

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой  
степени кандидата технических наук

Челябинск 2022

**Работа выполнена** на кафедре «Процессы и машины обработки металлов давлением» (ПиМОМД) Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» и в Акционерном обществе «Русский научно-исследовательский институт трубной промышленности».

**Научный руководитель:** **Выдрин Александр Владимирович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Процессы и машины обработки металлов давлением», ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)».

**Официальные оппоненты:** **Песин Александр Моисеевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технологии обработки материалов», ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова», г. Магнитогорск. **Нухов Данис Шамилевич** кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Обработки металлов давлением» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург.

**Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»» (НИТУ «МИСиС»), г. Москва.

Защита диссертации состоится «14» сентября 2022 г. в 14-00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.437.01 (Д212.298.01) при Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ЮУрГУ(НИУ), главный корпус, ауд. 1001.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ЮУрГУ (НИУ), Ученый совет. Тел. (351) 267-91-23, e-mail: [zalavin@rosniti.ru](mailto:zalavin@rosniti.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)» и на сайте:

<https://www.susu.ru/ru/dissertation/24243701-d-21229801/zalavin-yakov-evgenevich>

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук, доцент



Шабурова Н.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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 стоимость и характеристики качества продукции.

Кроме этого, в связи с 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 формовки 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, что затрудняет обеспечение повышенных требований к геометрическим характеристикам труб после экспандирования.

По причине прогиба верхнего вальца, образуется продольная неравномерность деформации приводящая к дефектам формы межкромочного зазора, которые затрудняют процесс сборки и сварки труб и вызывают дополнительные остаточные напряжения в трубной заготовке.

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 вальца, 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 фрикционных 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 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.

#### **Научная новизна работы**

1. Выявлены закономерности образования аномальных участков кривизны поперечного сечения трубной заготовки в зоне перехода от плоского участка в основной периметр.

2. Получены новые зависимости для расчета формоизменения листовой заготовки при вальцевой формовке, учитывающие неравномерность деформаций на переходе плоского участка в основной периметр.

3. Разработана методика расчета прогиба верхнего вала. Показано, что прогиб изменяется в пределах одного прохода из-за переменной жесткости системы «верхний валок-заготовка».

4. Уточнены механизм формирования и методика расчета остаточных напряжений в трубной заготовке после формовки. Показано, что при наличии прогиба вала в трубной заготовке возникают дополнительные остаточные напряжения до  $0,24\sigma_T$ .

5. Установлены значения коэффициента трения для вальцевой формовки, что позволяет достоверно определять ресурс фрикционных сил на границе «инструмент-заготовка».

#### **Теоретическая и практическая значимость.**

1. 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.

2. 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 «Волжский трубный завод» (АО «ВТЗ») в повседневной работе.

3. 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 лицензионных 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.

**Степень достоверности** результатов работы подтверждена верификацией расчетных параметров на основе данных реального производства. В теоретических исследованиях использованы основополагающие принципы теории обработки металлов давлением и апробированные методики математической обработки данных эксперимента. В исследовании использовались современное, поверенное оборудование и лицензионное программное обеспечение. Достоверность проведенных исследований подтверждает успешное внедрение результатов работы в процесс производства электросварных труб с использованием вальцевой формовки.

#### **Апробация результатов**

Материалы по теме исследований были доложены на конференциях:

1. IX конгресс прокатчиков, 16-18 апреля 2013 г., Череповец, 2013.
2. 65-я научная конференция «Наука ЮУрГУ», 23–25 апреля 2013 г, Челябинск 2013.
3. Международная научно-практической конференция «Трубы 2014», 15–18 сентября 2014 г., Челябинск, 2014.
4. Международная научно-практической конференция «Трубы 2016», 20–22 сентября 2016 г., Челябинск, 2016.
5. 79 - международная научно-техническая конференция МГТУ им.Носова. «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования», 19-23 сентября 2021г., Магнитогорск, 2021.

**Личный вклад автора.** Выдвижение основных гипотез и их обоснование. Разработка математических моделей и алгоритмов расчета. Личное участие в планировании и реализации экспериментальных исследований, анализе и обработке данных. Написание научных публикаций по теме диссертации, инициирование выступлений с докладами на научно-практических конференциях.

**Публикации по теме диссертации.** Основное содержание диссертации опубликовано в 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 130 страницах машинописного текста, включающего 55 рисунков, 14 таблиц, список использованных источников из 103 наименований отечественных и зарубежных авторов, 2 приложения.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** обоснована актуальность и освещена степень разработанности тематики исследования, сформулированы цель работы и задачи исследования, перечислены полученные автором результаты, раскрыта их научная новизна и практическая значимость.

**В первой главе** изложены современное состояние и проблемы ТБД. Отмечены современные требования к эксплуатационным характеристикам ТБД. Проведен аналитический обзор современных технологий изготовления трубного штрипса и ТБД. Выполнен анализ и определены достоинства и недостатки различных технологий формовки трубной заготовки под сварку (UO, JO, TRB). Приведен алгоритм формирования характеристик качества продукции и роль технологии изготовления труб в обеспечении заданных характеристик. Рассмотрены теоретические основы процесса вальцевой формовки труб.

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, 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 гибки обеспечивает равномерность деформации трубной заготовки на участке основного периметра. Однако, неравномерность деформации образуется на переходе плоского участка в основной периметр. 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 данных методик в инженерной практике. Кроме этого, отсутствуют достоверные методики расчета энергосиловых параметров процесса формовки.

5. В литературных источниках недостаточно данных о коэффициенте трения для случая вальцевой формовки, когда одна поверхность чисто обработана, а вторая покрыта слоем вторичной окалины после горячей прокатки.

**Во второй главе** проведен анализ неравномерности деформации заготовки в поперечном сечении. В поперечном сечении заготовки (Рисунок 1) можно выделить четыре участка различной кривизны.

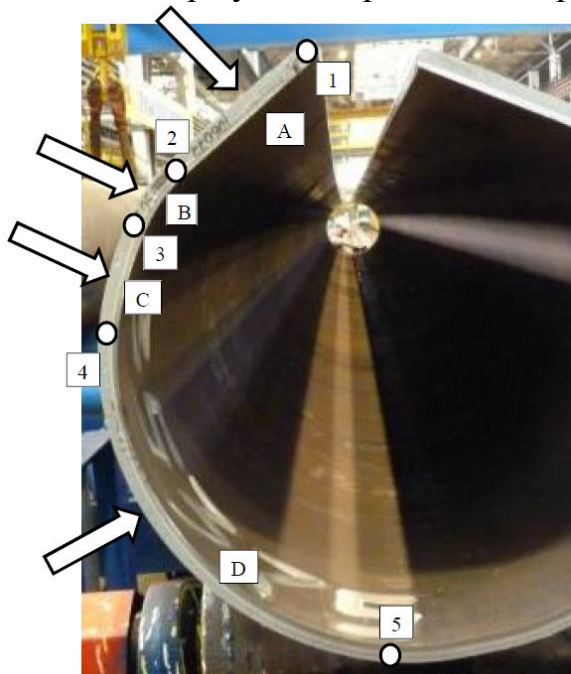


Рисунок 1 – Локальные участки различной кривизны по периметру заготовки после формовки

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 относительно 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.

