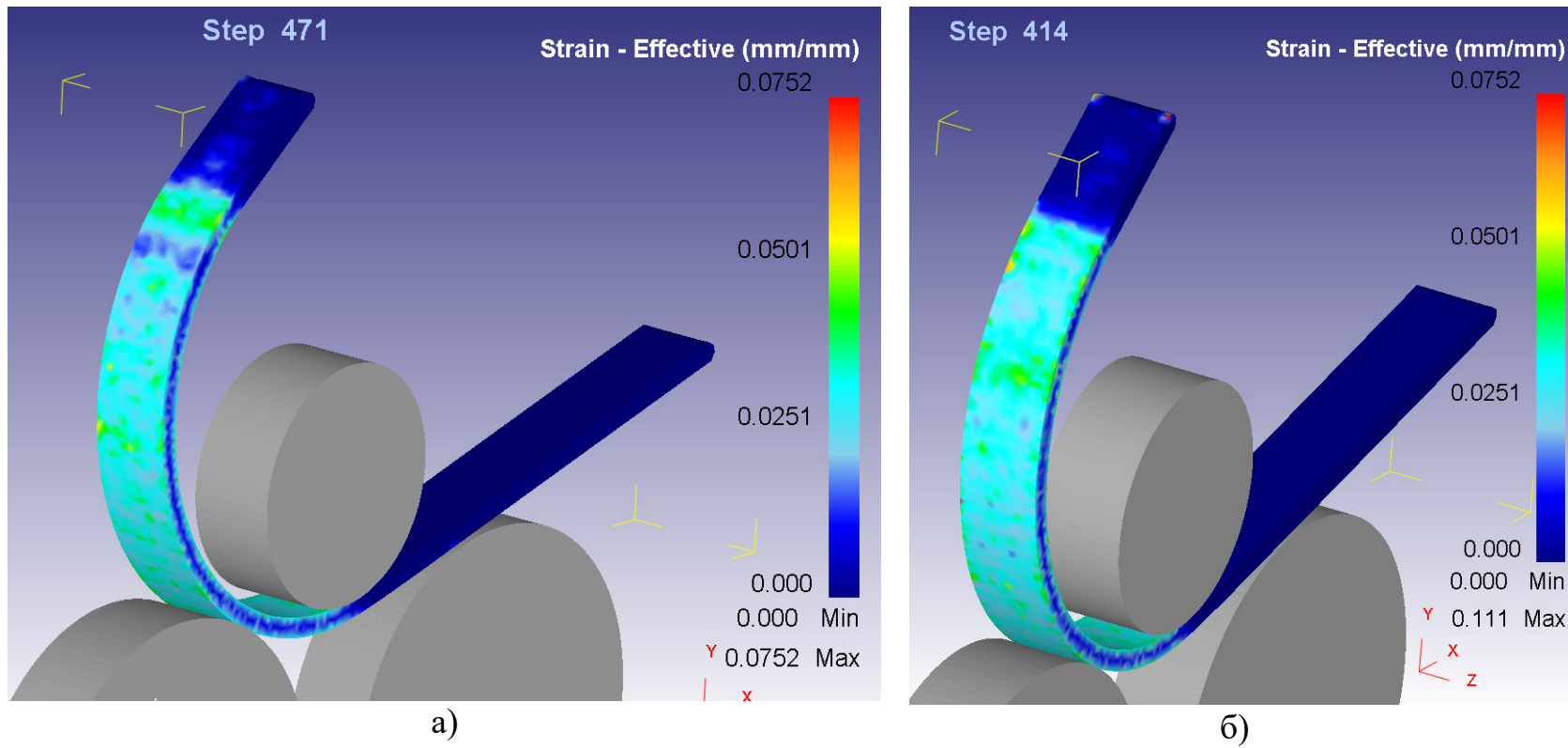


Рисунок 4.5 – Остаточные деформации после формовки трубы размерами 711x25,4 мм:  
а – по действующей схеме; б – по разработанной

Неоднородность остаточных деформаций в области перехода от плоского участка к основному периметру при разработанной технологии (Рисунки 4.3, б, 4.4, б и 4.5,б) снизилась во всех трех случаях. В наибольшей степени положительный эффект проявился на трубе размерами  $\varnothing 711 \times 25,4$  мм, где распределение остаточных деформаций в области перемещения нажимного вала равномерно и плавно переходит от области упругих деформаций до основного периметра. В меньшей степени эффект проявился на трубе размерами  $\varnothing 1420 \times 25,8$  мм, и совсем не значительно на трубе размерами  $\varnothing 720 \times 9$  мм.

### **4.3 Разработка режимов формовки труб**

Анализ результатов теоретических расчетов и конечно-элементного моделирования показал, что технология формовки «погружение+вращение» способствует снижению неоднородности наряду-деформированного состояния трубной заготовки после формовки.

С помощью методик расчета, приведённых в разделах 2.4 и 2.5 настоящего исследования, разработаны режимы формовки трубной заготовки для труб размерами  $\varnothing 1420 \times 25,8$  мм и  $\varnothing 711 \times 25,4$  мм, для машины формовки «RMS 12000/900» конструкции фирмы «Haeusler», используемой в трубоэлектросварочном цехе АО «Волжский трубный завод».

