

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

На правах рукописи

НГУЕН ВАН ТХАНЬ

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДИК РАСЧЕТА ПРОЦЕССА  
ЗНАКОПЕРЕМЕННОЙ ФОРМОВКИ И ПРОФИЛИРОВАНИЯ ВАЛКОВОГО  
ИНСТРУМЕНТА НЕПРЕРЫВНЫХ ТЭСА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА  
ТРУБ МАЛОГО И СРЕДНЕГО ДИАМЕТРА**

Специальность 2.6.4 – Обработка металлов давлением

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель  
к.т.н., Фадеев Виктор Александрович

Москва – 2025

## Оглавление

<b>Введение .....</b>	<b>4</b>
<b>Глава 1 Обзор литературы .....</b>	<b>8</b>
1.1 Схема общей технологической линии производства электросварных труб .....	8
1.2 Схемы знакопеременной формовки в линиях непрерывных ТЭСА .....	11
1.3 Компоновки оборудования и валкового инструмента для знакопеременной формовки в непрерывных линиях ТЭСА .....	15
1.4 Выводы.....	21
<b>Глава 2 Анализ непрерывного формоизменения со знакопеременной формовкой условиях ТЭСА 10–60 НИТУ МИСИС.....</b>	<b>22</b>
2.1 Расчет параметров непрерывного формоизменения со знакопеременной формовкой и анализ продольных деформаций по клетям формовочного стана.....	22
2.2 Формоизменение при знакопеременной формовке для прямолинейной, ниспадающей и криволинейной траекторий осевого волокна .....	27
2.3 Унификация схем формоизменения и валкового инструмента.....	32
2.4 Выводы.....	38
<b>Глава 3 Экспериментальное исследование знакопеременной формовки на.....</b>	<b>39</b>
<b>ТЭСА 10–60 НИТУ МИСИС .....</b>	<b>39</b>
3.1 Описание оборудования формовочного стана .....	40
3.2 Порядок проведения экспериментальной знакопеременной формовки на участке открытых клетях формовочного стана .....	41
3.3 Обработка экспериментальных данных.....	47
3.4 Выводы.....	60
<b>Глава 4 Разработка методик расчёта геометрических параметров формоизменения и валкового инструмента для знакопеременной формовки .....</b>	<b>61</b>
4.1 Расчет геометрических параметров формоизменения трубной заготовки для знакопеременной формовки .....	61
4.2 Разработка методики расчёта геометрических параметров валкового инструмента для знакопеременной формовки .....	79
4.3 Определение энергосиловых параметров процесса формовки .....	84
4.4 Выводы.....	91
<b>Глава 5 Экспериментальная знакопеременная формовка трубы Ø50×1,5 мм на экспериментальном ТЭСА 10–60 НИТУ МИСИС.....</b>	<b>92</b>

5.1	Разработка чертежей и изготовление валкового инструмента .....	92
5.2	Перевалка валков и настройка клетей.....	93
5.3	Экспериментальная формовка .....	96
5.4	Обработка экспериментальных результатов .....	99
5.5	Выводы.....	108
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>		<b>109</b>
<b>Список литературы.....</b>		<b>111</b>
<b>Приложение А .....</b>		<b>120</b>
<b>Приложение В.....</b>		<b>124</b>

## **Введение**

### **Актуальность проблемы**

Современные исследования в области знакопеременной формовки сварных труб в непрерывных линиях ТЭСА охватывают множество направлений, большая часть научных работ в этой области принадлежит зарубежным авторам. Эти работы включают анализ механических свойств материалов, моделирование процесса формовки с использованием метода конечных элементов, а также проектирование и унификацию валкового инструмента (например, компоновки валков для формовки) вместе с тем опубликованные работы носят преимущественно частный и специализированный характер, а их результаты, затруднительно применить в отечественной производственной практике и систематизировать в единую методологическую структуру.

В отечественной технической литературе, доступной в открытых источниках тема знакопеременной формовки ограничивается общими описаниями. Основной акцент сделан на рассмотрении принципиальных схем формоизменения. При этом не хватает научно-обоснованных методик расчёта технологических параметров (формоизменение заготовки, профилирование инструмента, напряжённо-деформированное состояние, энергосиловые параметры), а также системного подхода в оценке технологических параметров знакопеременной формовки.

Таким образом, ограниченное использование зарубежных разработок и недостаточная проработанность методик расчёта в отечественной науке сужают применение научных результатов и рекомендаций в производственной практике, а также затрудняют их интеграцию в программы повышения квалификации специалистов трубосварочного производства и учебные курсы для студентов технических вузов.

Для восполнения обозначенных пробелов целесообразно экспериментальные исследования знакопеременной формовки на опытном ТЭСА 10-60 НИТУ МИСИС и на основе полученных данных разработать методику расчёта технологических параметров (формоизменение заготовки, профилирование инструмента, напряжённо-деформированное состояние, энергосиловые параметры) знакопеременной формовки в непрерывных ТЭСА, и объединить в единое расчётно-аналитическое сопровождение процесса.

### **Цель работы**

Исследование и разработка методик расчета формоизменения трубной заготовки и профилирования валкового инструмента для знакопеременной формовки прямошовных стальных труб малого и среднего диаметра.

### **Задачи работы**

Для решения выше указанной цели диссертации необходимо выполнить следующие задачи:

1. Выполнить анализ геометрических и деформационных параметров формоизменения трубной заготовки (ТЗ) при знакопеременной формовке для прямолинейной и ниспадающей траекторий осевого волокна в очаге сворачивания в условиях опытного ТЭСА 10–60 НИТУ МИСИС.
2. Провести экспериментальные исследования знакопеременной формовки ТЗ (сталь Ст3) на участке открытых клетях ТЭСА и установить зависимость между амплитудой знакопеременной формовки и остаточной кривизной профиля ТЗ после упругого восстановления;
3. На основе анализа экспериментальных данных разработать методики расчета геометрических параметров формоизменения ТЗ и валкового инструмента для знакопеременной формовки, которая обеспечивает снижение величины упругого восстановления ТЗ;
4. Определить энергосиловые параметры знакопеременной формовки ТЗ и провести анализ распределения тянущих усилий и усилий сопротивления по клетям формовочного стана;
5. Провести экспериментальную знакопеременную формовку трубы  $\text{Ø}50 \times 1,5$  мм на опытном ТЭСА 10–60 НИТУ МИСИС.

### **Научная новизна работы**

1. Экспериментально установлено влияние амплитуды знакопеременной формовки на остаточную кривизну ТЗ после упругого восстановления. С увеличением амплитуды упругое восстановление ТЗ снижается, что способствует повышению точности формирования профиля ТЗ в клетях формовочного стана ТЭСА;
2. Установлены зависимости распределения радиусов кривизны и углов формовки в центральных и периферийных участках ТЗ, для знакопеременной формовки, обеспечивающие устойчивое формоизменение ТЗ в клетях формовочного стана;
3. Разработана методика расчета геометрических параметров формоизменения ТЗ при знакопеременной формовке в клетях формовочного стана для труб малого и среднего диаметров;
4. Разработана методика расчета геометрических параметров валкового инструмента для непрерывной знакопеременной формовки, которая обеспечивает снижение величины упругого восстановления ТЗ и устойчивое формоизменение.

### **Практическая значимость работы**

1. Разработана программа для ЭВМ, позволяющая рассчитать геометрические параметры формоизменения ТЗ при знакопеременной формовке в непрерывных ТЭСА при производстве электросварных прямошовных труб из углеродистых сталей;
2. Разработанные зависимости распределения радиусов сворачивания по очагу деформации позволяют рассчитать этапы формоизменения ТЗ по клетям формовочного стана;
3. Разработаны чертежи и изготовлен комплект валкового инструмента для трубы  $\varnothing 50 \times 1,5$  мм ТЭСА 10–60, позволяющий осуществлять непрерывную знакопеременную формовку.
4. Результаты работы используются в учебном процессе на кафедре обработки металлов давлением при подготовке бакалавров и магистров в области трубоэлектросварочного производства по направлениям «Металлургия» и «Технологические машины и оборудование».

#### **Положения выносимые на защиту**

1. Методика расчета геометрических параметров формоизменения ТЗ при знакопеременной формовке в клетях формовочного стана ТЭСА;
2. Методика расчета размеров профиля и габаритов валкового инструмента для труб малого и среднего диаметров;
3. Графические зависимости распределения радиусов сворачивания участков полосы при знакопеременной формовке, позволяющие рассчитать режимы формоизменения ТЗ по длине очага сворачивания.

#### **Методы исследования и достоверность результатов**

1. Исследования геометрических и деформационных параметров знакопеременной формовки осуществлялись на опытном ТЭСА 10–60 НИТУ МИСИС.
2. При создании конструкторской документации и проектировании валкового инструмента ТЭСА применялась программа Solidworks.
3. Методики, разработанные для определения геометрических параметров ТЗ и валкового инструмента при знакопеременной формовке, подтверждены экспериментальным путем на ТЭСА 10–60 НИТУ МИСИС.
4. Полученные экспериментальные и теоретические данные не противоречат основным положениям теории и технологии непрерывной формовке электросварных труб.

### **Личный вклад автора**

Диссертационная работа представляет собой завершённое научное исследование, в котором систематизированы и обобщены результаты. Автор провёл экспериментальные работы, осуществил обработку данных и анализ результатов. Обсуждение и интерпретация полученных данных осуществлялись совместно с научным руководителем.

### **Соответствие диссертации паспорту специальности**

Диссертация по своей тематике целям, задачам, научной новизне теоретической и практической значимости, соответствует паспорту специальности 2.6.4 – Обработка металлов давлением по п.1,2,5.

### **Публикации**

Результаты диссертационной работы представлены в 5 публикациях ВАК РФ, среди которых 3 статьи размещены в журналах Scopus и Web of Science. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ и выпущено методическое пособие.

### **Структура и объём диссертации**

Диссертационная работа изложена на 124 страницах и включает введение, пять глав с выводами по каждой из них. Текст содержит 26 таблиц, 91 рисунок, библиографический список из 96 источников и 2 приложения.

### **Благодарность**

Автор благодарит коллектив сотрудников кафедры ОМД за содействие в реализации исследовательских задач и выражает признательность заведующему кафедрой обработки металлов давлением Алещенко Александру Сергеевичу за содействие в организации работы и помощь в изготовлении комплекта валкового инструмента.

Особую благодарность автор выражает профессору Самусеву Сергею Владимировичу за всестороннее научное консультирование в области теории и технологии непрерывной формовки электросварных труб.

Автор благодарит научного руководителя доцента кафедры обработки металлов давлением Фадеева Виктора Александровича за постоянную помощь на всех этапах выполнения диссертации.

## Глава 1 Обзор литературы

### 1.1 Схема общей технологической линии производства электросварных труб

Современное развитие промышленности и технологий обуславливает широкое применение трубной продукции в ключевых отраслях: машиностроении, строительстве, энергетике [1–17] и др. Особенно развивается производство сварных труб, что связано с их преимуществами, включая снижение материалоемкости и возможность выпуска широкого сортамента типоразмеров труб. Технология изготовления электросварных труб, основанная на многолетнем опыте специалистов, продолжает совершенствоваться [2–15]. Это позволяет повышать качество продукции за счет оптимизации ключевых этапов: формирования полосы, сварки, редуцирования, [2,4,18–21]. На рисунке 1.1 представлена общая схема технологии производства сварных труб [2,3,17,21–23].

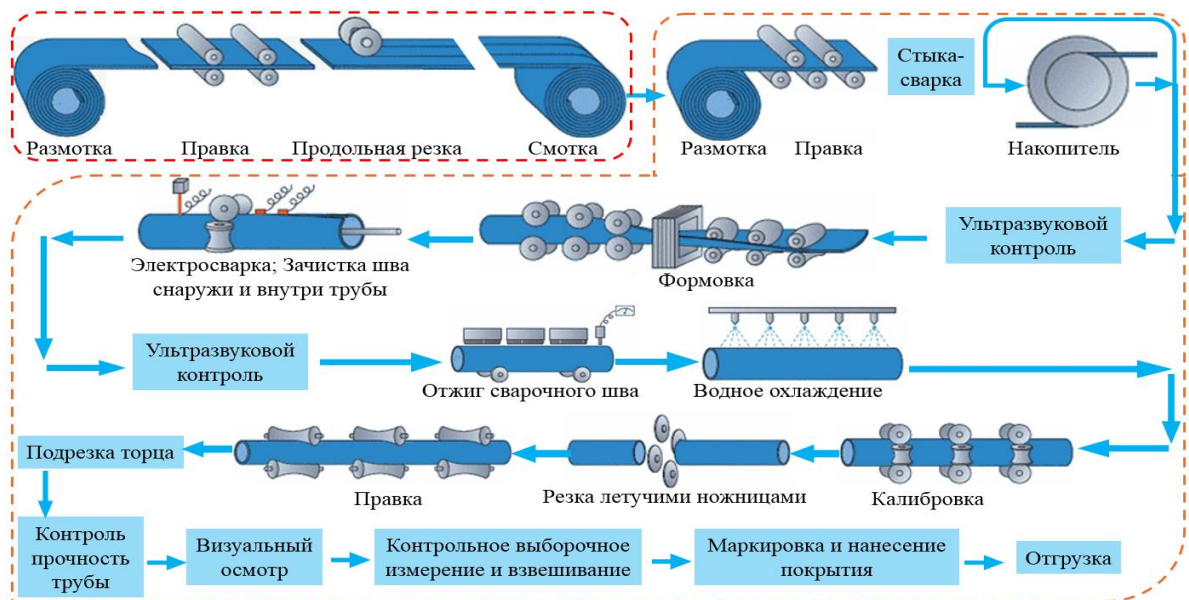


Рисунок 1.1 – Общая схема производства сварных труб

Производство сварных труб включает операции размотки рулонов, правки, продольной резки и смотки штрипса, а также следующее оборудование: кантователь рулонов, кран-балку, подающий транспортер рулонов, ножницы для резки упаковочной ленты, устройство для отгиба конца рулона, тянущие ролики, валковую правильную машину, ножницы с нижним приводным ножом, стыкосварочную машину с подвижной станиной и гратоснимателем, формовочный стан, сварочный стан, калибровочный стан, летучая пила [18,21–23].

Агрегаты для порезки рулонов в штрипсы и формовки сварных труб представлены на рисунке 1.2.