Из анализа результатов конечно-элементного моделирования установлено, что причиной возникновения неоднородности деформаций является действующая технология формовки. Так же показано, что помимо дефектов формы готовых труб неравномерность деформации трубной заготовки, возникающая в процессе формовки, приводит к повышенным нагрузкам привода вращения валков по крутящему моменту.

На основе проведенного анализа выдвинута **гипотеза** о том, что: *если при определённой величине перемещения верхнего вала 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 трубной заготовки после формовки.*

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

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



Данная задача решалась методом регрессионного анализа в среде конечно-элементного моделирования. Коэффициенты регрессии определялись из результатов дробного факторного эксперимента проведенного в среде конечно-элементного моделирования «Marc.Mentat».

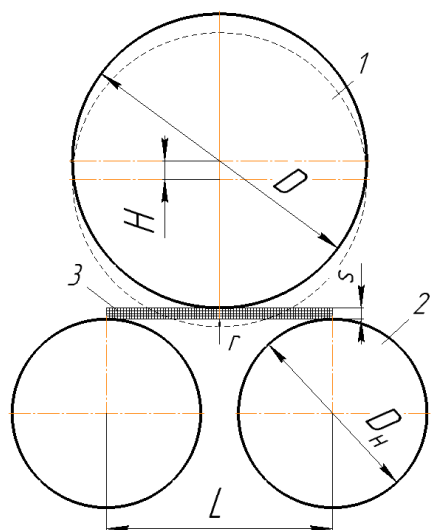


Рисунок 2 – Схема модели изгиба заготовки в вальцах:

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

Варьируемыми определяющими параметрами (факторами) являлись (рисунок 2):  $L$  – межцентровое расстояние нижних валков, мм;  $D$  – диаметр верхнего валка, мм;  $H$  – перемещение верхнего вала, мм. Параметром отклика принят наружный радиус  $r$  трубной заготовки толщиной  $s$  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: Модуль упругости  $E=2 \cdot 10^5$  МПа, предел текучести  $\sigma_T=550$  МПа, модуль упрочнения  $\Pi = 3 \cdot 10^3$  МПа.

Параметры опытов и значение зависимой переменной  $r$  представлены в таблице 1.

Таблица 1 –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

Подобранное уравнение регрессии примет вид:

$$r(L, H, D) = b_0 + b_1 \cdot L + b_2 \cdot D + \frac{b_3}{D} + \frac{b_4}{H}, \quad (1)$$

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

Коэффициенты регрессии определялись методом наименьших квадратов и приняли следующие значения:

$$\begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -300 \\ 4 \\ -3 \\ -7,5 \cdot 10^5 \\ 4,9 \cdot 10^4 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

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 1. Результаты сравнения представлены на рисунке 3.

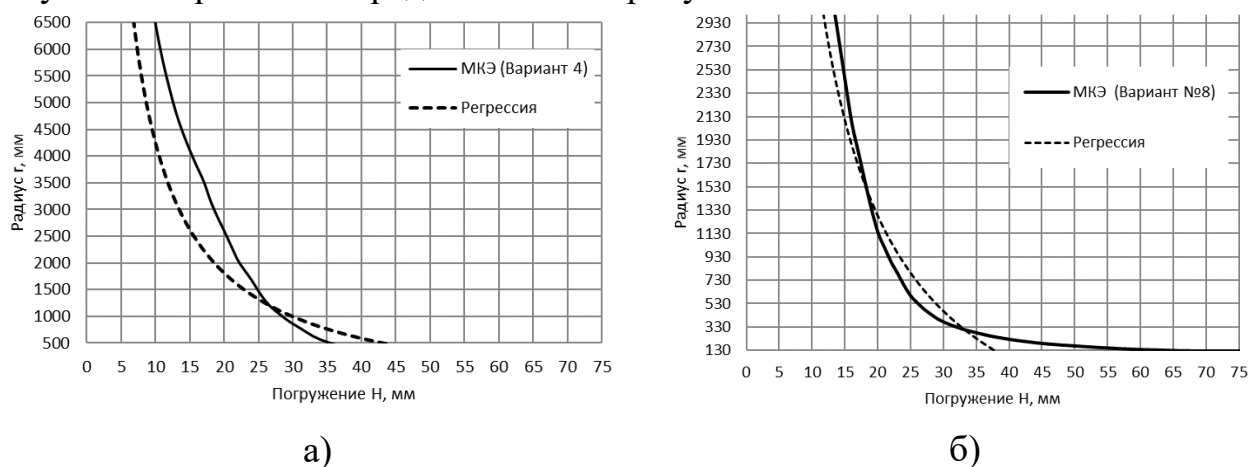


Рисунок 3 – Изменение радиуса кривизны при погружении верхнего валка:  
а) расчет №4, б) расчет №8

Для нахождения радиуса заготовки на стадии вращения валков принята следующая схема (Рисунок 4).