Режимы формовки для труб размерами  $\varnothing 711 \times 25,4$  мм разрабатывались согласно технологии «погружение+вращение». Режимы формовки для труб размерами  $\varnothing 1420 \times 25,8$  мм разрабатывались согласно стандартной технологии формовки.

Исходные данные, используемые в расчете, приведены в таблице 4.2. Диаметры опорных валков для всех типоразмеров труб составили 500 мм. Длина листов составляла 12000 мм.



Таблица 2.2 – Исходные данные для расчета

Размеры труб, мм	Группа прочности	Предел текучести $\sigma_T$ , МПа	Временное сопротивление $\sigma_B$ , МПа	Межцентровое расстояние опорных валков L, мм	Диаметр верхнего вала $D_B$ , мм
Ø711x25,4	K60	550	630	600	300
Ø1420x25,8	K56	480	520	800	900

Рассчитанные режимы формовки для указанных типоразмеров труб приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Технологические настройки ЛГМ

Размеры труб, мм	$H_0$ , мм	$H_1$ , мм	$H_2$ , мм	$H_3$ , мм	$H_3$ , мм	$V_{п}$ , м/мин	$V_{в}$ , м/мин
Ø711x25,4	71,6	78,4	-	-	-	0,03	5,4
Ø1420x25,8	-	34,7	66,9	82,4	88,7	-	10,3

L – межцентровое расстояние нижних валков;  $H_0$  – начальное перемещение верхнего вала;  $H_i$  – конечное перемещение верхнего вала в i-м проходе;  $V_{п}$  – скорость вертикального перемещения верхнего вала;  $V_{в}$  – скорость вращения верхнего вала.

При переносе расчетных значений величины перемещения  $H$  верхнего вала в программу управления нажимными гидроцилиндрами ЛГМ выполнен перерасчет величины перемещения в формат координат ЛГМ (Рисунок 4.6) по формуле:

$$X = L_1 - \sqrt{\left(\frac{D_3}{2} - \frac{D_1}{2}\right)^2 - \left(\frac{L_3}{2}\right)^2} - L_2 - D_2 + s + H_i, \quad (4.2)$$

где,  $L_1, L_2, L_3, D_1, D_2, D_3$  – параметры валковой системы ЛГМ;

$s$  – толщина листа;

$H_i$  – величина перемещения верхнего вала в i-ом проходе.

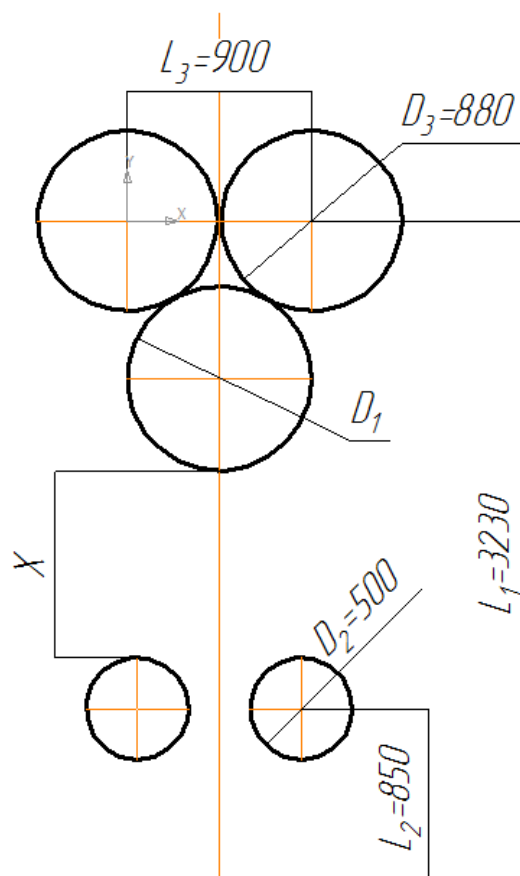


Рисунок 4.6 – Параметры валковой системы ЛГМ RMS 12000/900 (Haeusler).

#### 4.4 Промышленное апробирование результатов исследования

При производстве опытной партии труб размерами  $\varnothing 711 \times 25,4$  мм из стали К56 для проекта «Северный Каспий» апробировалась технология формовки «погружение+вращение» в соответствии с режимами указанными в таблице 4.2.

Формовка осуществлялась верхним валком диаметром 300 мм, при межцентровом расстоянии нижних валков 700 мм. Каждая половина листа формовалась в один проход.