а



б

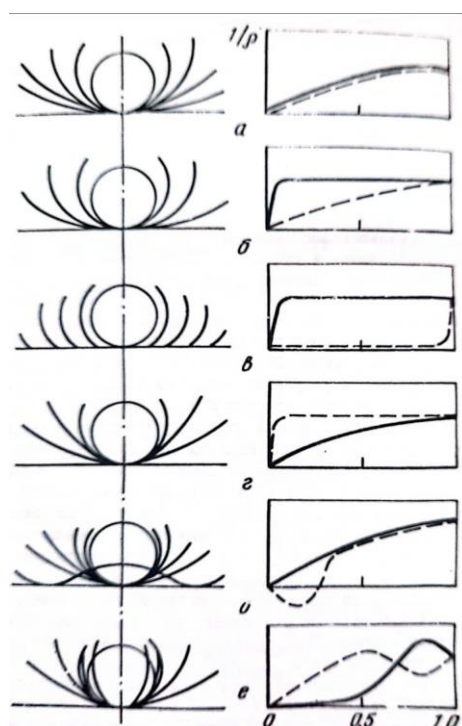
а – агрегат для порезки штрипса; б – агрегат для формовки труб

Рисунок 1.2 – Агрегаты для порезки рулонов и формовки сварных труб

**Процесс подготовки:** в процессе производства сварных труб [17] штрипсы (стальные полосы) являются исходными заготовками. Полосовая заготовка проходит обязательную обработку на правильных станах для предварительной правки полосы, снятия остаточных напряжений и выравнивания плоскостности полосы. Создание качественной полосы является одним из важных критерием для формирования бездефектных сварных труб. Основное оборудование, задействованное в процессе, включает кантователь, кран-балку, подающий транспортер рулонов, ножницы для резки упаковочной ленты рулона, отгибатель конца рулона, тянущие ролики, вальцовую правильную машину, ножницы с нижним приводным ножом, стыкосварочную машину с подвижной станиной и гратоснимателем, накопитель полосы (ямочного, тоннельного или спирального типа), щеточные механизмы, дробеструйную установку и др [17,18,21–23].

**Процесс формирования:** для изготовления труб используют полосы, порезанные на агрегате продольной резки по расчетной ширине, соответствующей диаметру трубы. Применяются различные типы клетей для формовки полосы на формовочных станах [2–4,17,18,21–24], такие как открытые клетки полного контакта, открытые клеи неполного

контакт и закрытые клетки. Для повышения устойчивости формирования ТЗ задействуют вертикальные неприводные эджерные клетки [25]. На рисунке 1.3 представлены схемы «цветок формовки», иллюстрирующие процесс сворачивания штрипса в трубную заготовку. Калибровка валков формовочного стана при производстве электросварных труб определяет геометрию формирования заготовки [18]. Процесс непрерывной формовки ТЗ является наиболее сложным и значимым этапом в технологии производства непрерывной формовки сварных труб. Это составляет основное содержание диссертации и подробно раскрыто в последующих разделах работы.



а – однорядусная калибровка; б – двухрадиусная с постоянным радиусом периферийных участков; в – двухрадиусная с прямолинейным центральным участком; г – двухрадиусная с постоянным радиусом центрального участка; д – с перегибом центрального участка; е – двухрадиусная с принудительном расформовкой

Рисунок 1.3 – Схемы калибровки валков формовочных станов и изменение кривизны полосы вдоль очага формовки (сплошные линии – периферийные; пунктир – центральные участки)

**Процесс сварки и редуцирование:** после сформованная трубная заготовка поступает в сварочную клеть, где кромки ТЗ свариваются с использованием различных методов: непрерывная печная сварка, электрическая сварка, лазерная сварка [2–4,6,17–19,21]. Оборудование включает шовнаправляющую клеть, сварочную клеть, внутренний и наружный гратосниматели.

**Калибрование трубы:** калибровка трубы осуществляется после сварки: заготовка поступает на редуцирование (калибровочные клетки) для достижения требуемого диаметра. Используется многоклетьевого стан, например, 3 клетки с горизонтальными приводными валками и 3 клетки с вертикальными неприводными валками. На выходе из стана выполняется правка трубы в правильной гладильной клетки [2,3,21–23].

**Процесс отделки труб:** процесс отделки труб включает дополнительные этапы для обеспечения качества: контроль (включая ультразвуковой), очистку шва, отжиг сварного шва, охлаждение, резку по длине, правку, нанесение защитные покрытия [2,3,21–23,26].

Таким образом, производство электросварных труб требует соблюдения технических и эксплуатационных требований на каждом этапе. В следующем разделе детально рассматривается технология формовки трубных заготовок для труб малого и среднего сортамента.

## **1.2 Схемы знакопеременной формовки в линиях непрерывных ТЭСА**

Формовка электросварных труб заключается в обработке исходной полосовой металлической заготовки заданной ширины и бесконечной длины. Заготовка подается в последовательно расположенные клетки ТЭСА и непрерывно формируется под давлением формовочных валков, в результате чего ее поперечное сечение приобретает круглую форму [5,21–23,27]. После этого кромки полосы свариваются между собой, образуя сварное соединение и формируя замкнутую трубу с заданной овальностью. Непрерывная электросварка применяется для соединения кромок предварительно сформованной ТЗ. В данном способе элементы производственной линии делятся на приводные формовочные клетки и неприводные клетки.

На рисунке 1.4 представлен «цветок» формовки ТЗ, иллюстрирующий процесс формирования заготовки со знакопеременным изгибом. Формовка основана на постепенном изгибе периферийных частей полосы с одинаковым радиусом и симметрично относительно ее центральной оси [27].

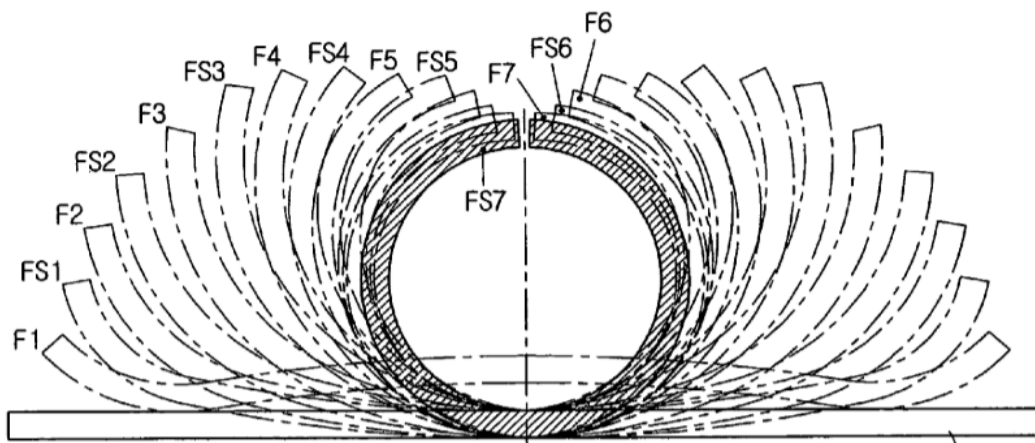


Рисунок 1.4 – «Цветок» формовки ТЗ со знакопеременным изгибом

С развитием компьютерных технологий в обрабатывающей промышленности все чаще применяется конечно-элементное моделирование, которое считается важным инструментом на этапах проектирования и оптимизации производства электросварных труб. Этот метод основывается на разработке эффективных численных моделей для анализа деформационных характеристик полосы и прогнозировании геометрических дефектов в процессе формоизменения ТЗ. Модель, учитывающая несколько параметров деформации и различные параметры для поиска оптимальной корреляции с эффектом Баушингера в электромеханических трубах, была реализована Чо и др. [28]. На качество трубных заготовок влияет множество факторов: скорость формовки, количество проходов, диаметр валков, свойства материала, наличие дефектов (продольный изгиб, волнистость кромок, асимметричность, смещение кромок ТЗ. Для оценки эффективности снижения дефектов, таких как продольный изгиб, краевая волнистость и асимметричность, разработана математическая модель на основе методов SVM (Support Vector Machine) и SVR (Support Vector Regression) для процесса формования ТЗ [29]. Соответствующая схема представлена на рисунке 1.5.

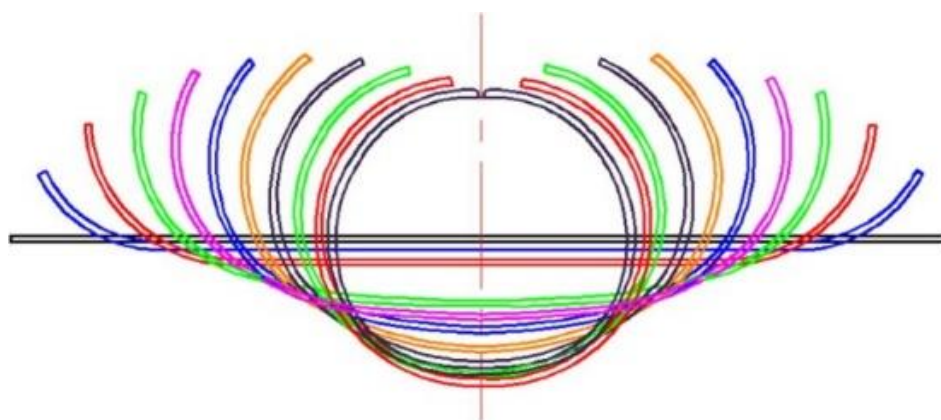


Рисунок 1.5 – Проектирование цветка для профилирования труб круглого сечения

В работе [30] для повышения эффективности и экономической целесообразности линии по производству электросварных труб, выпускающей изделия с различными техническими характеристиками, была разработана конечно-элементная имитационная модель. Модель основана на теории упругопластического деформирования [30] и параметрах типовых профилегибочных агрегатов, используемых при производстве труб методом электросварки сопротивлением (ERW, electrical resistance welding) [16,31,32]. Моделирование выполнено программном обеспечении COPRA. Моделирование охватывает 7 стандартных типоразмеров труб. Ключевые особенности включают угол перефирифного участков валков, определяющую формирование ТЗ, и центральный прямой участок, ограничивающий продольную деформацию при создании W-образного профиля.

На рисунке 1.6 представлены схемы поперечных сечений ТЗ на первой клетки для следующих диаметров: Ø32; Ø35; Ø38; Ø41; Ø45; Ø46,5; Ø48,6 мм [28].

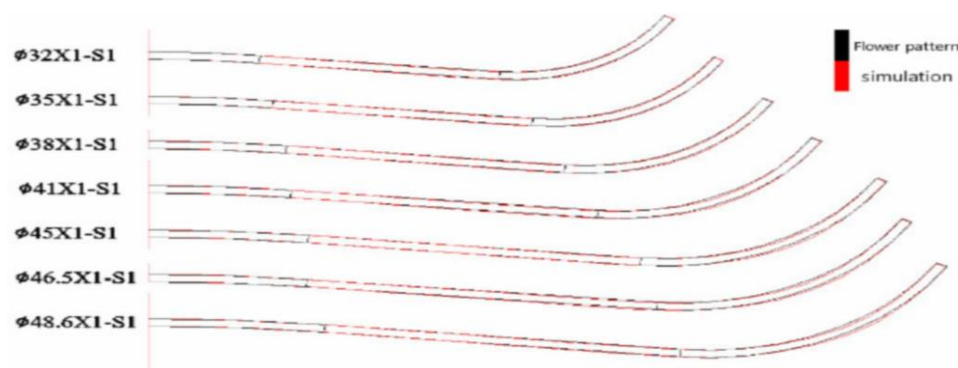
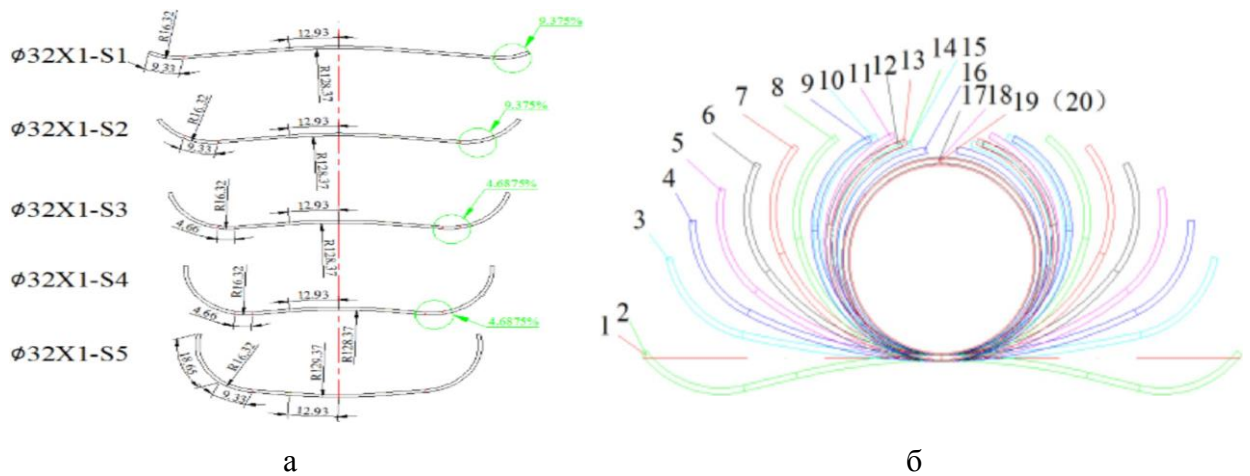


Рисунок 1.6 – Схема профиля сечений ТЗ на первой клетки для 7 различных стандартных размеров труб

Исследования в работе [28] показали, что применения «цветка» формовки (схемы калибровки валков) с заменой валков в первой–пятой клетях при производстве труб сварных труб различных типоразмеров обеспечивает соответствие требованиям к точности изготовления ТЗ; оптимизацию распределения поперечной деформации в процессе формовки (рисунок 1.7).

Данный подход позволяет сократить время и затраты на переналадку оборудования, а также снизить общий вес валков примерно на 35%. Эффективность подтверждается внедрением метода гибкой прокатки труб сварных труб [28].



а – профиль ТЗ для первых пяти формовочных клеток для трубы  $\text{Ø}32 \times 1$  мм;  
 б – «цветок» формовки

Рисунок 1.7 – Схема знакопеременной формовки при производстве труб сварных труб

В работе [33] представлено конечно-элементное моделирование со знакопеременной формовки для пяти типов круглых труб с одинаковым наружным диаметром, но разной толщиной стенки. Принципиальная схема процесса представлена на рисунке 1.8. Моделирование показало, что по сравнению с традиционным методом качество формовки кромок при знакопеременной формовке: снижается величина упругой деформации и обеспечивается высокая точность диаметра поперечного сечения.