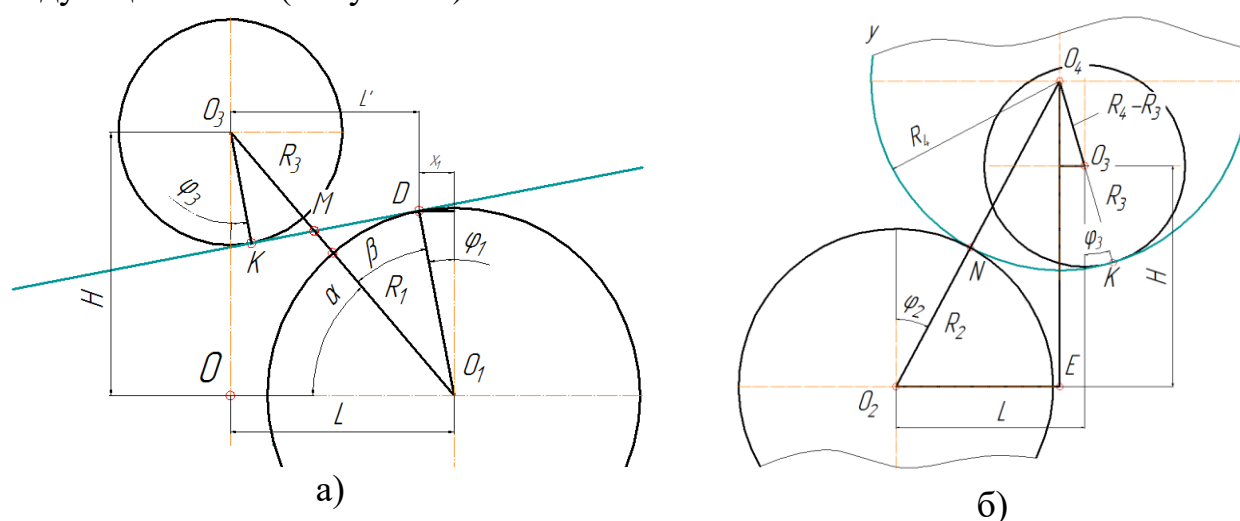


Рисунок 4 – Расчетная схема радиуса заготовки в первом проходе  
а) сторона входа в очаг деформации, б) сторона выхода из очага деформации

Радиус на выходе из очага деформации (см. рисунок 4.б) в первом проходе равен:

$$R_4 = \frac{H^2 + l^2 + R_3^2 - R_2^2 - 2R_3(H \cos \varphi_3 - l \sin \varphi_3)}{2(R_2 + R_3 - H \cos \varphi_3 + l \sin \varphi_3)}, \quad (3)$$

где  $\varphi_3 = \varphi_1 = \frac{\pi}{2} - \alpha - \beta$  (см. рисунок 4.а); (4)

$$\alpha = \arctg \frac{H}{L}; \quad (5)$$

$$\beta = \arccos \left( \frac{R_1}{O_1 M} \right) = \arccos \frac{(R_3 + R_1) \cdot \cos(\alpha)}{L}. \quad (6)$$

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

$$R_5 = \frac{R_4}{k_{\text{расп}}}, \quad (7)$$

где согласно формуле У.Джонсона

$$k_{\text{расп}} = 1 - 3 \left( \frac{\sigma \cdot R_4}{2E \cdot s} \right) (1 - \nu^2) + 4 \left( \left( \frac{\sigma \cdot R_4}{2E \cdot s} \right) (1 - \nu^2) \right)^3, \quad (8)$$

где  $E$  – модуль упругости стали, МПа;

$\nu$  – коэффициент Пуассона;

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

Для второго и последующих проходов принята следующая расчетная схема (Рисунок 5).

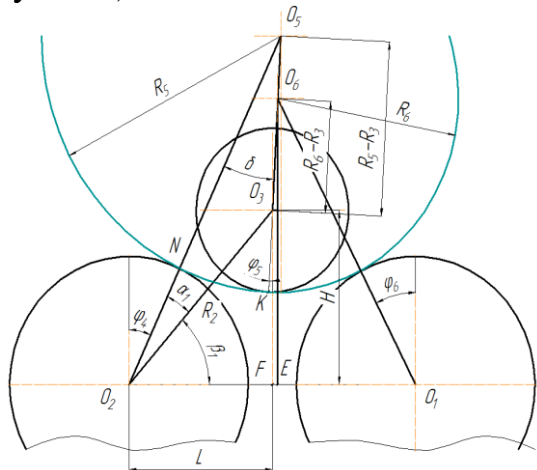


Рисунок 5 – Расчётная схема радиуса заготовки во втором и последующих проходах

Радиус на выходе из очага деформации во втором и последующих проходах равен:

$$R_6 = \frac{H^2 + l^2 + R_3^2 - R_2^2 - 2R_3(H \cos \varphi_5 - l \sin \varphi_5)}{2(R_2 + R_3 - H \cos \varphi_5 + l \sin \varphi_5)}. \quad (9)$$

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

$$R_7 = \frac{R_6}{k_{\text{расп}}}. \quad (10)$$

На основании полученных формул длина плоского участка трубной заготовки после формовки определяется по формуле:

$$L_{\text{пл}} = (R_3 + R_1 + s) \cdot \text{tg}(\beta). \quad (11)$$

Для определения энергосиловых параметров процесса формовки, использован энергетический метод, широко применяемый в процессах обработки металлов давлением и принята для этого расчетная схема, изображённая на рисунке 6.

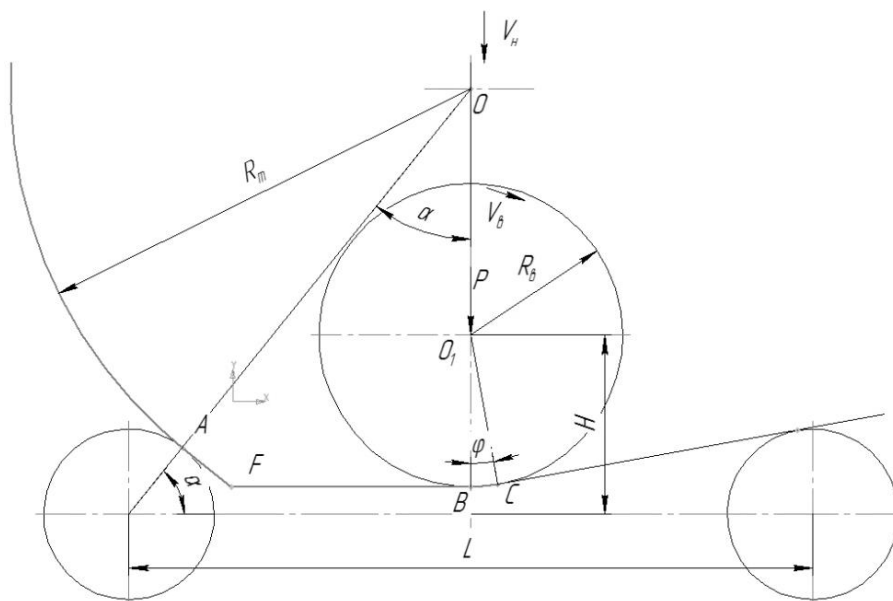


Рисунок 6 – Расчетная схема формовки для определения энергосиловых параметров

Уравнение баланса мощности для принятой расчетной схемы имеет вид

$$PV_H + \mu \frac{V_B}{R_B} \cdot R_B \cdot P \cdot \cos \frac{\psi}{2} = \frac{1}{2} \tau_s h \frac{V_B L}{(R_m + R_H)}. \quad (12)$$

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

Для определения угла  $\psi$  принята схема, показанная на рисунке 7, и записано условие равновесия сил на участке AC.