С целью оценки неоднородности кривизны на переходном участке выполнялись замеры радиусов переходного участка и основного периметра с помощью индикаторного радиусомера. Результаты замеров представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Параметры трубной заготовки размерами  $\varnothing 711 \times 25,4$  мм после формовки

№ трубы	Стандартная технология		Технология «погружение+вращение»	
	Радиус переходного участка, мм	Радиус участка основного периметра, мм	Радиус переходного участка, мм	Радиус участка основного периметра, мм
1	320	382	–	–
2	325	385	–	–
2	328	386	–	–
3	322	389	–	–
4	320	387	–	–
5	328	390	–	–
6	327	391	–	–
7	328	380	–	–
8	325	382	–	–
9	326	383	–	–
10	–	–	346	382
11	–	–	352	385
12	–	–	340	386
13	–	–	338	389
14	–	–	340	387
15	–	–	350	390
16	–	–	356	391
17	–	–	355	380
18	–	–	352	382
19	–	–	356	383
<b>Ср.знач.</b>	<b>324,8</b>	<b>385,5</b>	<b>348,5</b>	<b>385,5</b>
Расчет	300	363	363	363
Ошибка, %	8,2	6,1	-3,9	6,1

Результаты эксперимента показывают, что при формовке по технологии «погружение + вращение» разница радиусов участка основного периметра и переходного участка снизилась в среднем на 64%.

Трубные заготовки после формовки имели длину плоских участков от 190 до 210 мм. Межкромочный зазор по переднему торцу составлял от 62 до 68 мм по заднему торцу и от 66 до 69 мм.

Все трубы из опытной партии успешно прошли этапы догибки кромок, сборки, сварки и экспандирования.

По результатам производства партии труб размерами  $\varnothing 1420 \times 25,8$  мм выполнена верификация фактических и расчетных значений радиуса трубной заготовки на выходе из очага деформации. Для этого изменялся радиус заготовки после первого и третьего проходов с переднего торца трубы и определялась величина ошибки.

В таблице 4.5 показаны сравнительные результаты расчетов отклонения величины радиуса заготовки от фактического.

Таблица 4.5 – Сравнительные результаты расчета радиусов формовки труб размерами  $\varnothing 1420 \times 25,8$  мм в первом и третьем проходах.

№ трубы	I проход		III проход	
	Радиус по наружной поверхности, мм	Ошибка, %	Радиус по наружной поверхности, мм	Ошибка, %
1	1459	3,0	791	5,3
2	1451	2,5	792	5,5
3	1455	2,8	790	5,2
4	1453	2,6	798	6,3
5	1452	2,5	793	5,6
6	1455	2,8	790	5,2
7	1458	3,0	792	5,5
8	1455	2,8	790	5,2
9	1458	3,0	795	5,9
10	1452	2,5	798	6,3
<b>Ср.знач.</b>	<b>1454,8</b>	<b>2,7</b>	<b>792,9</b>	<b>5,6</b>
Расчет	1416,6	–	751	–

Трубные заготовки после формовки имели длину плоских участков от 250 до 260 мм. Межкромочный зазор по переднему торцу составлял от 60 до 65 мм по заднему торцу от 75 до 83 мм.

Сравнительный анализ расчетных и фактических значений радиуса формовки свидетельствует о том, что разработанная математическая модель позволяет с достаточной для инженерной практики точностью определять радиус заготовки на выходе из очага деформации.

#### 4.5 Выводы по главе 4

1. Проблема неустойчивости прогиба валка может быть решена с помощью системы автоматического регулирования усилия противоизгиба. Измерение прогиба валка возможно производить средствами машинного зрения.

2. Результаты проведенных численных экспериментов на конечно-элементной модели показали, что технология формовки «погружение + вращение» способствует стабилизации кривизны в поперечном сечении трубной заготовки в области перехода плоского участка в основной периметр.

Расчетные значения радиусов трубной заготовки сравнивали с результатами конечно-элементного моделирования. Расхождение результатов составило от 4 до 8%.

3. В процессе изготовления опытных партий труб размерами  $\emptyset 1420 \times 25,8$  мм и  $\emptyset 711 \times 25,4$  мм обеспечено заданное качество трубных заготовок после формовки. Диаметр заготовки, длина плоских участков и ширина межкромочного зазора трубных заготовок находились в пределах допуска.

4. При формовке трубных заготовок размерами  $\emptyset 711 \times 25,4$  мм, за счет реализации технологии «погружение+вращение» удалось снизить разницу кривизны переходных участков и основного периметра.

5. Все трубы из опытных партий успешно прошли этапы догибки кромок, сборки, сварки и экспандирования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана математическая модель формовки листа в трехвалковых листогибочных машинах по технологии «погружение+вращение». Полученные аналитические зависимости позволяют без привлечения сложного математического производить расчеты настройки положения валков и энергосиловых параметров процесса формовки. Полученные зависимости обеспечивают достаточную для инженерной практики точность.

2. С помощью метода начальных параметров разработана методика расчета прогиба верхнего валка. Полученная методика позволяет определять усилие противоизгиба валка для любого заданного значения прогиба.

3. Методом торможения полосы в валках уточнен коэффициент трения для условий вальцевой формовки, который составил  $0,245 \pm 0,035$ ,

4. Разработанная математическая модель процесса формовки и модель прогиба валка реализована в виде программного продукта «ТЭСЦ.Технолог» и внедрена в рабочий процесс технических служб на АО «Волжский трубный завод» (Приложение Д).

5. Экспериментально в условиях промышленного производства установлено, что прогиб верхнего валка в пределах одного прохода переменный. Для стабилизации прогиба предложена система автоматического регулирования прогибом.

6. Разработана технология формовки «перемещение + вращение». Показано, что данный способ позволяет обеспечить равномерное напряженно-деформированное состояние трубной заготовки на переходных участках.