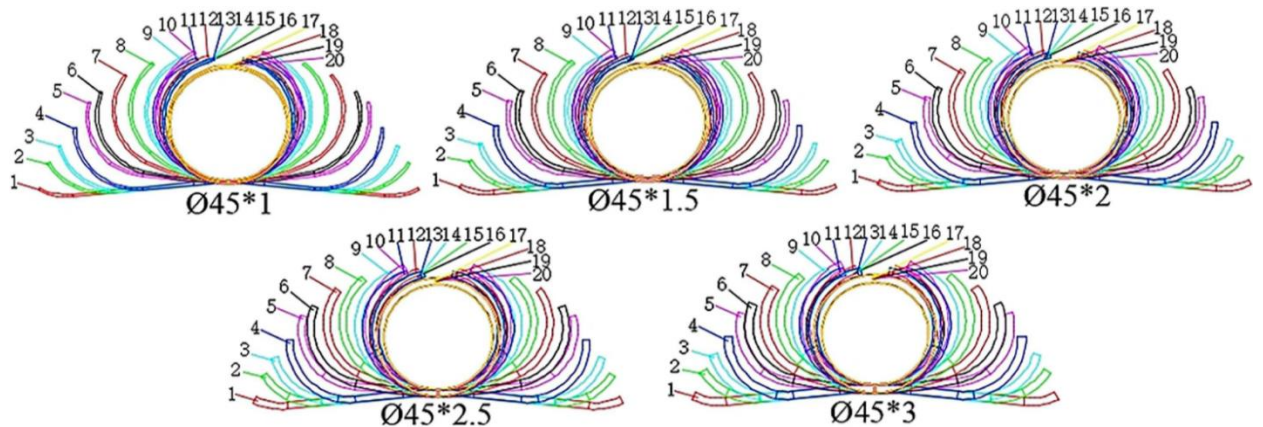


Рисунок 1.8 – Схемы знакопеременной формовки сварных труб  $\text{Ø}45$  мм с различной толщиной стенки

### 1.3 Компоновки оборудования и валкового инструмента для знакопеременной формовки в непрерывных линиях ТЭСА

В технологии производства непрерывных сварных труб используется линия ТЭСА (трубоэлектросварочный агрегат). Процесс непрерывной формовки ТЗ в таких линиях [34,35] осуществляется за счет вращательного движения приводных формовочных валков. Под их воздействием металлическая полоса заданной ширины постепенно деформируется в калибрах клеток, после чего кромки полосы свариваются, образуя готовую трубу. На рисунке 1.9 представлено типовой формовочный стан применяемое в производстве сварных труб [28].

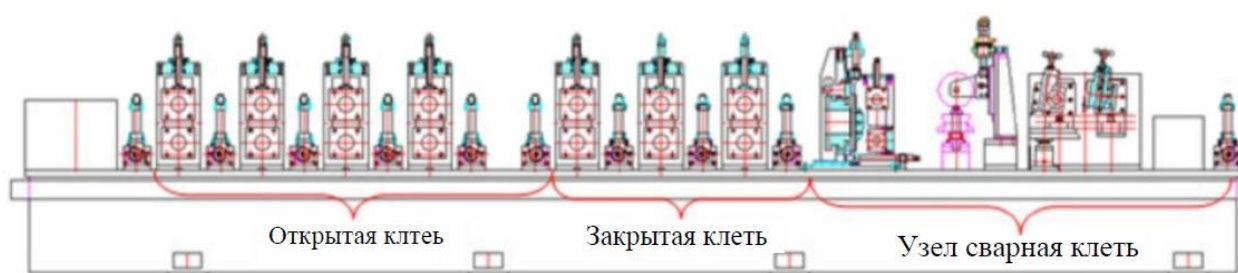


Рисунок 1.9 – Схема типичного валкового формовочного оборудования при производства сварных труб

Известно, что при формовке трубных заготовок образование гофров на кромках обусловлено возникновением продольных сжимающих напряжений. Причиной этого явления служит деформация заготовки под действием растягивающих и сжимающих сил в процессе непрерывной формовки на многочисленных клетях с валками различного калибра. Гофры негативно влияют на устойчивость заготовки при прохождении через формовочные клетки, равномерность деформации при формировании профиля ТЗ, а также на качество сварного шва в сварочном узле. Наиболее выражено этот дефект проявляется при производстве тонкостенных труб [5].

В работе [36] представлена компоновка оборудования формовочно-сварочного стана ТЭСА 203–530 со знакопеременной схемой формовки. В этой компоновке предусмотрены следующие элементы: участок задающих клеток, участок клеток со знакопеременной формовки, клеть реверсной формовки, эджерной стол, клетки закрытого типа.

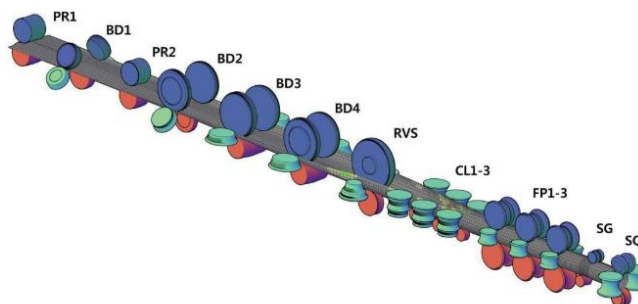


Рисунок 1.10 – Компоновка оборудования формовочно-сварочного стана ТЭСА 203–530

Для повышения качества процесса формовки трубных заготовок, особенно при производстве тонкостенных труб из высокопрочной стали в условиях непрерывной формовки, необходимо снизить риск гофрообразования на кромках заготовки и минимизировать упругую деформацию материала. С этой целью разработан метод — краевой изгиб. На начальном этапе процесса (в открытых формовочных клетях) кромки полосы подвергаются предварительному изгибу [37]. Соответствующая схема представлена на рисунке 1.11.

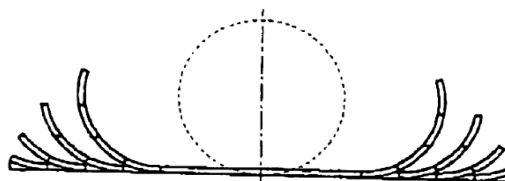


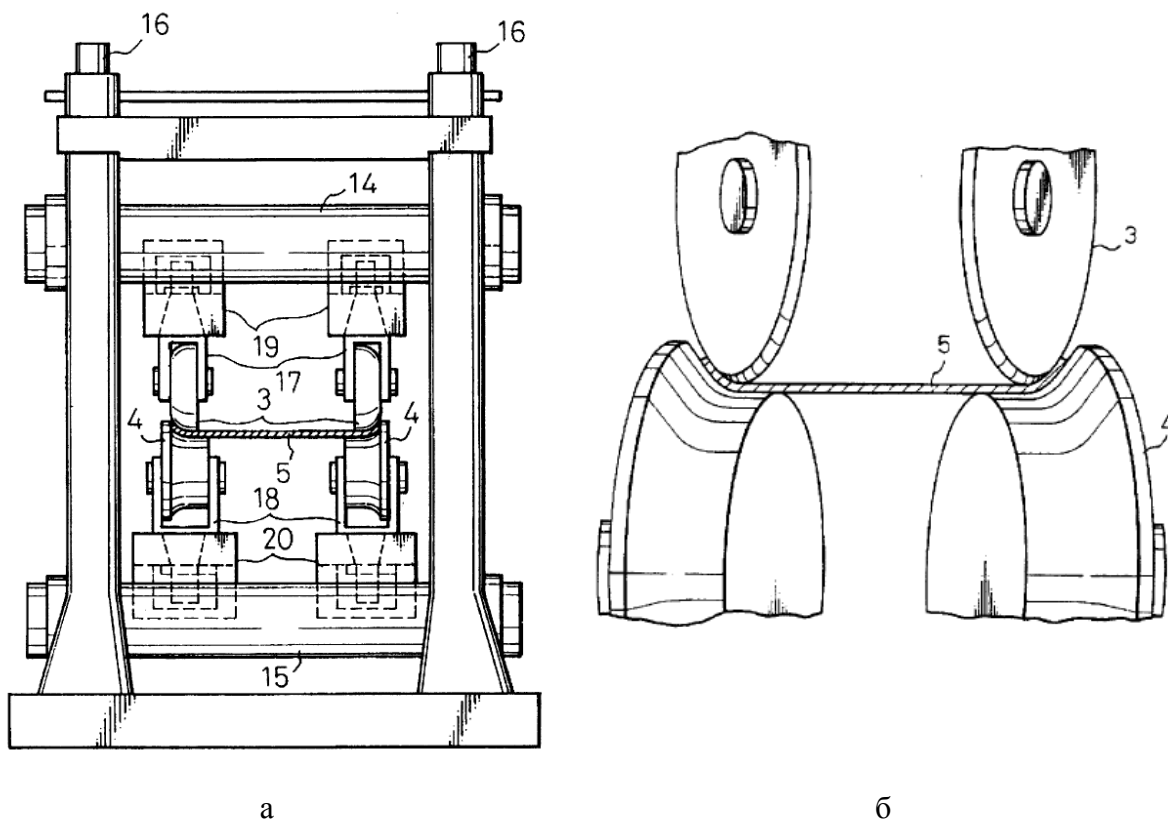
Рисунок 1.11 – Цветок метода края изгиба в процессе формовки

Основным недостатком типового формовочного оборудования и метода краевого изгиба является их ограниченная гибкость при формовании трубных заготовок для сварных труб различных размеров. Таким образом, в современном трубосварочном производстве необходимо разрабатывать методы формовки и формовочные клетки, обладающие повышенной гибкостью, чтобы обеспечивать изготовление высококачественных трубных заготовок (с высокой точностью размеров) перед сваркой, а также их обработку в формовочных клетях сварочного узла.

В патенте [38,39] описан метод формовки и формовочная клетка с применением знакопеременного изгиба, позволяющие с высокой точностью формовать периферийные участки полосы (рисунок 1.12). При этом горизонтальное и вертикальное положение каждого вала можно регулировать в зависимости от ширины полосы и диаметра формируемой трубы. Верхний формовочный валок может вращаться и фиксироваться на верхней части формовочной клетки, при этом направление вращения и угол поворота ограничиваются заданным углом формования. Спроектированная таким образом



формовочная клетка обеспечивает точную гибку кромок полосы без снижения качества толщины материала, преобразуемого в трубные заготовки. Конструкция также позволяет гибко настраивать параметры для формования заготовок различных размеров на одной формовочной клетке [38,39].

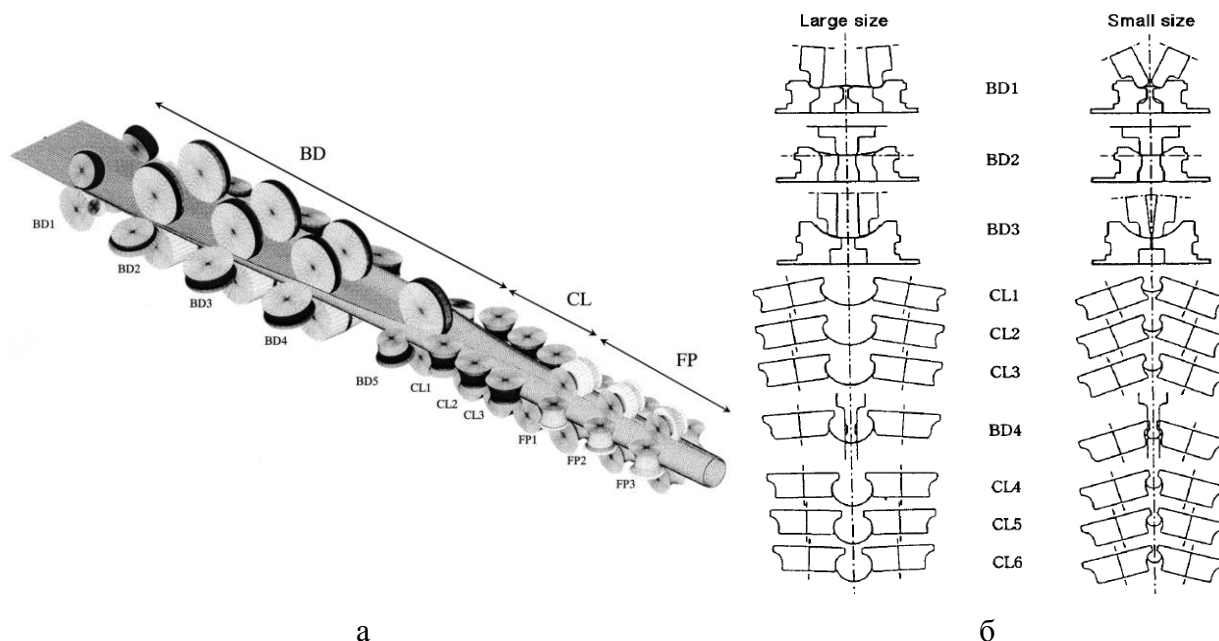


а – клетка формовки; б – валок формовки

Рисунок 1.12 – Клетка для формовки периферийных участков полосы

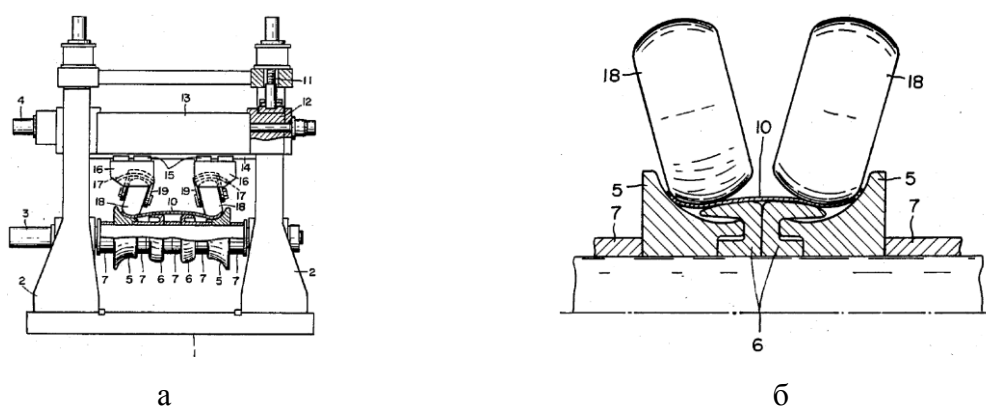
В работе [40] представлено оборудование и инструменты знакопеременного формования ТЗ, с верхним роликом, который может менять положение: перемещаться вертикально, горизонтально и может вращаться в определенных пределах, чтобы гибко формировать кромки полосы, когда изменение толщины и диаметра формируемой трубы, представлено рисунке 1.13.