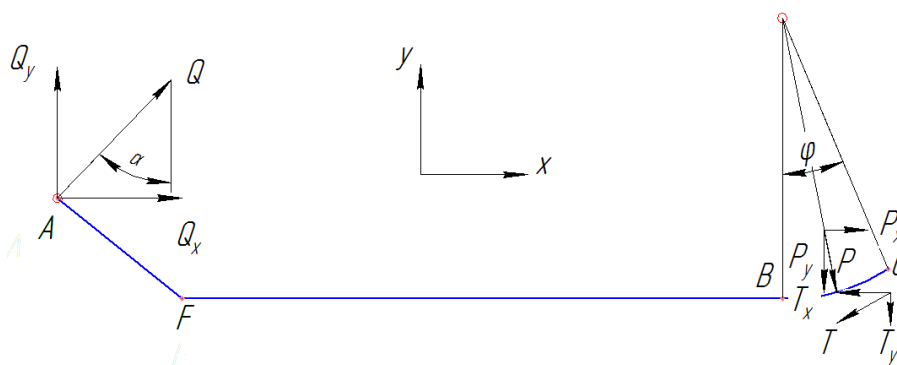


Рисунок 7 – Расчетная схема

С учетом (11) система уравнений примет вид:

$$\begin{cases} P = \frac{\tau_s h L}{(R_m + R_H) \left( \frac{V_H}{V_B} + \mu \cos \frac{\psi}{2} \right)}; \\ Q \sin \alpha + P \sin \frac{\psi}{2} - P \mu \cos \frac{\psi}{2} = 0; \\ Q \cos \alpha + P \cos \frac{\psi}{2} - P \mu \sin \frac{\psi}{2} = 0, \end{cases} \quad (13)$$

откуда

$$P = \frac{\tau_s h L}{2(R_m + R_H) \left[ \frac{V_H}{V_B} + \frac{\mu(\mu + ctg \alpha)}{\sqrt{(\mu + ctg \alpha)^2 + (\mu ctg \alpha - 1)^2}} \right]}, \quad (14)$$

где  $\tau_s$  – сопротивление металла пластической деформации сдвига;

$\mu$  – коэффициент трения;

$V_H, V_B$  – скорости перемещения и вращения верхнего вала соответственно.

В процессе формовки верхний валок изгибается от усилия действующего на него со стороны металла. В результате прогиба образуется неравномерность деформаций в трубной заготовке по длине.

Прогиб вала определяется методом начальных параметров. Принятая расчетная схема (Рисунок 8) безопорного нажимного вала ЛГМ, представляет собой двухопорную балку с консольным приложением нагрузки противоизгиба  $P_i$  на концах и распределенной нагрузкой  $q$  в середине.

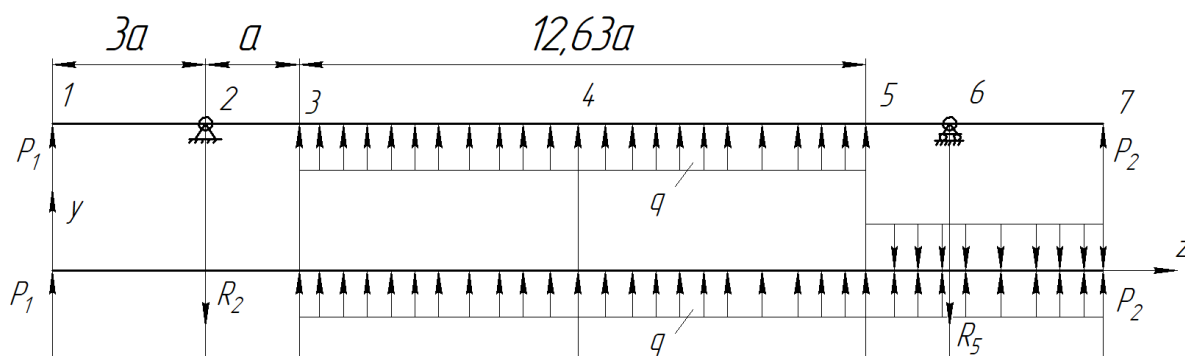


Рисунок 8 – Силовая схема безопорного вала

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

$$y = y_0 + \varphi_0 z + \frac{1}{EI} \left[ P \frac{(z-0)^3}{6} - R_2 \frac{(z-3a)^3}{6} - R_5 \frac{(z-17,63a)^3}{6} \right] + \frac{1}{EI} \left[ q \frac{(z-4a)^4}{24} - q_d \frac{(z-16,63a)^4}{24} \right] \quad (15)$$

Перемещения  $y_i$  в сечениях 1-7 вала будут равны:  $y_1 = y_0 + z_1 \cdot \varphi_0$ ;

$$y_2 = y_0 + z_2 \cdot \varphi_0 - \frac{M_2^{P_1}}{EI}; \quad y_3 = y_0 + z_3 \cdot \varphi_0 - \frac{(M_3^{P_1} - M_3^{R_2})}{EI};$$

$$y_4 = y_0 + z_4 \cdot \varphi_0 - \frac{(M_4^{P1} - M_4^{R2})}{EI} + \frac{M_4^q}{EI}; \quad y_5 = y_0 + z_5 \cdot \varphi_0 - \frac{(M_5^{P1} - M_5^{R2})}{EI} + \frac{M_5^q}{EI};$$

$$y_6 = y_0 + z_6 \cdot \varphi_0 - \frac{(M_6^{P1} - M_6^{R2})}{EI} + \frac{(M_6^q - M_6^{qA})}{EI}; \quad y_7 = y_0 + z_7 \cdot \varphi_0 - \frac{(M_7^{P1} - M_7^{R2} - M_7^{R2})}{EI} + \frac{(M_7^q - M_7^{qA})}{EI}.$$

Таким образом, получены аналитические зависимости для определения прогибов безопорного нажимного вала в любом по длине сечении.

На основе разработанной математической модели процесса вальцевой формовки разработана программа «ТЭСЦ.Технолог» (Рисунок 9), предназначенная для расчета технологических и энергосиловых параметров процесса формовки листовой заготовки в трехвалковой листогибочной машине.