7. Технология формовки «перемещение + вращение» апробирована на конечно-элементной модели и при производстве опытной партии труб размерами  $\varnothing 711 \times 25,4$  мм (Приложение Д). Методика расчета радиуса формовки на выходе из очага деформации апробирована при производстве опытной партии труб размерами  $\varnothing 1153 \times 30,9$  мм.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

### 1.1.

1. Гребеник, В.М. Надежность металлургического оборудования / В.М. Гребеник, В.К. Цапко, Справочник. — М.: Металлургия, 1980. — 344 с.
2. Иванцов, О.М. Надежность строительных конструкций магистральных трубопроводов/ О.М. Иванцов – М.: Недра, 1985. — 231 с.
3. Темплинский, Ю.А. Управление эксплуатационной надежностью магистральных газопроводов / Ю.А. Темплинский, И.Ю. Быков – М.: ЦентрЛитНефеГаз, 2007. – 400с.
4. Костюченко, А.А. Надежность подводных переходов: проблема и ее решение / А. А. Костюченко, А. М. Бордовский, В. В. Воробьев [и др.]. // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F: Строительство. Прикладные науки. - 2007. - № 12. - С. 78-84.
5. Строкова, Л.А., Ермолаева А.В. Природные особенности строительства магистрального газопровода «Сила Сибири» на участке Чаяндинское нефтегазоконденсатное месторождение - Ленск // Известия Томского политехнического университета. 2015. Т. 326. № 4. С. 41-55.
6. Дайнеко, А.Д. О развитии трубной отрасли России в условиях таможенного союза. // Трубы-2011: сборник докладов XXI Международной научно-практической конференции, Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности. – Челябинск: РосНИТИ, 2011.– Ч.1.– С. 1-11.
7. Курбатов, Н.И. Трубный рынок. Строительные требования к трубам. / Н.И. Курбатов // Трубопроводный транспорт 2007 – №2(8) – с 22-26.
8. ГОСТ Р 52079-2003. Трубы стальные сварные для магистральных газопроводов, нефтепроводов и нефтепродуктопроводов.
9. Арабей, А.Б. О перспективных требованиях ОАО «ГАЗПРОМ», предъявляемых к трубной продукции для новых проектов газопроводов./ А.Б. Арабей, Т.С. Елисеев// Трубы-2011: сборник докладов XXI Международной

научно-практической конференции, Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности. – Челябинск: РосНИТИ, 2011. – Ч. 1. – С. 45-55.

10. P. Boothby, X80 pipelines in the UK: over a decade of experience. – Industrial Production, Testing and Application of X80/X90 High Strength Line Pipe Steels – London 2013. – 130 p. – P. 128 - 130.

11. ТУ 14-156-77-2008. Трубы стальные электросварные прямошовные диаметром 530-1420 мм для магистральных газопроводов на рабочее давление до 9,8 МПа включительно. Технические условия.

12. Ерофеева, Л.В. Трубный рынок. Трубы для сухопутных и морских магистральных трубопроводов высокого давления. Строительные требования к трубам / Л.В. Ерофеева // Трубопроводный транспорт 2007 – №2(8) – с 26-38.

13. Бровман, М.Я. Точность труб и точность трубопроводов: две проблемы – одно решение / М.Я. Бровман// Производство проката – 2018 – №7 – С. 14-22.

14. Бородавкин, П.П. Морские нефтегазовые сооружения. Часть 2. Технология строительства / П.П. Бородавкин, М.: ООО Недр-Бизнесцентр, 2007. - 408 с.

15. Судзуки, Н. Применение труб с высокой деформационной способностью при изготовлении методом холодного изгиба криволинейных отводов с большим углом / Н. Судзуки [и др.] // Газовая промышленность. 2017. № 4. С. 66-71.

16. Пат. RU 2656189 С1 Труба с повышенной деформационной способностью и высокой вязкостью сварного соединения и способ ее изготовления. / ОАО "Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности", ПАО "Магнитогорский металлургический комбинат", АО "Волжский трубный завод". Заявл. 13.02.2017, опубл. 31.05.18.