В данной работе формовочные валки BD1–BD5 представляют собой валки, которые не требуют замены при формовке труб с различными размерами и толщиной стенки. В результате значительно сократилось время смены размеров изделий, а также существенно сократилось количество валков, необходимых для формирования изделий разных размеров [40].



а – схема расположения оборудования; б – схема расположения валков в клетях  
 Рисунок 1.13 – Оборудование и инструменты гибкого формования разработано

Для повышения эффективности формовки сварных трубных заготовок из плоских металлических полос может быть модифицирована структура профиля формовочного валка. Формовочные клетки обеспечивают плавное изменение кривизны сечения заготовки, что позволяет достигать высокой точности диаметра труб. При использовании схемы, представленной на рисунке 1.14, к нижнему формовочному валку добавляется промежуточный валок. Он формирует кривизну полосы, близкую к требуемой при кромочной гибке тонколистового материала. Это снижает влияние упругой деформации заготовки, повышает её формуемость и сокращает количество необходимых формовочных клеток [41].



а – клеть формовки; б – валок формовки

Рисунок 1.14 – Клеть формовки с нижним валом имеет приближенную фактическую кривизну

В рамках работы [16,42,43] выполнено 3D-моделирование в программном обеспечении Marc-Mentat для анализа процесса формовки ТЗ. Модель включает несколько малых валков, расположенных вдоль внешней поверхности деформированной полосы, что обеспечивает создание заданной кривизны на её кромках (рисунок 1.15). Данный подход позволяет формовать трубы различных размеров. Результаты анализа упругопластической деформации показали, что гофрообразование кромок возникает из-за превышения деформации в кромках полосы по сравнению с другими участками заготовки [28,32,44].

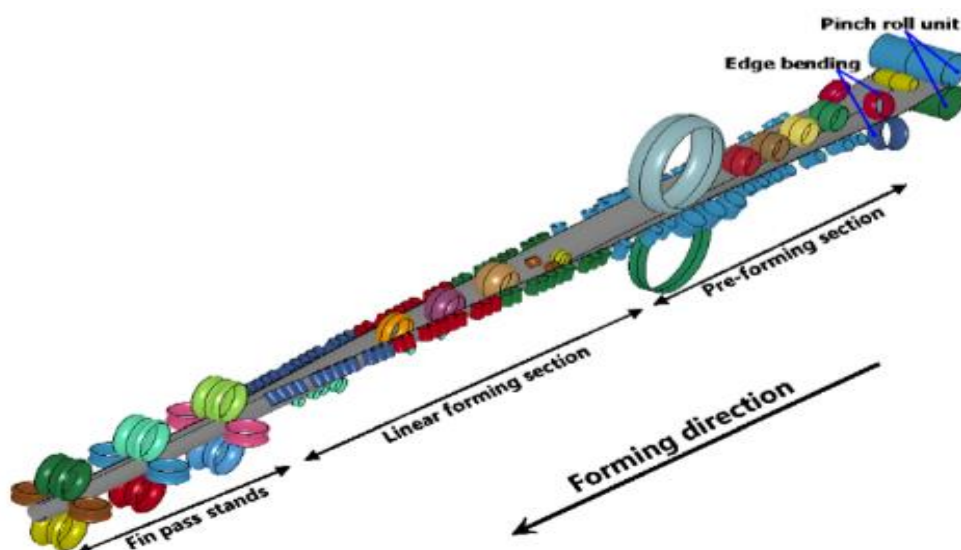


Рисунок 1.15 – Схема оборудования с применением нескольких небольших валков размещенных вдоль внешней поверхности полосы для формовки ТЗ

В работе [28] были построены трехмерные конечно-элементные модели для семи типоразмеров труб ( $\varnothing 32$ ;  $\varnothing 35$ ;  $\varnothing 38$ ;  $\varnothing 41$ ;  $\varnothing 45$ ;  $\varnothing 46,5$ ;  $\varnothing 48,6$  мм) и проведено численное моделирование в профессиональном программном обеспечении COPRA. На рисунке 1.16 представлена схема расположения формовочных валков на первых пяти клетях для труб диаметром  $\varnothing 45$  мм. Первые четыре клетки включают пять валков: две пары для гибки кромок и один опорный валок под центральной частью заготовки. Пятая клетка состоит из четырех валков: два кромкогибочных и пара средних для гибки центрального участка заготовки [28].

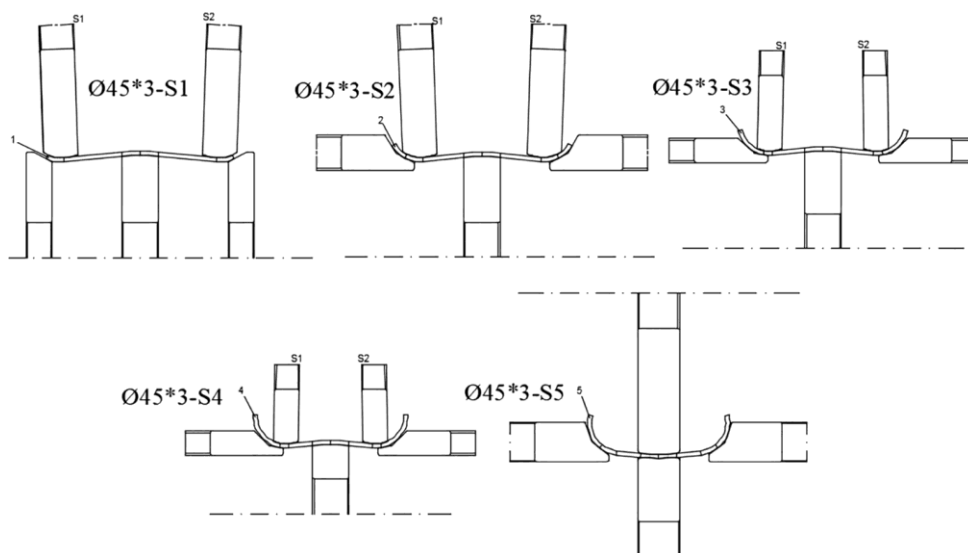


Рисунок 1.16 – Гибкая конструкция валков на первых пяти формовочных клетях

Результаты в работы [28] показали, что готовая труба со знакопеременной схемой формовки и адаптивными валками соответствует требованиям точности, а распределение поперечных деформаций при формовке оптимизировано. Технология гибкой прокатки сокращает время и затраты на подготовку и замену валков в клетях 1–5 при производстве труб различных типоразмеров.

В работе [33] представлена математическая модель формовки со знакопеременным изгибом ТЗ. Модель охватывает пять размеров круглых труб с разной толщиной стенки:  $\text{Ø}45 \times 1$ ;  $\text{Ø}45 \times 1,5$ ;  $\text{Ø}45 \times 2$ ;  $\text{Ø}45 \times 2,5$ ;  $\text{Ø}45 \times 3$  мм. Результаты показали, что метод гибкой формовки превосходит традиционный процесс формовки по следующим параметрам: снижение колебаний профиля кромок; уменьшение степени упрочнения материала; уменьшение упругого возврата (пружинения); повышение точности геометрии формовочного профиля.

Компоновка оборудования со знакопеременной формовки [33], представлена на рисунке 1.17. преимущество знакопеременной формовки

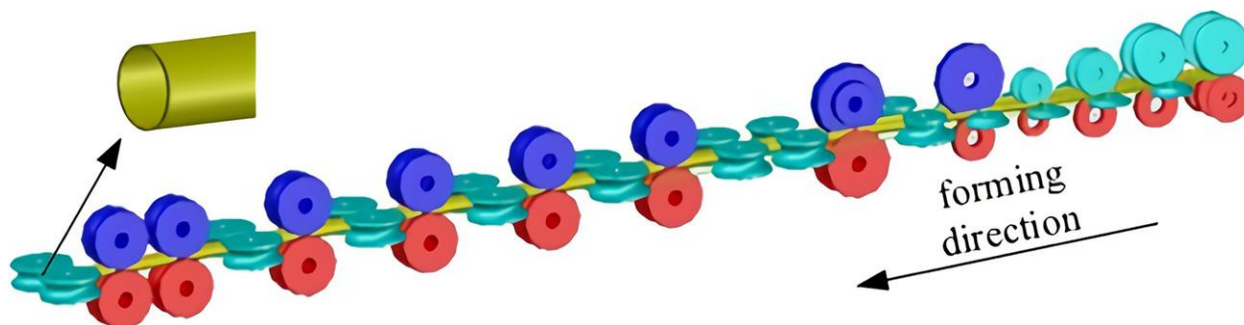


Рисунок 1.17 – Компоновка оборудования со знакопеременной формовки

## 1.4 Выводы

Анализ отечественных и зарубежных исследований в области производства электросварных труб малого и среднего диаметра показывает, что знакопеременная формовка, в отличие от традиционной формовки, обладает преимуществом для повышения устойчивости формоизменения и точности геометрии готовых труб. Эта технология, основанная на чередовании направлений деформации ТЗ, позволяет снизить влияние упругого возврата материала, что особенно актуально для обеспечения точности поперечного сечения во всех клетях ТЭСА.

В существующих исследованиях недостаточно представлено экспериментальных данных, необходимых для установления взаимосвязи между амплитудой знакопеременной формовкой и остаточной кривизной ТЗ.

Также отсутствуют методики, для расчета как геометрические параметры формоизменения заготовки, обеспечивающие минимальное распружинивание, так и геометрические параметры валкового инструмента, обеспечивающую устойчивость непрерывной знакопеременной формовки ТЗ.

Таким образом, сформулированы основные задачи диссертационной работы, которые дополняют прежние исследования знакопеременной формовки, расширяя их экспериментальную и теоретическую базу:

- Провести сравнительные экспериментальные исследования классической и знакопеременной формовки образцов ( $160 \times 300 \times 1,5$  мм, сталь Ст3) в открытых клетях ТЭСА и установить зависимость между амплитудой знакопеременной формовки (от отрицательной до положительной кривизны) и остаточной кривизной образцов после упругого восстановления (распружинивания);

- На основе анализа экспериментальных данных разработать методику расчёта геометрических параметров формоизменения ТЗ для непрерывной знакопеременной формовки, обеспечивающую снижение величины упругого восстановления (распружинивания) ТЗ;

- Разработать методику расчёта геометрических параметров валкового инструмента для непрерывной знакопеременной формовки.

## Глава 2 Анализ непрерывного формоизменения со знакопеременной формовкой условиях ТЭСА 10–60 НИТУ МИСИС

### 2.1 Расчет параметров непрерывного формоизменения со знакопеременной формовкой и анализ продольных деформаций по клетям формовочного стана

В процессах непрерывной формовки ТЗ в линии валковых формовочных станов большое значение имеет факт получение симметричной заготовки относительно вертикальной оси с заданным зазором кромок при выходе из последней формовочной клетки [24,44,45]. Это позволит свести кромки и получить качественный сварной шов.

В процессе формовки и сварки заготовки в сварочной клетке большое значение уделяется стабильности перемещения профиля заготовки при сведении и оплавлении кромок [46]. Профиль заготовки должен стабильно и симметрично перемещаться в зоне сварочного стана и иметь минимальное распружинивание, поскольку упругий разворот заготовки происходит как правило не симметрично и постоянно изменяет условия контактной до формовки и сварки, что может привести к смещению кромок и некачественной сварке профиля ТЗ (трубная заготовка). Поэтому вопрос о снижении распружинивания по деформационным сечениям и сварочному узлу остается важным и актуальным [28,47,48].

Многие исследователи изучали эти вопросы и предлагали технические решения по способам и оборудованию, позволяющие существенно снижать распружинивание ТЗ [25,28,47,49–51] на различных участках очага сворачивания заготовки. Вызванное упругим перераспределением внутренних напряжений при разгрузке [52].

На уменьшение величины распружинивания заготовки по линии непрерывной формовки влияет амплитуда изменения величины от отрицательной кривизны ( $\alpha_{\text{начало}}$ ) до кривизны обратного знака ( $\alpha_{\text{г.п}}$ ) (один цикл). Обычно схема знакопеременного изгиба, применяется в открытых клетях формовочного стана.

Общая длина очага сворачивания должна находиться в определенном соотношении с длиной участка со знакопеременной формовкой в линии стана (в трех, четырех клетях).

Каждый цикл «формовка-расформовка» требует по всей длине очага сворачивания стана плавной траектории периферийных участков (кромки) до получения профиля ТЗ под сварку. Каждый цикл со знакопеременной формовкой, несомненно, усложняет и удлиняет траекторию периферийных участков (кромки) по сравнению с классической схемой формовки.

По сравнению с двузонной схемой деформированного состояния (сжатие в середине ТЗ и растяжение по кромкам) по профилю, увеличивается количество зон «растяжения-

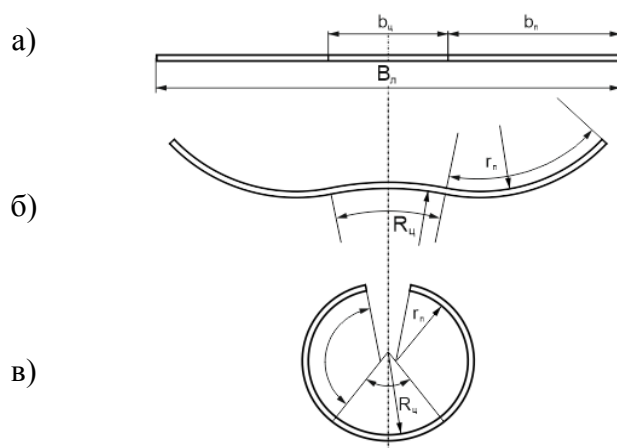
сжатия» даже в сечении профиля одного калибра, а это изменяет сочетание этих зон по длине очага в зависимости от наличия отрицательных зон кривизны [47].

Кроме этого, традиционные валковая и валково-роликовая непрерывная формовка сочетают в себе цикличность одной деформационной зоны (изгиба при входе в калибр и распружинивания при выходе из него) [9,47]. При удлинении очага сворачивания количество деформационных сечений увеличит количество описанных циклов из-за применения знакопеременного изгиба и появлением участков ТЗ с отрицательным значением кривизны. Все это требует дополнительных технологических решений, исключающих смещение профиля в очаге деформации и контроля геометрических параметров ТЗ при формовке.