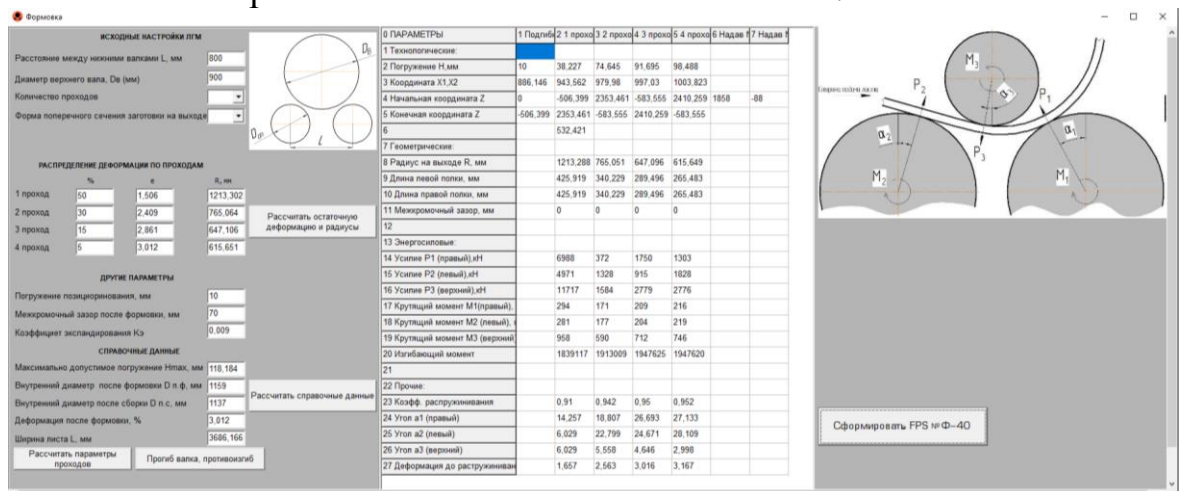


Рисунок 9 – Интерфейс программы для ЭВМ

**В третьей главе** представлены результаты экспериментального исследования процесса вальцевой формовки.

Методом торможения полосы в вальцах определён коэффициент трения в условиях идентичных условиям формовки. В качестве экспериментальной машины был выбран лабораторный двухклетевой прокатный стан «дуо 180». Для создания тормозных сил было изготовлено специальное тормозное устройство.

На рисунке 10 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. С вероятностью 95% коэффициент трения в условиях вальцевой формовки можно считать равным  $\mu = 0,245 \pm 0,035$ .

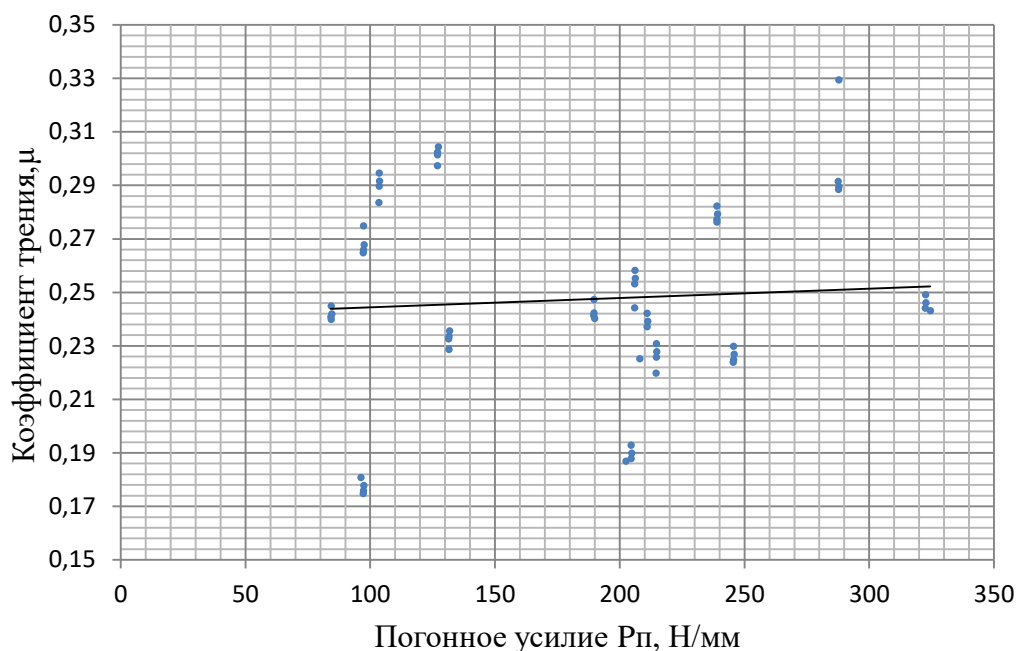


Рисунок 10 – График зависимости коэффициента трения от погонного усилия

Процесс формовки трубной заготовки в вальцах сопровождается неравномерностью деформации в продольном направлении по причине прогиба безопорного вала. Нарушение равномерности деформации при выполнении формообразующих операций неизбежно приводит к появлению остаточных напряжений, что экспериментально подтверждается изменением диаметра кольца после отрезки от тела трубной заготовки (Рисунок 11).

Для экспериментального исследования остаточных напряжений в трубной заготовке после формовки применялся разрушающий 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.

Согласно программе эксперимента, в соответствии с рисунком 12, от трубной заготовки отрезалось кольцо шириной  $B=330$  мм, затем, из области основного периметра (на три часа) и из области перегибов вырезались темплеты, которые в дальнейшем распускались на полосы шириной  $b=30$  мм. В качестве средства послойного удаления металла в эксперименте применялось электрохимическое травление, для которого спроектирована и изготовлена специальная установка.

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

$$\sigma_{ост} = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \sigma_4, \quad (15)$$

где  $\sigma_1$  – напряжения снимаемые после отрезки кольца;  $\sigma_2$  – напряжения снимаемые после вырезки темплетта из кольца;  $\sigma_3$  – напряжения снимаемые при порезке темплетов на образцы;  $\sigma_4$  – напряжения снимаемые при травлении образцов.



Рисунок 11 – Изменение диаметра кольца в результате отрезки от трубной заготовки

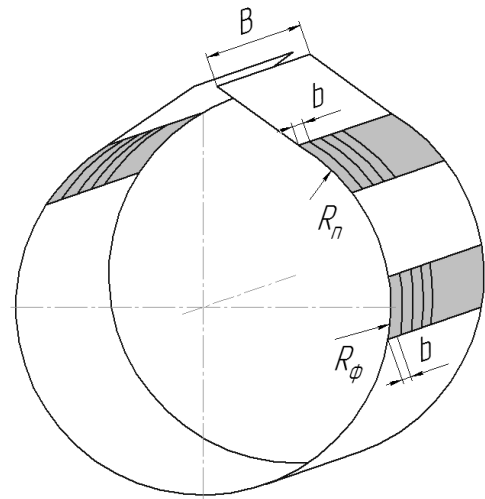


Рисунок 12 – Схема вырезки образцов от кольца после формовки

Как показали результаты эксперимента, кривизна темплетов при вырезке из кольца и при порезке темплетов на образцы 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:

$$\sigma_{ост} = \sigma_1 + \sigma_4. \quad (16)$$

Результаты проведенного эксперимента показывают, что большая часть остаточных напряжений снимается на этапе отрезки кольца ( $\sigma_1^{max} = 124,36$  МПа), под напряженно-деформированное состояние трубной заготовки после формовки.