## 1.2.

17. Погоржельский, В.И. Контролируемая прокатка непрерывнолитого металла/ В.И. Погоржельский, – М: Metallurgy, 1986, 151 с.
18. Григорьев, А.К., Термомеханическое упрочнение стали в заготовительном производстве / А.К. Григорьев, Г.Е. Коджаспиров – Л: Машиностроение, 1985, 143 с.
19. Авдеев, В. А. Основы проектирования металлургических заводов / В. А. Авдеев, В. М. Друян, Б. И. Кудрин. – М. Интермет Инжиниринг, 2002. - 464 с.
20. Гасияров, В.Р. Мехатронный технологический комплекс толстолистового стана 5000 горячей прокатки [Текст] / В.Р. Гасияров, А.А. Радионов // Электротехнические системы и комплексы. - 2013. - № 21. - С. 13-20.
21. Воронин, С.С., Прогиб валков как параметр, влияющий на поперечную разнотолщинность листа и система управления противоизгибом толстолистовых станов горячей прокатки/ С.С. Воронин, Д.Ю. Усатый // Машиностроение: сетевой электронный журнал.– 2013.– №1. – С. 51-55.
22. Гасияров, В.Р. Системы регулирования толщины, профиля и планшетности полосы на толстолистовом стане 5000 ОАО “ММК” / В.Р. Гасияров, О.А. Залогин, А.А. Радионов // Наука и производство Урала. – 2010. – №6. – С. 107-112.
23. Котов, К.А. Исследование механизма формирования остаточных напряжений при правке горячекатаных полос на роликовых правильных машинах/ К.А. Котов, Д.В.Нуштаев, Н.Л.Болобанова. // Материалы IV Международной научной конференции «Научно-технический прогресс в черной металлургии - 2019» С.103-109.
24. Котов, К.А. Исследование и совершенствование процесса правки горячекатаных полос в условиях циклической знакопеременной деформации: автореф. дис. канд.техн.наук: 05.16.05/ Котов Кирилл Андреевич.–М.,2016.–23с.

25. ТУ 1303-002-08620133-01-ТУ-ЛУ. Трубы электросварные из углеродистых и низколегированных сталей для трубопроводов пара и горячей воды.
26. Пышминцев, И.Ю. Разработка высокопрочных сталей и технологий для производства спиральношовных труб / И.Ю. Пышминцев, И.Л. Пермяков, В.И. Столяров // Черная металлургия, 2008, №1.
27. Марченко, Л.Г. Совершенствование технологии производства спиральношовных ТБД для реализации национальных трубопроводных проектов / Л.Г. Марченко // Металлург. - 2006.- №11.
28. Пат. 103510003, КНР, МПК С 21 D 8/02, С 22 С 33/04. Large deformation resistant multiphase X100 high-strength steel plate for large diameter pipeline and manufacturing method for steel plate / Xia Tianxiu, Sun Weihua. Заявл. 22.09.2013; опубл. 15.01.2014.
29. Пат. 101205596, КНР, МПК В 23 К 35/22, В 23 К 9/18. X120 pipeline steel submerged arc straight weld pipe and manufacture technique thereof / Yanfeng Li, Jinghui Ren. Заявл. 10.12.2007; Опубл. 25.06.2008.
30. Пат. RU 2429922 Способ горячей прокатки и термообработки стальной полосы/ СМС ЗИМАГ АГ (DE). Заявл.04.06.2008, опубл.27.09.2011.
31. Пат. RU 2225887 С2 Способ производства толстолистовой низколегированной стали / ОАО «Северсталь». Заявл.22.05.2002, опубл.20.03.2004.
32. Пат. EP 1764423 A1, Method for producing high tensile steel sheet/ Опубл. 21.03.2007.
33. Недзвецкий, М.Ю. Освоение производства труб большого диаметра класса прочности К80 (X100) В России / М.Ю.Недзвецкий, А.Б. Арабей, К.Ю.Ментюков, М.С.Сахаров , А.И.Смелов, П.П.Степанов , Д.А.Рингинен А.Б.Гизатуллин , С.В.Шандер// Научно-Технический сборник вести газовой науки. – 2020г.– №2 – С 22-24.

34. Пат. RU 2697532 С1. Способ лазерно-дуговой сварки труб/ ПАО «Челябинский трубопрокатный завод». Заявл. 3012.2018, опубл. 15.08.2019.

### 1.3.

35. Осадчий, В.Я. Технология и оборудование трубного производства: Учебник для вузов / В.Я. Осадчий, А.С. Вавилин, В.Г. Зимовец, А.П. Коликов – М.: «Интермет Инжиниринг», 2001. – 608 с.

36. Дряян, В.М. Теория и технология трубного производства/ В.М. Дряян – Днепропетровск: РИА «Днепр-ВАЛ», 2001. – 544 с.

37. Кондратов, Л.А. Оценка формуемости и продольной устойчивости высокопрочных труб по технологии УОЕ / Л.А. Кондратов // Ин-т «Черметинформация». Новости черной металлургии за рубежом. – 2011. – № 2. – С. 56 – 58.

38. Самусев, С.В. Анализ способов формовки заготовки для производства труб большого диаметра / С.В. Самусев, А.В. Люскин, В.В. Больдт// Сталь. 2009. № 12 С. 46-49. –

39. Самусев, С.В., Производство труб большого диаметра по «J-O» схеме. / Самусев С.В., Люскин А.В., Больдт В.В. // Прогрессивные технологии пластической деформации МИСиС. – М.: Изд. дом МИСиС, 2009.

40. Самусев, С.В. Методики формоизменения трубной заготовки для производства труб ответственного назначения для проекта «Южный поток» в условиях ОАО «ЧТПЗ» / С.В. Самусев, А.В. Люскин, В.В. Больдт, К.Л. Жигунов, А.И. Романцов // Сборник докладов международного научно-технического конгресса «ОМД» 2014. Фундаментальные проблемы. Инновационные материалы и технологии». – 2014. – Ч. 2. – С. 46.

41. Коликов, А.П. Машины и агрегаты трубного производства / А.П. Коликов, В.П. Романенко, С.В. Самусев // М.: МИСиС, 1998. - 536 с.