Минимально распружинивание и стабильность процесса формовки, возможно обеспечить при разработке новых предлагаемых схем сворачивания с последующим обязательным контролем, регулировки и управлением напряженно-деформированного состояния (НДС) ТЗ по всей длине очага сворачивания.

Для анализа технологии формовки со знакопеременным изгибом в условиях ТЭСА 10-60 НИТУ МИСИС выбран типоразмер трубы  $\text{Ø}50 \times 1,5$  мм, так как для типоразмера трубы имеется комплект валкового инструмента.

При разработке схем сворачивания, ширина ТЗ делится на три участка: один центральный и два периферийных(кромки) (рисунок 2.1).



а – профиль исходной заготовки; б – профиль заготовка с противоизгибом центральной части заготовки; в – профиль заготовки обратным изгибом центральной части заготовки

Рисунок 2.1 – Схема деления ТЗ под процесс знакопеременной формовки ТЗ

Соответственно для этой трубы определена исходная ширина ТЗ, ширина центрального участка, и ширина периферийного участка по всем клетям стана, представлены в таблице 2.1 [47].

Таблица 2.1 – Ширина ТЗ и ширины участков

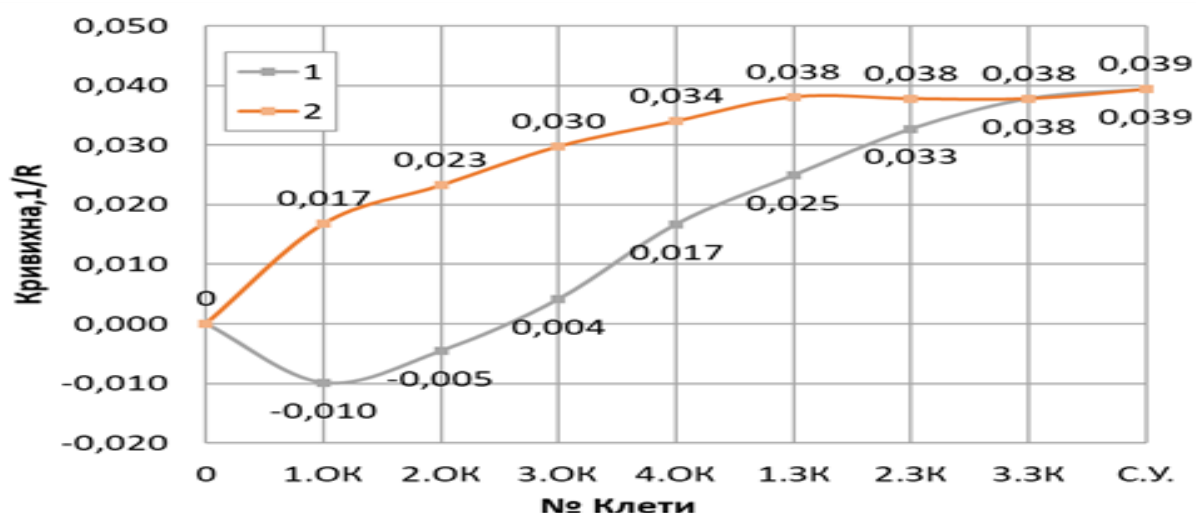
клетки	1.ОК	2.ОК	3.ОК	4.ОК	1.3К	2.3К	3.3К	С.У.
$B_{л}$ , мм	162,80	162,80	162,80	162,80	162,31	161,82	161,34	159,66
$b_{ц}$ , мм	40,70	40,70	40,70	40,70	40,70	40,70	40,70	40,70
$b_{п}$ , мм	61,05	61,05	61,05	61,05	60,81	60,56	60,32	59,48

Радиусы и кривизна ТЗ равно  $1/R$  [4,53,54], представлены в таблице 2.2 [47].

Таблица 2.2 – Радиусы и кривизна ТЗ

клетки	1.ОК	2.ОК	3.ОК	4.ОК	1.3К	2.3К	3.3К	С.У.
	Радиусы, мм							
$R_{ц.}$ , мм	-100,86	-217,73	243,16	59,93	40,13	30,57	26,47	25,41
$R_{п.}$ , мм	59,64	43,06	33,62	29,42	26,27	26,48	26,48	25,41
	Кривизна $1/R$							
Центральная часть	-0,010	-0,005	0,004	0,017	0,025	0,033	0,038	0,039
Периферийная часть	0,017	0,023	0,030	0,034	0,038	0,038	0,038	0,039

По значениям из таблицы 2.2 построены изменение кривизны ТЗ по всем клетям формовочного стана (рисунок 2.2) [47].



1- периферийный участок; 2 – центральный участок

Рисунок 2.2 – Кривизна ТЗ для трубы  $\varnothing 50 \times 1,5$  мм

Таким образом для данной кривизны заготовки величина центрального участка (с шириной 25–30 %  $B_{л}$ ) противоизгибом составляет 25% от  $\alpha_{г.п}$  и приходится на первую формовочную клеть (1.ОК). В третьей формовочной клетке (3.ОК) осуществляется реверс



формовки до 10–15% от  $\alpha_{г.п.}$  и дальнейшее равномерное увеличение кривизны центрального участка до получения  $\alpha_{г.п.}$ . Периферийные участки ТЗ формируются традиционно, а именно: обеспечивается зависимость близкая к равномерной на участке открытых калибров и плавная подгибка на участке закрытых калибров, определяемая закономерностью уменьшения величин разрезных шайб по мере продвижения ТЗ к сварочному узлу.

Обычно такая схема может привести к увеличению протяженности очага сворачивания формовочного стана на 1–2 клетки. В предложенных вариантах длина очага не меняется от длины ТЭСА 10–60 за счет подбора кривизны заготовки для обоих участков по ширине. Если при подборе вариантов, значения продольных деформаций превышают допустимые для данного материала, необходимо уменьшать значения [47]  $\alpha_{нач.отриц.}$  для 1.ОК.

Так как продольная деформация влияет на формуемость и устойчивость заготовки в процессе формования [47]. Для анализа продольной деформации заготовки использовалась схема расчета продольной деформации фиксированного волокна [47], показанная на рисунке 2.3.

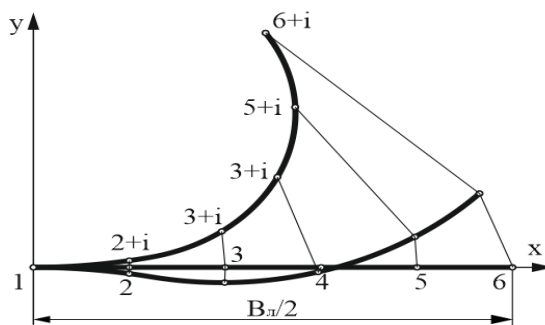


Рисунок 2.3 – Расчетная схема определения фиксированных точек и траекторий

Поскольку процесс симметричный, траекторию перемещения волокон по фиксированным точкам рассматриваем на одной половине ТЗ. Половину центральной и периферийной частей штрипса делим на пять равных частей. Точка 1 соответствует центральному волокну, точка 6 волокну кромки, точки 5 и 2 соответствуют нейтральным волокнам, 3 – переходное волокно.

Значение продольных деформаций по фиксированным волокнам на участке открытых калибров определяли по следующим формулам:

$$\epsilon_{6-6}^{i-i+1} = \frac{l_{6-6}^{i-i+1} - l_{5-5}^{i-i+1}}{l_{5-5}^{i-i+1}} \cdot 100 \quad \epsilon_{5-5}^{i-i+1} = \frac{l_{5-5}^{i-i+1} - l_{5-5}^{i-i+1}}{l_{5-5}^{i-i+1}} \cdot 100 \quad \epsilon_{4-4}^{i-i+1} = \frac{l_{4-4}^{i-i+1} - l_{5-5}^{i-i+1}}{l_{5-5}^{i-i+1}} \cdot 100$$

$$\epsilon_{3-3}^{i-i+1} = \sqrt{\left( \frac{l_{3-3}^{i-i+1} - l_{5-5}^{i-i+1}}{l_{5-5}^{i-i+1}} \right)^2 + \left( \frac{l_{3-3}^{i-i+1} - l_{2-2}^{i-i+1}}{l_{2-2}^{i-i+1}} \right)^2} \cdot 100$$

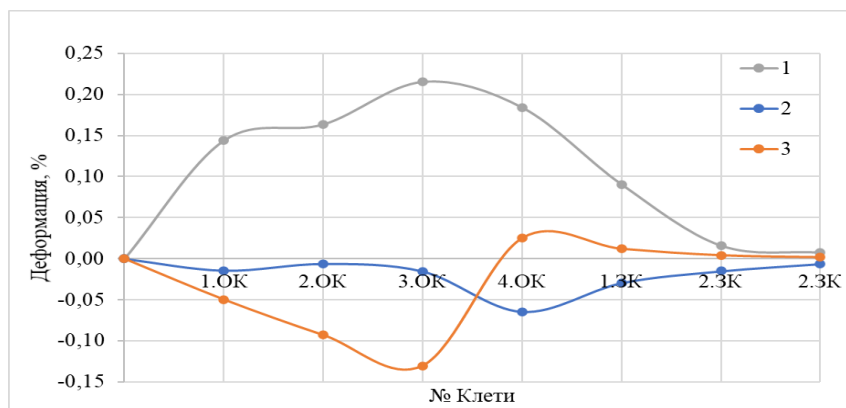
$$\varepsilon_{2-2}^{i-i+1} = \frac{l_{2-2}^{i-i+1} - l_{2-2}^{i-i+1}}{l_{2-2}^{i-i+1}} \cdot 100 \quad \varepsilon_{1-1}^{i-i+1} = \frac{l_{1-1}^{i-i+1} - l_{2-2}^{i-i+1}}{l_{2-2}^{i-i+1}} \cdot 100 \quad \varepsilon_{0-0}^{i-i+1} = \frac{l_{0-0}^{i-i+1} - l_{2-2}^{i-i+1}}{l_{2-2}^{i-i+1}} \cdot 100$$

В результате расчетов получены значения продольных деформаций по фиксированным волокнам (таблица 2.3); и построен график по очагу сворачивания (рисунок 2.4).

Таблица 2.3 – Продольные деформации по шести фиксированным волокнам

точки	Формовочные клетки						
	1.ОК	2.ОК	3.ОК	4.ОК	1.3К	2.3К	2.3К
0	-0,014	-0,006	-0,015	-0,064	-0,03	-0,015	-0,006
1	-0,013	-0,006	-0,014	-0,064	-0,029	-0,015	-0,006
2	0	0	0	-0,054	-0,025	-0,011	-0,005
3	0,016	0,049	0,073	-0,025	-0,012	-0,004	-0,002
4	-0,05	-0,093	-0,13	0,025	0,012	0,004	0,002
5	0	0	0	0,097	0,047	0,012	0,005
6	0,144	0,164	0,215	0,184	0,091	0,016	0,008

На рисунке 2.4 представлено поле продольных деформаций по трем фиксированным волокнам ТЗ по всем рабочим клетям.



1- кромка; 2- дно; 3 – четвертое волокно

Рисунок 2.4 – Поле продольных деформаций по фиксированным волокнам ТЗ по всем рабочим клетям

Анализ значений продольных деформаций для трех фиксированных волокон (рисунок 2.4) показал, что крайние волокна ТЗ (1 -кромка; 2-дно) имеют традиционный характер изменения значений деформаций, а именно все деформации для первого волокна находятся в зоне растяжения, а деформации для второго волокна - в зоне сжатия.

Характер третьего волокна существенно изменился из-за применения знакопеременной формовки. На начальном участке открытых клетей, там, где применяется знакопеременная формовка продольные деформации сжимаются. На дальнейшем участке, там, где восстанавливается традиционная схема формовки - растягиваются.

## **2.2 Формоизменение при знакопеременной формовке для прямолинейной, ниспадающей и криволинейной траекторий осевого волокна**

Современное трубное производство отличается большим разнообразием высокоэффективных способов изготовления продукции, среди которых определяющее значение имеют способы обработки металлов давлением [47]. Развитие научно-технического процесса выдвигает перед трубной промышленностью РФ задачи по дальнейшему совершенствованию производства. Развитие техники, создание новых современных машин и приборов, отвечающих требованиям мировых стандартов, сопровождается всё более широким и разнообразным использованием в конструкциях всевозможных видов труб [47,55,56].

В процессах непрерывной формовки ТЗ в линии валковых формовочных станов основными факторами, влияющими на устойчивое формоизменение ТЗ и качество труб, является: точность геометрических параметров исходной полосы [55,57,58], калибровка и настройка валкового инструмента [25,28,44,59], точность схождения кромок ТЗ в сварочном узле [47].

На уменьшение распружинивания заготовки по линии непрерывной формовки влияет амплитуда сочетания конечной и отрицательной кривизны в начале процесса (один цикл), схема знакопеременного изгиба, применяемая на начальном участке открытых клетей стана.

Традиционные валковая и валково-роликовая непрерывная формовка сочетают в себе цикличность одной деформационной зоны (нагрузка при входе в очаг деформации и разгрузка при выходе из него [60,61]).

Далее исследуются очаг сворачивания со знакопеременным изгибом в сочетании с ниспадающей траекторией осевого волокна ТЗ [55,62] на основе изменения угла между прямой касания сечения «цветка» формовки и вертикальной осью формовки для трубы типоразмера  $D_t \times S_t$  диаметром  $\varnothing 50 \times 1,5$  мм и ТЭСА 10–60. Геометрические параметры профиля ТЗ для трубы  $\varnothing 50 \times 1,5$  мм [47], представленные в таблице 2.4 реализуют вариант зависимости кривизн для существующей компоновки ТЭСА 10–60 [55,63], включающей схему знакопеременного изгиба центральной части ТЗ с отрицательной кривизной в начале участка открытых клетей формовочного стана.

Таблица 2.4 – Параметры профиля ТЗ для трубы Ø50x1,5 мм

Клетки	1.ОК	2.ОК	3.ОК	4.ОК	1.ЗК	2.ЗК	3.ЗК	С.У.
	Радиусы, мм							
$R_{ц}$ , мм	-105,33	-232,45	185,96	46,49	32,74	29,23	26,40	25,41
$R_{п}$ , мм	65,07	46,96	29,99	29,61	27,48	27,25	26,40	25,41
	Кривизна 1/R							
$1/R_{ц}$	-0,009	-0,004	0,005	0,022	0,031	0,034	0,038	0,039
$1/R_{п}$	0,015	0,021	0,033	0,034	0,036	0,037	0,038	0,039
Примечание	1.ОК; 2.ОК; 3.ОК; 4.ОК – первый – четвертый открытые калибры; 1.ЗК; 2.ЗК; 3.ЗК – первый – третий закрытые калибры; С.У. – сварочный узел; $R_{ц}$ , $1/R_{ц}$ – радиус и кривизна центрального участка ТЗ; $R_{п}$ , $1/R_{п}$ – радиус и кривизна периферийного участка ТЗ.							