На рисунке 13 показана трансформация эпюры остаточных напряжений, вызванная неравномерностью деформации по длине трубной заготовки из-за прогиба нажимного вальца.

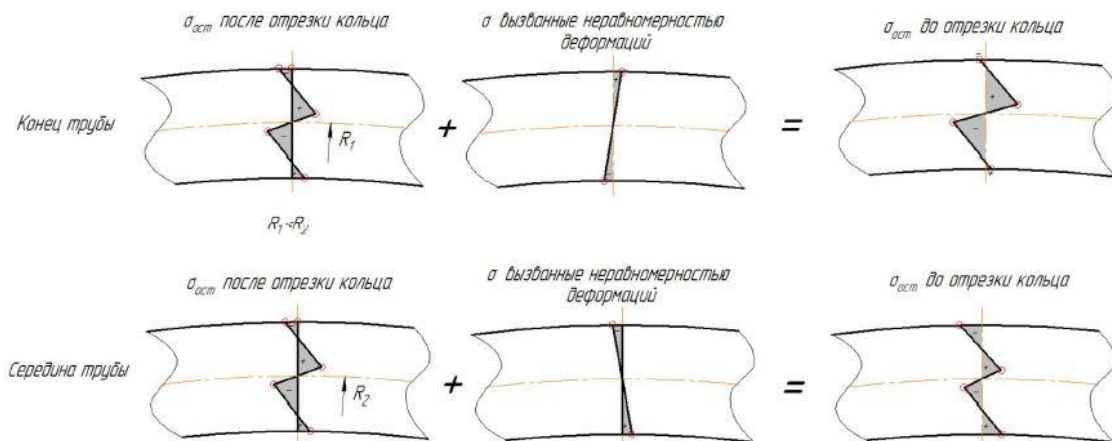


Рисунок 13 – Напряженно-деформированное состояние трубной заготовки после формовки в вальцах



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.

Проведено экспериментальное исследование прогиба нажимного вала в процессе формовки в вальцах средствами фотограмметрии. Контроль прогиба нажимного вала осуществлялся при помощи измерительного комплекса (Рисунок 14), состоящего из лазерного дальномера Leica Disto D510 (2) и фотоаппарата Nikon D 5100 (1). Приборы были закреплены на общей платформе (4), расположенной на штативе (3).

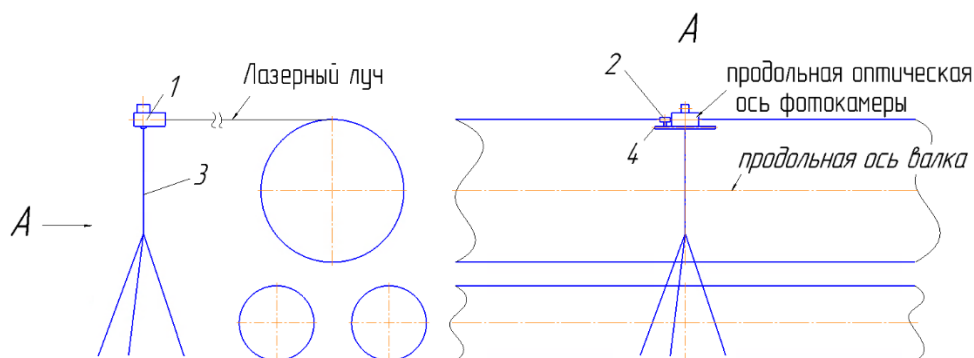


Рисунок 14 – Расположение средств измерения относительно исследуемого объекта

Фотосъёмка вала производилась в первом и втором проходах на стадиях в соответствии с рисунком 15.

Результаты измерений представленные на рисунке 16 показывают, что прогиб вала в процессе формовки нестабилен и изменяется, как в пределах одного прохода, так и от прохода к проходу. Нестабильность прогиба вызывает неоднородность напряженно-деформированное состояния тела заготовки, поэтому для листогибочных машин с системой противоизгиба, требуется система автоматического регулирования прогибом верхнего вала.

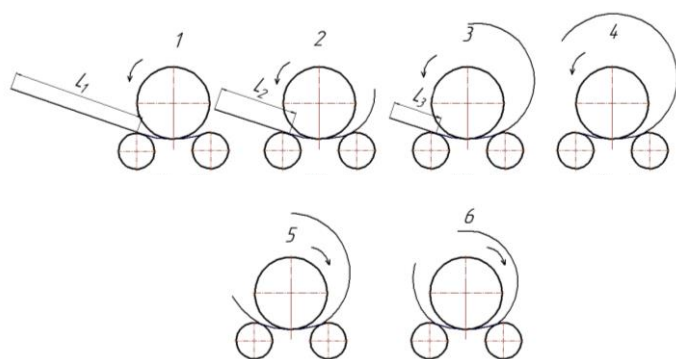


Рисунок 15 – Последовательность выполнения снимков при формовке

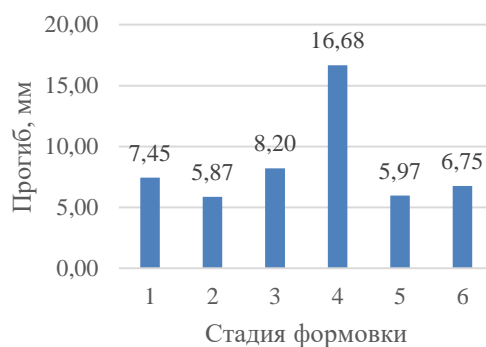


Рисунок 16 – Средние значения прогиба вала

В четвертой главе разработана концепция автоматического регулирования прогибом верхнего вала; проведена апробация усовершенствованной технологии формовки на конечно-элементной модели; разработаны режимы формовки труб для стандартной и усовершенствованной технологии и представлены результаты промышленного апробирования разработанных режимов.