42. Шинкин, В. Н., Упругопластическое формоизменение металла на кромкогибочном прессе при формовке труб большого диаметра / Шинкин В. Н., Коликов А. П. // «Сталь». 2011. № 6 с.

43. Шинкин, В.Н. Формовка листовой заготовки в кромкогибочном прессе и условие возникновения гофра при производстве труб магистральных трубопроводов / В.Н. Шинкин, А.П. Коликов. // Производство проката. – 2011. – № 4. – С. 14 – 22.

44. Ильичев, В.Г. Технологические особенности процесса формовки прямошовных труб для нефтегазопроводов/ В.Г. Ильичев // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации – 2009.№5.–С.60-62.

#### 1.4

45. Шабалов, И.П. Стали для труб и строительных конструкций с повышенными эксплуатационными свойствами /, И.П. Шабалов, Ю.Д. Морозов, Л.И. Эфрон. – М., Металлургиздат, 2003.- 520 с;

46. Эфрон, Л.И. Металловедение в «большой» металлургии. Трубные стали / Л.И. Эфрон. – М.: Металлургиздат, 2012. – 696 с.

47. Бровман, М.Я. Непрерывная разливка металлов / М.Я. Бровман. – М.: Экомет, 2007.- 484 с.

48. Нисковских, В.М. Машины непрерывного литья слябовых заготовок/ В.М.Нисковских, С.Е.Карлинский, А.Д.Беренов –М.: Металлургия, 1991. - 272с.

49. Нестеров, Г.В. Изменение механических свойств листового проката в процессе изготовления труб большого диаметра для магистральных нефтепроводов/ Г.В. Нестеров, Д.А. Гаврилов, П.В. пошибаев, А.И.азарин // Механика машин, механизмов и материалов – 2017г. №4, С. 56 – 65.

50. Шабалов, И.П. Влияние УО-образной схемы формовки на комплекс механических свойств металла электросварных труб большого диаметра /И. П. Шабалов, Д. М. Соловьев, Г. А. Филиппов, О. В. Ливанова// Сталь, 2015г №4 С.56-61.

51. Соловьев, Д.М. Влияние способа формовки нефтегазопроводных труб большого диаметра класса прочности К60 на процессы деформационного старения и сопротивление разрушению автореферат/ дис. ... кандидата технических наук // Центр. науч.-исслед. ин-т чер. металлургии им. И.П. Бардина. Москва, 2015
52. Хадеев, Г.Е. Влияние многостадийной знакопеременной деформации в ходе трубного передела на изменение механических свойств сталей различных классов прочности/ Г.Е. Хадеев// Сборник трудов IX-ой Евразийской научно-практической конференции «Прочность неоднородных структур - Прост 2018» Москва, 24-26 апреля 2018 г.
53. Голи-Оглу, Е.А Влияние трубного передела на результаты теста ИПГ низкоуглеродистой микролегированной стали / Е.А., Голи-Оглу, А.В. Порошков // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2013. № 3. С. 75-78.
54. Махутов, Н. А. Влияние экспандирования труб на перераспределение остаточных напряжений после формовки/ Махутов, Н. А., Неганов Д. А., Студёнов Е. П. // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2020. Т. 10. № 2.С. 122–126.
55. Биргер, А.И. Метод определения остаточных напряжений в тонкостенных трубах/ А.И. Биргер // Заводская лаборатория №9, 1961.
56. Давиденков, Н.Н. Избранные труды: в 2-х т. Т. 2. Механические свойства материалов и методы измерения деформаций, Киев: Наукова думка, 1981. 656 с.
57. Аверкиев, Ю.А. Технология холодной штамповки /Аверкиев Ю.А., Аверкиев А.Ю.: М.Машиностроение, 1989. – 304с.
58. Смирнов, М.А. Деформационное старение низкоуглеродистой трубной стали / М.А. Смирнов, И.Ю.Пышминцев, О.В.Варнак, А.О. Струин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. 2013. Т. 13. № 1. С. 129-133.

## 1.5

59. Матвеев, Ю.М. Технология производства электросварных труб./ Матвеев Ю.М., Ружинский М.Б., Ромашов А.А., Халамез Е.М.// Москва: Металлургия, 1967. — 163 с.
60. Мошнин, Е.Н. Гибка и правка на ротационных машинах / Е.Н. Мошнин.- М.: Машиностроение, 1967. - 272 с.
61. Лысов, М.И. Теория и расчет процессов изготовления деталей методами гибки. / М.И. Лысов .- Л.: Машиностроение, 1966. – 236 с.
62. Попов, Е.П. Теория и расчет гибких упругих стержней. / Е.П. Попов. - М.: Наука, 1986, 296 с.
63. Коликов, А.П. Обработка металлов давлением: теория процессов трубного производства/ А.П.Коликов, Б.А. Романцов, А.С.Алещенко.- М: Изд.Дом «МИСиС», 2019.-502с.
64. Боуден, Ф.П. Трение и смазка твердых тел / Ф.П. Боуден, Д. Тейбор. – М.: Машиностроение, 1968. – 544 с.
65. Budinski, K.G. Guide to Friction, Wear and Erosion Testing. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007, 132 pages
66. Павлов, И.М. Обработка металлов давлением. / Павлов И.М., Федосов Н.М., Северденко В.П., Тарновский И.Я., Ланге Б.Л., Охрименко Я.М., под ред. И.М. Павлова. Москва: Металлургиздат, 1955. - 484 с.
67. Зибель, Э. Обработка металла давлением в пластическом состоянии. / Э.Зибель.– М.Металлургиздат, 1934. – 197с.