По значениям в таблицы 2.4 реализуется вариант зависимости кривизн ТЗ для трубы Ø50x1,5 мм для существующей компоновки ТЭСА 10–60, включающей схему знакопеременного изгиба центральной части ТЗ.

Если значения продольных деформаций превышают допустимые для данного материала, необходимо уменьшать значения знакопеременной кривизны обратного знака для 1.ОК либо подбирать схемы, позволяющие существенно снизить продольные деформации кромок, в частности схемы с ниспадающим осевым волокном ТЗ [55].

Ниже представлен «цветок» формовки ТЗ для трубы Ø50x1,5 мм со знакопеременным изгибом на участке открытых калибров – рисунок 2.5.

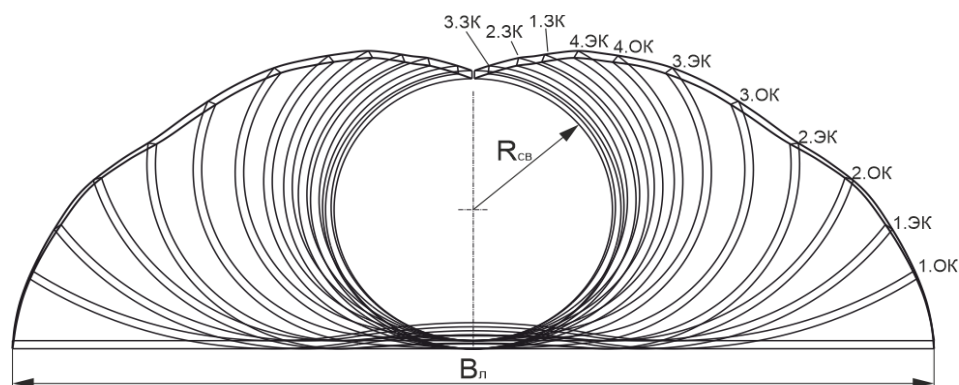


Рисунок 2.5 – «Цветок» формовки ТЗ для трубы Ø50x1,5 мм со знакопеременным изгибом на участке открытых калибров

Расчет продольных деформаций показал, что наиболее опасным волокном по значениям продольных деформаций является кромка ТЗ, поэтому ниже провели расчет деформаций кромок для действующей компоновки формовочного стана (рисунок 2.6), в соответствии с которым установлено, что на участке между 3.ОК и 4.ОК клетями значения деформаций выходят за пределы допустимых (превышают на 0,05%) [55].

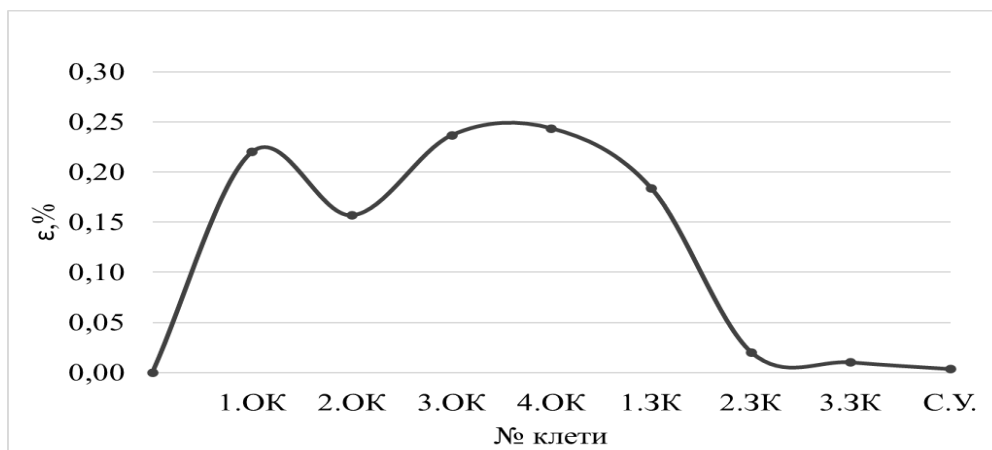


Рисунок 2.6 – Значения продольных деформаций на кромке ТЗ трубы Ø50x1,5 мм

Для обеспечения качественной формовки ТЗ по новой схеме целесообразно применить схему формовки с ниспадающим осевым волокном ТЗ, для чего необходимо провести ряд построений и расчетов.

Были проведены исследования параметров знакопеременных схем формовки, в которых определяющим параметром явился угол линии точки касания профиля ТЗ по сечениям рабочих клеток. Диапазон изменения этих углов составил 90-30° с шагом 10° [55] представлены на таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Параметры схем формовки с диапазоном углов касания.

№	$\theta$ , град	$L_{кр}$ , мм	$\epsilon_{кр}$ , %	H, мм
1	90	2403,22	0,134	25,88
2	80	2402,68	0,112	11,93
3	70	2402,36	0,098	-2,09
4	60	2402,16	0,090	-17,11
5	50	2402,1	0,088	-34,52
6	40	2402,25	0,094	-56,75
7	30	2403,15	0,131	-89,23

Построение очага сворачивания ТЗ осуществлялось в программе Solidworks. Ниже представлены два способа изменения формы ТЗ с использованием знакопеременной формовки: первый вариант имеет прямолинейную траекторию осевого волокна ТЗ и второй варианта основан на ниспадающей траекторией осевого волокна ТЗ - рисунок 2.7.

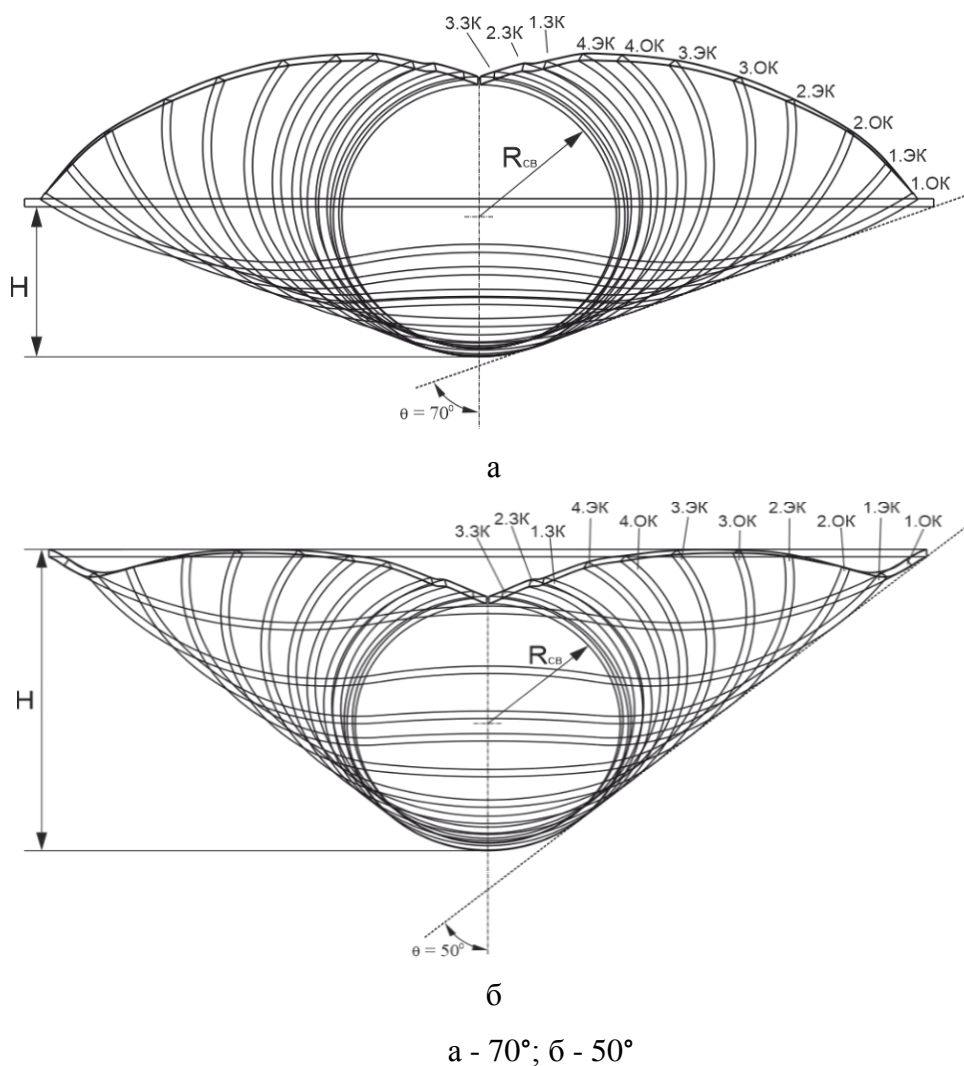
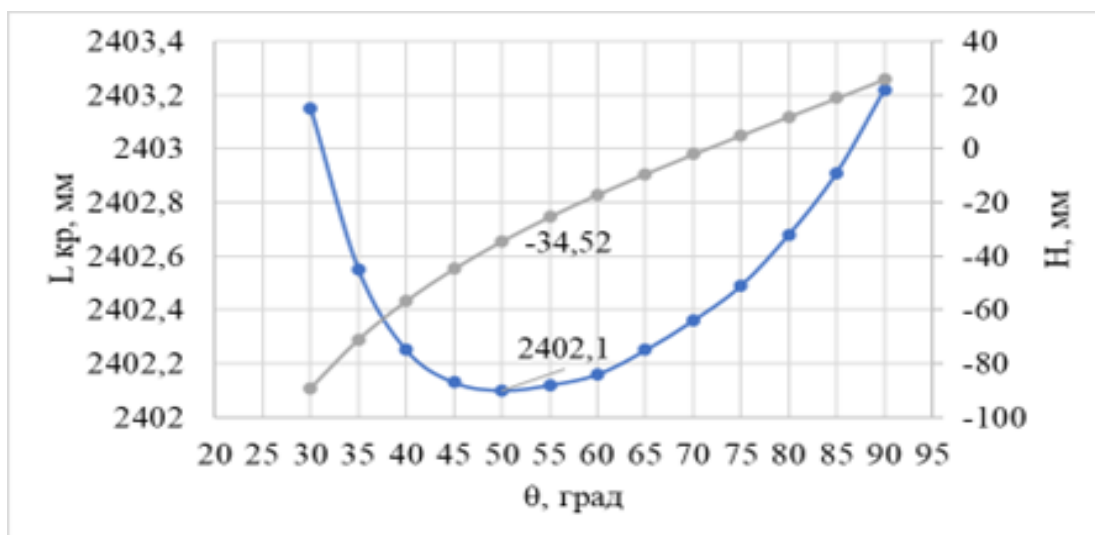
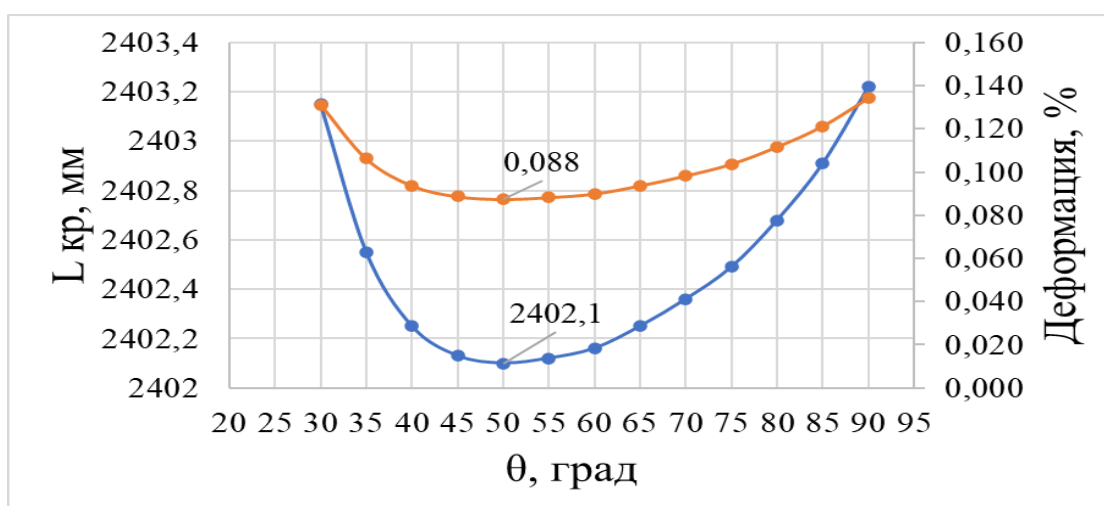


Рисунок 2.7 – Схемы формовки ТЗ с ниспадающей траекторией осевого волокна

Анализ схем сворачивания с ниспадающей траекторией осевого волокна и значения из таблицы 2.5 показали, что наиболее оптимальной является схема с углом касательной равным 50 градусам [55]– рисунок 2.8.



а



б

Рисунок 2.8 – Графики зависимости длины кромки ТЗ от угла касательной (θ) для трубы Ø50×1,5 мм с дополнительными осями: а - высоты подъема (Н); б - продольная деформация кромки

На графике (рисунок. 2.8 а) представлены зависимости длины кромки от угла касания высота кромки от базовой полосы.

На рисунке 2.8 б представлены зависимости длины кромки от угла касания высота и деформаций. Таким образом, в очаге сворачивания с ниспадающей траекторией с

параметрами с углом ( $\theta$ ) =50° и высотой подъема (Н) -34,52 мм возникают минимальные продольные деформации в пределах допустимых значений 0,088% [55].

### 2.3 Унификация схем формоизменения и валкового инструмента

Формовочные и калибровочные станы непрерывных ТЭСА предназначены для непрерывной формовки в формовочных клетях трубной заготовки, последующей сварки, калибровки труб по наружному диаметру, их правки, а также резки по длине [2,28,34,35,63,64].

Сварные трубы малых диаметров ( $\varnothing 5\text{--}\varnothing 14$  мм) применяют в автомобильной и тракторной промышленности, сельскохозяйственном, энергетическом, химическом и нефтяном машиностроении, а также при изготовлении трубчатых электронагревателей [1,64], велосипедов и в других конструкциях [17]. Модернизированный ТЭСА 10–60 НИТУ МИСИС входит в типовые ТЭСА [63,65,66]; расширяет сортамент и возможности оборудования и технологической оснастки для исследования геометрии ТЗ по клетям формовочного стана.