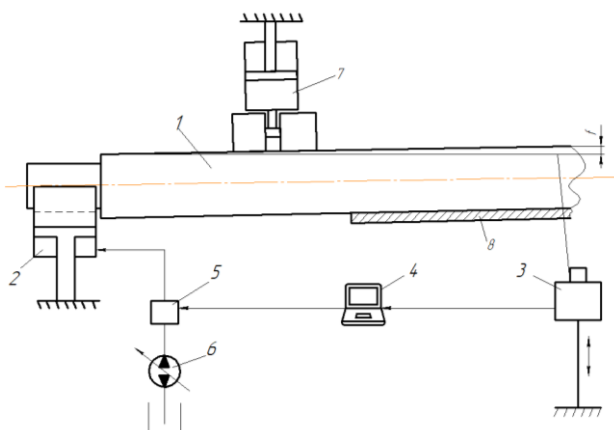


Рисунок 17 – Структурная схема САР прогибом нажимного вала

Задача обеспечения минимального и неизменного прогиба безопорного нажимного вала трехвалковых листогибочных машин может быть решена реализацией системы автоматического регулирования (САР) прогибом вала.

Объектом управления в данном случае является верхний валок (1) ЛГМ (Рисунок 17). Целью управления является поддержание минимального прогиба вала с заданной точностью. Управляющим устройством являются цилиндры противоизгиба (2), а измеряющим устройством – установка технического зрения (3).

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).

Целью конечно-элементного моделирования являлось апробирование с помощью разработанной технологии формовки «погружение+вращение».

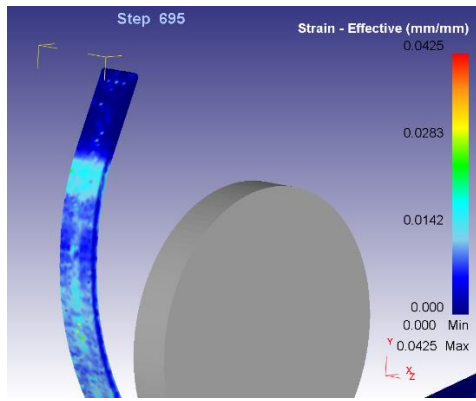
Моделирование формовки для двух принятых вариантов технологии проводилось в программном пакете для конечно-элементного моделирования Deform 3D, который часто используется для моделирования процессов гибки.

Выбранные для моделирования профиларазмеры труб представлены в таблице 2.

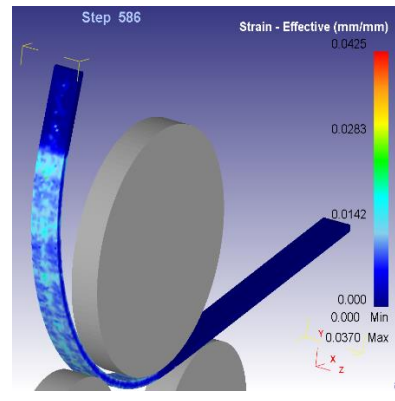
Таблица 2- Моделируемые профиларазмеры труб

№ п/п	Диаметр, мм	Толщина стенки, мм	Класс прочности
1	1420	25,8	K60
2	720	9,0	K60
3	711	25,4	K55

На рисунках 18-20 представлены распределения пластических деформаций на переходных участках для действующей и разработанной технологии формовки.

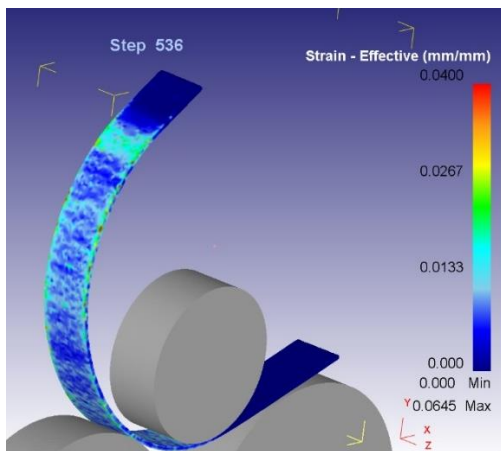


а)

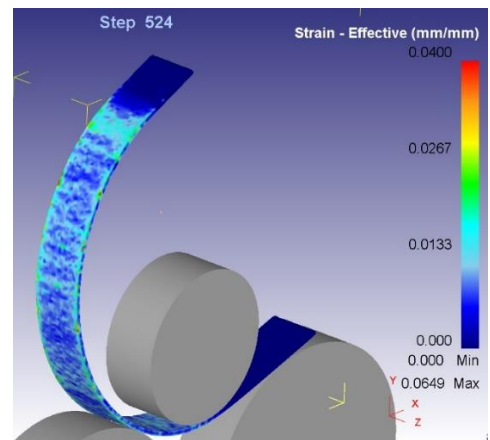


б)

Рисунок 18 – Остаточные деформации после формовки трубы размерами  $\varnothing 1420 \times 25,8$  мм: а – по действующей технологии; б – по разработанной

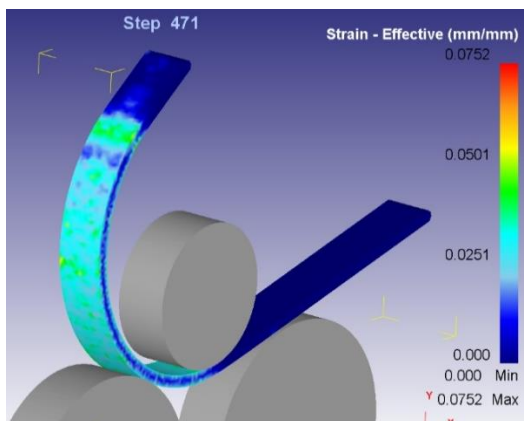


а)

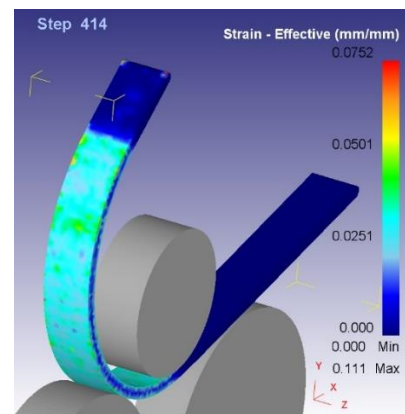


б)

Рисунок 19 – Остаточные деформации после формовки трубы размерами  $\varnothing 720 \times 9$  мм: а – по действующей технологии; б – по разработанной



а)



б)

Рисунок 20 – Остаточные деформации после формовки трубы размерами  $\varnothing 711 \times 25,4$  мм: а – по действующей технологии; б – по разработанной

Неоднородность остаточных деформаций в области перехода от плоского участка к основному периметру при разработанной технологии снизилась во всех трех случаях (рисунки 18.б, 19.б, 20.б). В наибольшей степени положительный эффект проявился на трубе размерами  $\varnothing 711 \times 25,4$  мм, где величина остаточных деформаций на переходном участке минимально отличается от участка основного периметра (рисунок 20.а,б). 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.