## 2.1

68. Тимошенко, С.П. Сопротивление материалов. / Тимошенко С.П. - Том 1. Элементарная теория и задачи. Изд. 2-е, стереотип., Пер. с англ. В.Н.Федорова. – М.: Наука, 1965.

## 2.2

69. Антонов, А.В. Системный анализ./ А.В. Антонов — М.: Высшая школа, 2004. — 454 с.

70. Качала, В.В. Основы теории систем и системного анализа / В.В. Качала Учебное пособие для вузов. — М.: Горячая линия — Телеком, 2007. — 216 с.
71. Дукмасов, В.Г. Математические модели и процессы прокатки профилей высокого качества/ В.Г.Дукмасов, А.В. Выдрин. Монография. —Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2002г.— 215 с.
72. Джонсон, У. Теория пластичности для инженеров / У. Джонсон, П. Меллор. — М.: Машиностроение, 1979.

### 2.3

73. Матвеев, Ю.М. Исследование процесса формовки полуцилиндров для производства труб большого диаметра / Ю.М. Матвеев, Е.М. Халамез, В.Я. Иванцов, Л.И. Зайончик // Производство сварных и бесшовных труб. — 1971. — № 13. — С. 93 — 96.
74. Чечулин, Ю.Б. Особенности нагружения технологического инструмента при предварительной формовке труб большого диаметра / Ю.Б. Чечулин, Н.Ю. Боклаг. Ю.В. Песин, А.М. Золотов // Сталь. — 2014. — №5. — С. 68 — 70.
75. Звонарев, Д.Ю. Совершенствование процессов подгибки кромок и шаговой формовки сварных труб большого диаметра для обеспечения высокой точности размеров и форм. автореферат/ дис. ... кандидата технических наук // «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет) ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ). Челябинск, 2015.
76. Грановский, В.А. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях// В.А. Грановский, Т.Н. Сирая // Л.Энергоатомиздат, 1990.— 288с.
77. Кравченко, Н.С. Методы обработки результатов измерений и оценки погрешностей в учебном лабораторном практикуме / Н.С.Кравченко, О.Г. Ревинская. — Томск: Изд-во ТПУ, 2011. — 88 с.
78. Спирин, Н.А. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента: Учебное пособие / Н.А. Спирин, В.В. Лавров,

Л.А.Зайнуллин, А.Р. Бондин, А.А. Бурькин; Под общ. ред. Н.А. Спирина. — Екатеринбург: ООО «УИНЦ», 2015. — 290 с.

79. Реброва, И.А. Планирование эксперимента: учебное пособие/ И.А. Реброва – Омск:СибАДИ, 2010. –105 с.

80. Fisher, R.A. The Design of Experiments / R.A.Fisher / 9th Edition. — Hafner Press, 1971, First Published 1935. — 256 p.

81. Адлер, Ю.П., Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий/ Ю.П. Адлер, Е.В.Маркова, Ю.В.Грановский. – М.: Наука, 1976.-269с.

82. Antony J. Design of Experiments for Engineers and Scientists, / Antony J. // Elsevier, 2014. – 155p.

## 2.5

83. Головин, А.Ф. Прокатка. Часть II. Теория продольной прокатки/ А.Ф. Головин. - Свердловск: ОНТИ, 1934. – 236 с.

84. Выдрин, А.В. Теория пластической деформации металлов и сплавов/ А.В. Выдрин. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2020. – 218с.

## 2.6

85. Рубинин, М.В. Руководство к практическим занятиям по сопротивлению материалов. / М.В. Рубинин. – Росвузиздат, 1963 г.

86. Александров, А.В. Сопротивление материалов./ А.В. Александров., В.Д.Потапов., Б.П.Державин. –М. Высшая школа, 2003г.

87. Ободовский, Б.А. Сопротивление материалов в примерах и задачах./ Б.А. Ободовский, С.Е.Ханин. – Харьков, издательство Харьковского университета, 1971г.

88. Павлов, И. М. / Павлов, И. М., Галлай Я.С, Силин Н. В. //— Металлург, 1934, № 4, с. 6—36.

89. Грудев, А. Я. Внешнее трение при прокатке/ А. Я. Грудев. - М.: Металлургия, 1973. 288 с.

90. Кобаяси, А. Экспериментальная механика: Пер. с англ. / А. Кобаяси // – М.:Мир,1990. – 552с.



91. Буркин, Г. В., Остаточные напряжения в металлопродукции : учебное пособие / Г. В. Буркин, С. П. Шимов, Е. А. Андрюкова. — Екатеринбург :Изд-во Урал. ун-та, 2015. — 248 с.