Основные технические характеристики опытного ТЭСА 10–60 НИТУ МИСИС [5], представлены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Технические параметры опытного ТЭСА 10–60 НИТУ МИСИС

Тип	10-60
Диаметр труб, мм	10-60
Толщина стенки, мм	0,5-4
Скорость формовки, м/мин	10-30
Число клеток: горизонтальных/вертикальных	6/5
Тип привода	групповой
Мощность привода, кВт	1,5

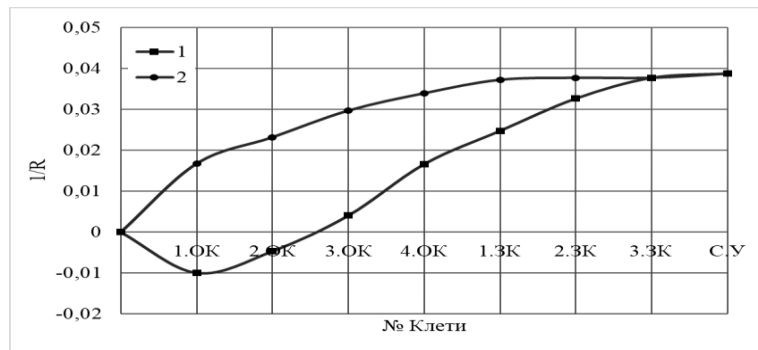
В результате анализа современных технологий ТЭСА для малых и средних диаметров установлена целесообразность изучения процесса знакопеременной непрерывной формовки. Данный процесс нашёл широкое применение при проектировании валкового и валково-роликового инструмента, используемого на отдельных участках формовочного стана [67].

Знакопеременную формовку на участке открытых калибров целесообразно применять в сочетании с формовкой центрального участка заготовки радиусом обратного знака

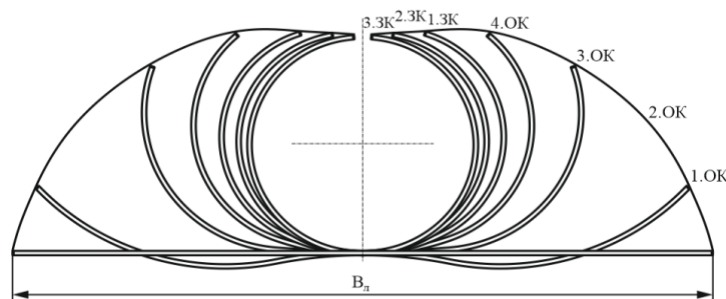


(выгиб заготовки) и одновременной формовкой симметричных периферийных участков по традиционным схемам сворачивания (радиусами положительного знака). Данные схемы разрабатывались с целью снижения распушинивания кромок на 10–15% [60]. Кроме того, уменьшение распушинивания заготовки на участке закрытых клетей и в зоне сварки позволяет снизить смещение кромок и минимизировать риск гофрообразования, что повышает качество сварных труб.

На рисунке 2.9а представлена закономерность изменения кривизны ТЗ для двух участков: 1 - для центрального участка заготовки; 2 - для периферийного участка. На рисунке 2.9б представлен "цветок" ТЗ по семи клетям формовочного стана ТЭСА 10–60.



а



б

а - закономерность изменения кривизны ТЗ для двух участков заготовки; б - "цветок" формовки ТЗ с траекторией кромки по основным деформационным калибрам формовочного стана

Рисунок 2.9 – Параметры знакопеременной формовки

Закономерность кривизны графика 1 (рисунок 2.9а) соответствует традиционной для периферийных участков, а закономерность графика 2 характерна для центрального участка. Кривая 1 может иметь несколько вариантов и отражает близкую к равномерной подгибку периферийных зон открытых калибров, а также зависимость, свойственную участкам закрытых калибров.

Закономерность кривизны графика 2 обеспечивает отрицательные значения кривизны на участке открытых калибров до реверсивной клетки.

«Цветок» формовки (рисунок 2.9б) демонстрирует постепенное формоизменение заготовки по ширине и длине формовочного стана, включая четыре открытых и три закрытых калибра. При определении параметров обеспечивалось, чтобы траектория кромок полосы во всех клетях, представленная на «цветке» формовки, имела плавный монотонный характер.

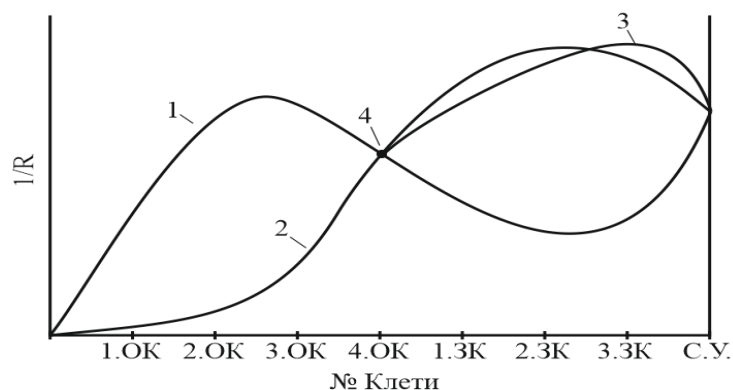
Применение многорадиусных схем сворачивания (метод гибкой формовки) по всей длине очага формовки позволяет [18,28]: расширить степень технологической подготовки, настройки и производства (за счет увеличения пар калибровки "радиус-угол" в сечении профиля заготовки, влияющих непосредственно на геометрические параметры профиля заготовки по калибрам); более точно регулировать и управлять НДС; существенно снизить распруживание сформованного профиля заготовки под сварку на 20–40%.

При изготовлении труб по двухрадиусной схеме калибровки ширину исходного штрипса делят на три участка: центральный и два симметричных периферийных участка. Для упрощения конструирования технологического валкового инструмента параметры центрального и периферийных участков выбирают таким образом, чтобы кривизна каждого вала оставалась постоянной на соответствующем участке. Заданная закономерность изменения кривизны для каждого из участков по длине очага свертывания обеспечит минимальное распруживание готового профиля заготовки. При изготовлении труб по трёхрадиусной схеме свертывания ширину исходного штрипса делят на три участка: центральный, срединный и периферийный [17,68].

Данный способ наглядно проиллюстрирован схемой формовки на рисунке 2.10.

Кривая траектории -1 позволяет интенсивно сформировать центральный участок ТЗ в начале очага сворачивания выше значения кривизны готовой трубы. Затем при прохождении опорной точки 4 (последний открытый калибр) значение кривизны уменьшается - происходит принудительная расформовка участка. Это позволит снизить распруживание центрального участка на 20–30%.

Кривая траектории - 2 обеспечивает интенсивное формирование первого периферийного участка ТЗ в закрытых калибрах. На участке открытых калибров этот участок принудительно расформовывается. Такой приём - «расформовка - интенсивная формовка» - по оценке снизит распруживание участков на 15–25%.



1- траектория кривизны для центрального участка; 2 - траектория кривизны заготовки для первого периферийного участка заготовки; 3 - траектория кривизны заготовки для второго периферийного участка заготовки; 4 - положение опорной точки при расчете кривизн участков заготовки (последний открытый калибр)

Рисунок 2.10 – Способ непрерывной формовки с периодической переформовкой участков заготовки по длине формовочного стана

Кривая траектории -3, начинающаяся из опорной точки 4, позволяет интенсивно сформировать второй периферийный участок в закрытых калибрах, что снизит распушивание этого участка на 10–15%.

На современных ТЭСА выпускают широкий сортамент труб, что вызывает частые перенастройки валкового инструмента с остановкой стана и вынуждает производство иметь большой парк дорогостоящего оборудования. В таких условиях целесообразно применять унифицированные валковые комплекты инструмента.

Унификация подразумевает использование единого комплекта инструмента для производства труб различного сортамента - как по диаметру, так и по толщине стенки. Для обеспечения высокого качества продукции унифицированной группы необходимо выбрать из множества зависимостей распределения кривизны по клетям (существующих для каждого типоразмера), которая обеспечит благоприятное напряжённо-деформированное состояние как по длине очага деформации, так и по ширине заготовки в каждом деформируемом сечении.

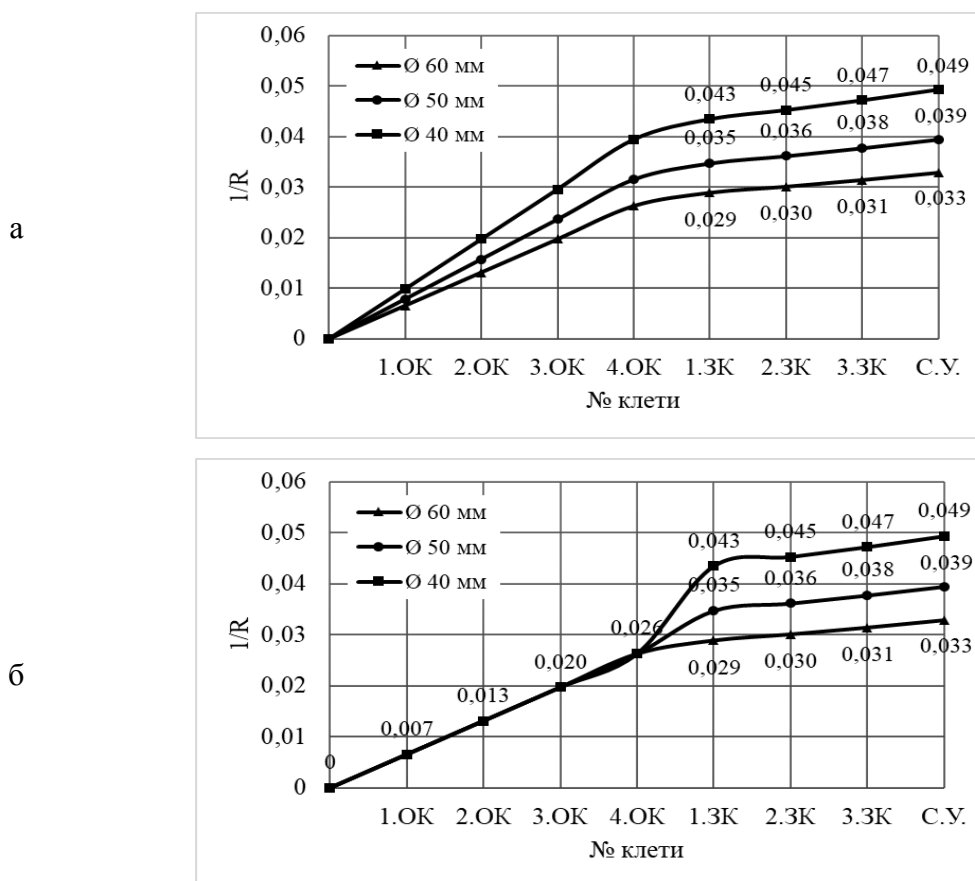
Для данного ТЭСА 10–60 установлены три унифицированные группы по диаметрам готовых труб: 1-я группа — Ø10–20 мм; 2-я группа — Ø20–40 мм; 3-я группа — Ø40–60 мм.

Для третьей унифицированной группы представлены расчётные данные. Они показали, что базовый комплект инструмента, разработанный под максимальный сортамент

трубы в группе (Ø40–60 мм), позволяет качественно сформировать трубную заготовку во всех деформационных сечениях калибров открытого типа.

Определение нижней границы унифицированной группы требует анализа деформационного состояния ТЗ на участке перехода от открытых калибров к первой клетке закрытого типа. Если при формоизменении наименьшего сортамента в группе возникают допустимые деформации, граница считается установленной. Если деформации ТЗ превышают допустимые значения, нижний диаметр группы увеличивают и повторяют проверочные расчёты до тех пор, пока не определится минимальный типоразмер трубы, соответствующий требованиям унифицированной группы.

На рисунке 2.11 представлены кривизны для третьей унифицированной группы ТЭСА 10–60. Было выполнено построение зависимостей кривизн ТЗ для третьей группы: для диаметров Ø60, Ø50 и Ø40 мм — рисунок 2.11а. Согласно графику, для производства трёх типоразмеров труб требуется три комплекта валкового инструмента (14 валков на один типоразмер). Общее количество валков составит  $14 \times 3 = 42$  валка.



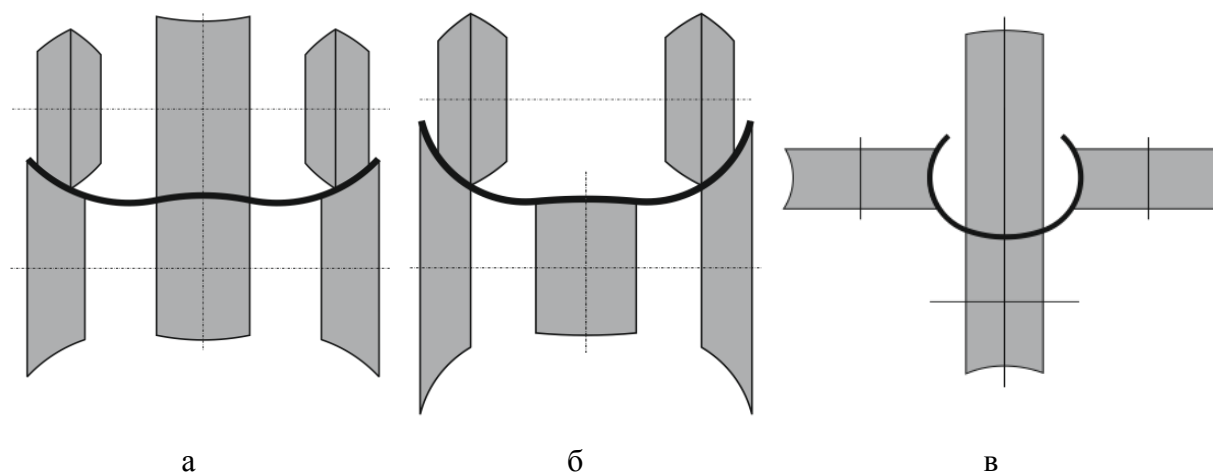
а – до унификации; б – после унификации, с базовой калибровкой открытого участка по максимальному диаметру – Ø60 мм

Рисунок 2.11 – Индивидуальные кривизны трубных заготовок унификационной группы

В унифицированном комплекте кривизна открытых калибров выбирается исходя из максимального типоразмера, а различия между комплектами сохраняются только на участке закрытых калибров (рисунок 2.11б). Количество валков в унифицированном комплекте рассчитывается как:  $4 \cdot 2 + 3 \cdot (3 \cdot 2) = 26$ .