При производстве опытной партии труб размерами  $\varnothing 711 \times 25,4$  мм из стали К56 для проекта «Северный Каспий» апробировалась технология формовки «погружение + вращение». При производстве труб  $\varnothing 1420 \times 25,8$  производилось сопоставление результатов расчета радиуса заготовки по разработанной методике с промышленными данными.

Режимы формовки труб соответствовали указанным в таблице 3.

Таблица 3 – Технологические настройки ЛГМ

Размеры труб, мм	$H_0$ , мм	$H_1$ , мм	$H_2$ , мм	$H_3$ , мм	$H_3$ , мм	$V_{\text{п}}$ , м/мин	$V_{\text{в}}$ , м/мин
$\varnothing 711 \times 25,4$	71,6	78,4	-	-	-	0,03	5,4
$\varnothing 1420 \times 25,8$	-	34,7	66,9	82,4	88,7	-	10,3

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

Формовка заготовок для труб  $\varnothing 711 \times 25,4$  мм 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, замеры радиусов переходного участка и основного периметра выполнялись с помощью индикаторного радиусомера.

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 находился в пределах от 62 до 68 мм, по заднему торцу пределах 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 показаны сравнительные результаты расчетов отклонения величины радиуса заготовки от фактического.

Таблица 4 – Сравнительные результаты расчета радиусов формовки труб размерами  $\varnothing 1420 \times 25,8$  мм в первом и третьем проходе

№ трубы	I проход		III проход	
	Радиус по наружной поверхности, мм	Ошибка, %	Радиус после третьего прохода, 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 находился в пределах от 60 до 65 мм по заднему торцу в пределах 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 определить радиус заготовки на выходе из очага деформации.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

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».

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  $\emptyset 711 \times 25,4$  мм. Методика расчета радиуса формовки на выходе из очага деформации апробирована при производстве опытной партии труб размерами  $\emptyset 1420 \times 25,8$  мм.

## **Публикации автора по теме диссертации в научных изданиях, входящих в список ВАК РФ:**

Публикации автора по теме диссертации в научных изданиях, входящих в список ВАК РФ:

1. Ильичев, В.Г. Технологические возможности улучшения качества геометрических характеристик труб большого диаметра вальцевой формовки при догибке кромок / В.Г. Ильичев, Я.Е. Залавин. // Черные металлы.–2013.– №12.– С.13–19.

2. Ильичев, В.Г. Экспериментальное определение сил трения в очаге деформации при вальцевой формовке труб большого диаметра / В.Г.Ильичев, Я.Е.Залавин. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. Metallургия. – Челябинск: Издательство ЮУрГУ. – 2015, Т.15, №3, С. 127–133.

3. Ильичев, В.Г. Экспериментальное исследование фрикционных сил на границе инструмента и заготовки в условиях экспандирования труб большого диаметра / В. Г. Ильичев, Я. Е. Залавин В. Г. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. Metallургия. - 2017. - Т. 17, № 1. - С. 81-88.

4. Залавин Я.Е. Применение методов фотограмметрии для исследования и настройки системы противоизгиба верхнего вала трехвалковых листогибочных машин / Залавин Я.Е, В.Г.Ильичев, П.П. Титаренко // Известия вузов. Черная металлургия. – 2019, Т.75, №12, С. 1378-1384.

5. Залавин, Я. Е. Расчет параметров вальцевой формовки с целью минимизации неравномерности деформации заготовки в поперечном сечении / Я. Е. Залавин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallургия. – 2020. – Т. 20. – № 4. – С. 23-29. – DOI 10.14529/met200403.

6. Выдрин, А. В. Деформационные и кинематические параметры вальцевой формовки / А. В. Выдрин, Я. Е. Залавин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallургия. – 2021. – Т. 21. – № 2. – С. 51-57. – DOI 10.14529/met210205.

## **Публикации в других изданиях:**

1. Ильичев В.Г. Модернизация оборудования линии прямошовных труб в условия ОАО «ВТЗ»// В.Г. Ильичев, Я.Е. Залавин. А.А. Ляковский. // Труды IX конгресса прокатчиков. – Череповец. – 2013. – С. 85 – 89.

2. Ильичев, В. Г. Технологические резервы повышения качества геометрии периметра труб большого диаметра / В. Г. Ильичев, Я. Е. Залавин // Наука ЮУрГУ : материалы 65-ой Научной конференции, Челябинск, 23–25 апреля 2013 года. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. – С. 3-7.

3. Ильичев, В. Г. Освоение процесса формовки в вальцах труб с повышенной точностью геометрических размеров / В. Г. Ильичев, Я. Е. Залавин // Трубы-2014 : Труды международной научно-практической конференции, Челябинск, 15–18 сентября 2014 года / ОАО "РосНИТИ", НО "ФРТП". – Челябинск: Открытое акционерное общество "Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности", 2014. – С. 288-291.

4. Залавин, Я. Е. Методика расчета параметров формоизменения листовой заготовки в трехвалковой листогибочной машине / Я. Е. Залавин, В. Г. Ильичев // Инновации и импортозамещение в трубной промышленности (Трубы-2016) : Труды XXII Международной научно-практической конференции, Челябинск, 20–22 сентября 2016 года / Под редакцией И.Ю. Пышминцева. – Челябинск: Открытое акционерное общество "Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности", 2016. – С. 190-192.

5. Залавин Я.Е. Методика расчета параметров формоизменения трубной заготовки в процессе сборки / Я.Е. Залавин, В.Г. Ильичев. // Трубная промышленность сегодня и завтра (Трубы-2018): труды XXIII Международной научно-практической конференции, Челябинск, 17–19 сентября 2018 года / Под редакцией И.Ю. Пышминцева. – Челябинск: Открытое акционерное общество "Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности", 2018. Ч.2. – С.42–44.

6. Залавин Я.Е. Технологические резервы снижения неравномерности деформации в поперечном сечении труб большого диаметра при формовке в вальцах./ Залавин Я.Е., Выдрин А.В., // 79-я - международная научно-техническая конференция МГТУ им Г.И. Носова., Магнитогорск, 19-23 апреля 2021 года. – Магнитогорск, 2021. – С.19–20.

#### **Патенты и свидетельства:**

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017611243. Программа для расчета технологических и энергосиловых параметров трехвалковых листогибочных машин / Я.Е. Залавин, В.Г. Ильичев. – заявка № 2016663150 от 01.12.2016; опубл. 01.02.2016.

2. Патент №2772340, Российская федерация, МПК В21D 5/10 (2006.01). Способ формовки трубной заготовки / Н.В. Трутнев, А.В. Выдрин и др.– №2021118696; заявл. 18.05.2022г.