### 3.3

92. Дель, Г.Д. Определение напряжений в пластической твердости по распределению твердости/ Г.Д. Дель. - М.: Машиностроение, 1971. – 198 с.

93. А. Ф Алейников. Датчики. перспективные направления развития: учебное пособие. / Алейников, А. Ф., Гридчин В. А., Цапенко М. П. - НГТУ, 2001. – 176 с.

94. Литвак, В.И. Фотоэлектрические датчики в системах контроля, управления и регулирования / В.И. Литвак. – М. -Л.: Госэнергоиздат1966.– 412 с.

95. ГОСТ Р 51833-2001. Фотограмметрия. Термины и определения.

### 4.1

96. Бесекерский, В. А. Теория систем автоматического регулирования. Издание третье, исправленное / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. - М: Наука, 1975.

97. Шандров, Б. В. Технические средства автоматизации: учебник для студентов высших учебных заведений / Б. В. Шандров. - Москва, Издательский центр «Академия», 2007г.

98. Башта, Т. М. Гидравлические приводы летательных аппаратов. Издание 4-е, переработанное и дополненное / Т. М. Башта. - М.:Машиностроение», 1967.

99. Схиртладзе, А. Г. Гидравлические и пневматические системы. Издание 2-е, дополненное // А. Г.Схиртладзе, В. И. Иванов, В. Н. Кареев. - М.: ИЦ МГТУ «Станкин», «Янус-К», 2003 г. — 544 с.

100. Самусев, С.В. Анализ результатов расчета напряженно-деформированного состояния трубной заготовки участка ПШФ линии ТЭСА 1420. / С.В.Самусев, Г.П.Жигулев, В.А. Фадеев // Инженерные системы–2016:

Труды Международного форума: Москва, 4–5 апреля 2016 г. / Инжиниринговая компания «ТЕСИС». – М.: МАКС Пресс, 2016. – 200 с.

101. Товмасын, М.А., Исследование процесса формовки труб большого диаметра с использованием современных компьютерных систем/ М.А. Товмасын, С.В. Самусев, В.А. Сазонов //Металлург. 2016. No 2. С. 54-58.

102. Самусев, С. В. Разработка методики определения параметров трубной заготовки при подгибке кромок в линии ТЭСА 1420 / С. В. Самусев, М. А. Товмасын // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2017. – Т. 60. – № 3. – С. 187-191. – DOI 10.17073/0368-0797-2017-3-187-191.

103. Илюшин, А.А. Пластичность. ч.1 Упруго-пластические деформации/ А.А. Илюшин. – ОГИЗ, 1948г;

**ПРИЛОЖЕНИЕ А**

(обязательное)

**Акт внедрения результатов диссертационного исследования**

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель главного инженера

Начальник технического управления АО «ВТЗ»

 С.В.Тумашев

«24» августа 2021г.

**АКТ ВНЕДРЕНИЯ**

результатов диссертационного исследования Я.Е. Залавина

Настоящим актом подтверждается, что в ходе разработки технологии формовки труб большого диаметра в условиях трубозлектросварочного цеха АО «ВТЗ» Я.Е.Залавиным разработана математическая модель формовки труб в трехвалковых вальцах, которая позволила рассчитать режимы формовки, в частности, позиционирование валков, угол поворота валков и энергосиловые параметры.

Предположенная методика расчета, представленная в диссертационной работе Я.Е.Залавина, реализована и внедрена в виде программного комплекса «ТЭСЦ.Технолог» в АО «ВТЗ», что позволило оперативно рассчитывать технологические режимы работы машины вальцевой формовки и сократить время настройки агрегата при переходах на новые типоразмеры труб.

На основе результатов диссертационного исследования предложена и внедрена технология формовки труб  $\varnothing$  530-920 мм с повышенной равномерностью деформаций поперечного сечения заготовки в зоне перехода плоского участка в основной периметр, что позволило обеспечить выпуск трубной продукции в соответствии с требованиями технических регламентов.

СОГЛАСОВАНО:

Начальник ЦЗЛ



М.В.Буняшин

Начальник сварочной лаборатории ЦЗЛ



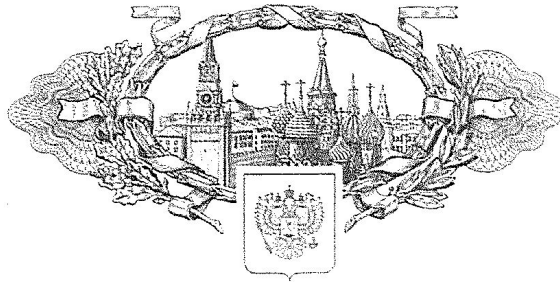
Н.П.Титаренко

# ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)

## Свидетельство регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



### СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2017611243

**Программа для расчета технологических и энергосиловых параметров трехвалковых листогибочных машин**

Правообладатель: *Открытое акционерное общество «Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности» (ОАО «РосНИТИ») (RU)*

Авторы: *Ильичев Владимир Гаврилович (RU),  
Заливин Яков Евгеньевич (RU)*

Заявка № 2016663150

Дата поступления 01 декабря 2016 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 01 февраля 2017 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

*Г.П. Исаев* Г.П. Исаев