Таким образом, количество валков сокращается на 16 штук, а время технологических перестроек уменьшается примерно на 15–20 часов в месяц.

Принципиальный валковый инструмент участка открытых калибров представлен рисунке 2.12.



а – первой формовочной клетки с периферийными парами и центральной парой валков для знакопеременной изгиба; б – второй формовочной клетки с периферийными парами и центральной частью без верхнего валка; в – третьей формовочной клетки, с вертикальными периферийными валками и центральной парой валков для реверса

Рисунок 2.12 – Валковый инструмент

Первый калибр (рисунок 2.12а) выполнен составным. Периферийные верхние валки имеют различные радиусы. На начальном этапе формовки контакт с заготовкой обеспечивается участком большего радиуса. Центральная часть профиля подвергается знакопеременному изгибу парой валков. Второй калибр (рисунок 2.12б) продолжает интенсивную формовку заготовки. Периферийные участки формируются валками первого калибра, но контакт осуществляется с зоной валков, имеющей меньший радиус. При этом интенсивность деформации центрального участка снижается. Третий калибр (рисунок 2.12в) также выполнен составным. Периферийные участки интенсивно изгибаются профилированными вертикальными валками. Реверс центральной части заготовки достигается за счет смены положения центральных валков первой клетки: верхний валок первой клетки становится нижним валком третьей клетки, а нижний валок первой клетки — верхним валком третьей клетки. Такая компоновка обеспечивает изменение направления деформации центральной зоны.

## 2.4 Выводы

1) Сравнительный анализ схем формоизменения ТЗ в традиционных и знакопеременных компоновках формовочных станов ТЭСА, показал, что существенное снижение распушинивания кромок профиля ТЗ под сварку характерны для компоновок со знакопеременным гибом.

В условиях ТЭСА 10–60 для трубы  $\text{Ø}50 \times 1,5$  мм определены:

– значения радиусов и углов формовки для рабочих сечений калибров формовочного стана;

– расчет продольных деформаций по фиксированным волокнам ТЗ по очагу деформаций показал, что значения продольных деформаций не превышают допустимые значения для данного типа размера трубы.

2) В результате анализа геометрических схем с ниспадающим осевым волокном ТЗ установлено, что оптимальная схема формовки, обеспечивающая минимальное растяжение кромок (0,088%), достигается при угле касательной  $\theta = 50^\circ$  и высоте подъема кромки  $H = -34,52$  мм. Данные параметры способствуют снижению деформации растяжения кромок ТЗ, что подтверждает устойчивость процесса формоизменения заготовки в клетях формовочного стана, минимизируя риск возникновения дефектов и обеспечивая стабильность формовки.

3) Проведенная модернизация формовочного стана ТЭСА 10–60 в НИТУ МИСИС затронула два основных направления, что позволило расширить его научно–исследовательские возможности.

На первом этапе была усовершенствована входная сторона стана: обновлена система подачи полосовых заготовок, что повысило точность их позиционирования и стабильность работы оборудования.

На втором этапе осуществлен переход на новый комплект инструмента. Были разработаны валковый инструмент, адаптированный под широкий диапазон размеров. Благодаря этому формовочный стан получил возможность формовать в диапазоне диаметров от 10 до 60 мм.

Формовочный стана ТЭСА 10–60 получил возможность формовать три унификационной группы труб:  $\text{Ø}10\text{--}20$ ,  $\text{Ø}20\text{--}40$ ,  $\text{Ø}40\text{--}60$  с одним комплектом валкового инструмента открытых калибров формовочных клеток.

### Глава 3 Экспериментальное исследование знакопеременной формовки на ТЭСА 10–60 НИТУ МИСИС

Целью экспериментальной формовки заготовки со знакопеременным изгибом является установление зависимости между амплитудой знакопеременной деформации и величиной остаточной кривизны профиля после упругого восстановления. Результаты работы позволят оптимизировать режимы формовки и прогнозировать геометрические отклонения изделий в условиях переменного нагружения.

Экспериментальное исследование формоизменения полосы со знакопеременным изгибом центральной части проводилось на опытном оборудовании ТЭСА 10–60 в НИТУ «МИСИС». В ходе эксперимента использовался стандартный комплект валкового инструмента с однорадиусной калибровкой для трубы  $\text{Ø}50 \times 1,5$  мм. Особенностью данного эксперимента является создание непрерывного формоизменения полосы, что характерно для реального процесса при производстве электросварных труб малого и среднего диаметров.

Применение знакопеременной нагрузки при формовке труб из полосы целесообразно, поскольку это снижает упругое разворачивание и обеспечивает устойчивое формоизменение ТЗ [69].

При изменении направлений нагрузок, сопровождающихся переходом от сжатия к растяжению (или наоборот), значительные пластические деформации возникают снова при меньшей нагрузке, а предел текучести при действии напряжений противоположного знака понижается. Это явление в физике твёрдого тела называется эффектом Баушингера [69–72].

Одним из проявлений эффекта Баушингера можно наблюдать визуально после знакопеременной формовки (нагрузки), например, в процессе гибки и последующего обратного разгибания стальной заготовки. После знакопеременной деформации наблюдается меньшее распружинивание по сравнению с однократным нагружением. На практике это проявляется в изменении геометрии профиля: после цикла «нагрузка–разгрузка–обратная нагрузка–разгрузка» профиль заготовки сохраняет заданную форму с меньшим отклонением от состояния под нагрузкой.

Природа механизма проявления эффекта Баушингера остаётся неоднозначной, и единого подхода к его объяснению на сегодняшний момент не существует из-за многофакторного влияния [73]. На микроуровне это перераспределение дислокаций и текстурные изменения [74–79], на макроуровне — неоднородность деформации и остаточные напряжения [75,80,81].

В главе 3 диссертационной работы представлены экспериментальные исследования, проведенные на опытном ТЭСА 10–60, в которых анализируется одно из следствий эффекта Баушингера — снижение упругого восстановления (распружинивания) стальной ТЗ после знакопеременной формовки при различных режимах.

### 3.1 Описание оборудования формовочного стана

Опытный ТЭСА 10–60 НИТУ МИСИС [65,82] – рисунок 3.1 обладает оборудованием для физического моделирования формовки сварных прямошовных труб [61,63,65,66,82]. Оснащен системой управления, включающую настройку деформационного инструмента рабочих клеток. Для определения энергосиловых параметров на клетях установлена тензометрическая система, позволяющая фиксировать усилия формовки по клетям и выводить данные на экране программе компьютера. Во время процесса формовки полосы, в программном обеспечении предусмотрена опция регистрации данных с построением графиков в Excel [65,82].

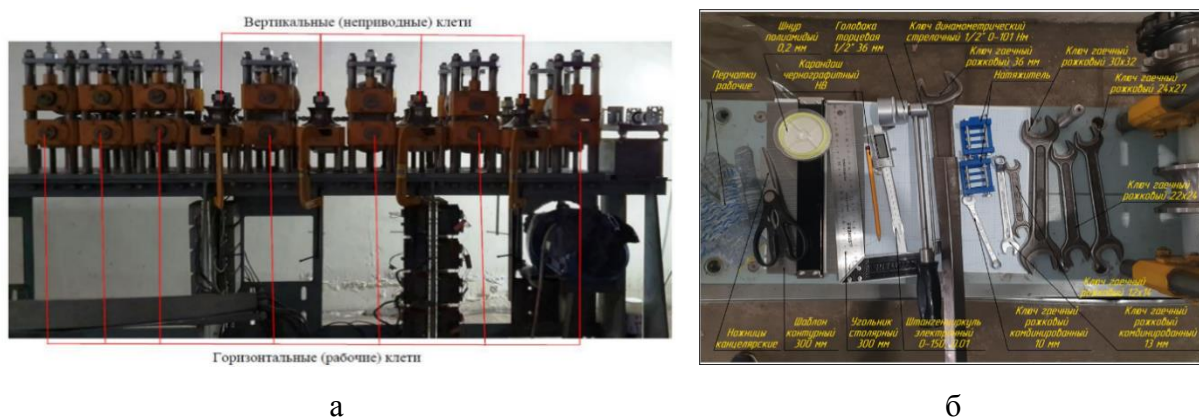


Рисунок 3.1 – Опытно ТЭСА 10–60 НИТУ МИСИС (а); инструмент для настройки деталей и узлов оборудования (б)

ТЭСА 10–60 содержит в своем составе формовочный, сварочный и калибровочный станы. Оборудование и инструмент позволяют изучать геометрические параметры ТЗ по всему очагу сворачивания для данного типоразмера трубы; и менять геометрические параметры очага сворачивания за счет увеличения или уменьшения длины очага, т. е. менять количество формовочных клеток [82].

При настройке рабочего инструмента рабочих клеток (рисунок 3.2) необходимо соблюдать ряд условий: выполнение соосности верхнего и нижнего валков, где смещение оси верхнего валка относительно оси нижнего валка равно нулю  $\delta=0$ ; углы поворота осей верхнего и нижнего валков равны нулю  $\gamma=0$ ; вертикальное расстояние до вала относительно левой стойки  $A_1$  равно расстоянию до вала правой стойки  $A_2$  ( $A_1 = A_2$ ,  $A_3 = A_4$ );



горизонтальные расстояния до осей верхнего и нижнего валов идентичны ( $B_1 = B_2 = B_3 = B_4$ ) [61,82], представлен на рисунке 3.2).

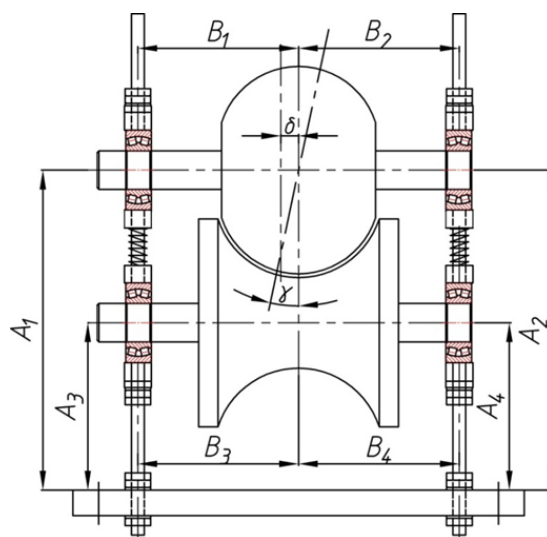


Рисунок 3.2 – Параметры настройки формовочной клетки

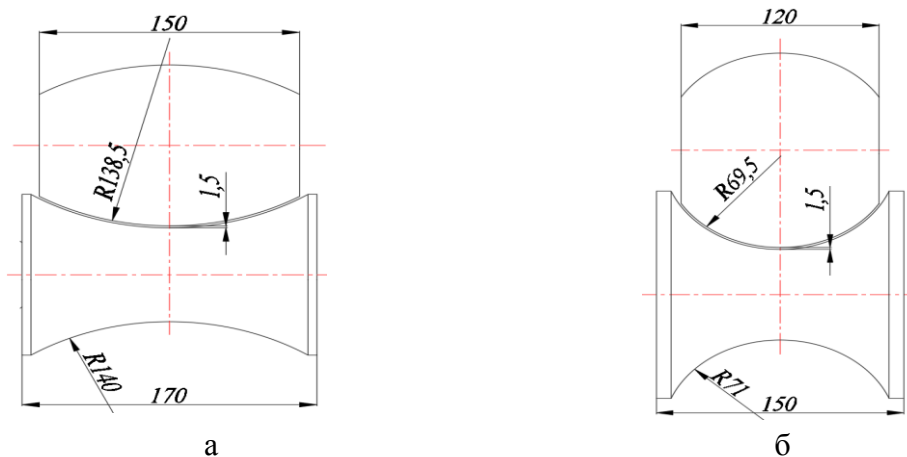
### 3.2 Порядок проведения экспериментальной знакопеременной формовки на участке открытых клетях формовочного стана

Задача эксперимента заключалась в анализе геометрических параметров ТЗ после формовки по двум схемам: по традиционной схеме на образцах 1.Т, 2.Т – когда исходная плоская заготовка формовалась в калибрах, и знакопеременной схеме на образцах 1.З/П, 2.З/П – когда исходная трубная имела предварительно изогнутый профиль.

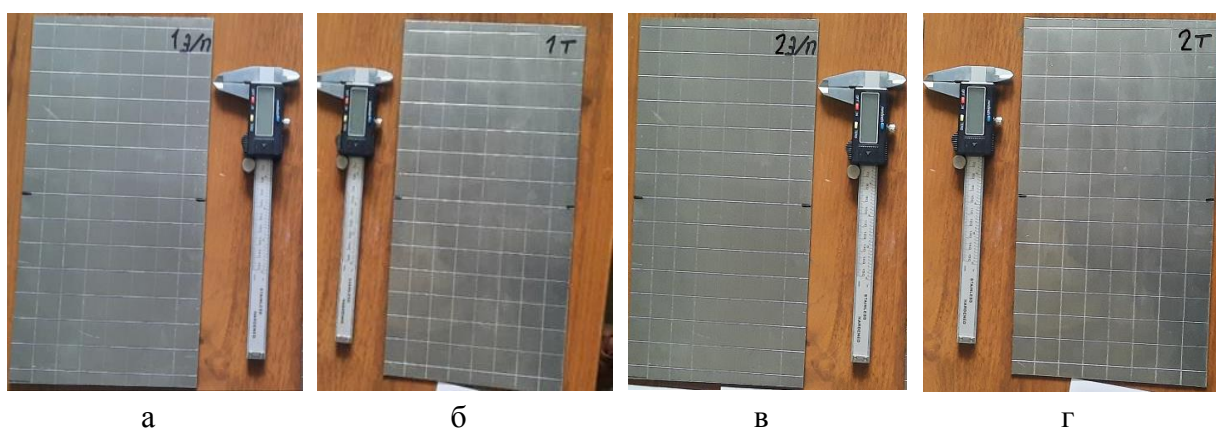
Эксперимент по исследованию процесса традиционной схемы формоизменения заготовки и знакопеременной схемы формоизменения ТЗ осуществлялся в первых двух калибрах (клетях) формовочного стана ТЭСА 10–60.

Геометрические параметры калибров первой и второй клетки представлены на рисунке 3.3.

Исходными образцами являлись четыре заготовки размером  $300 \times 160 \times 1,5$  мм (рисунок 3.4) из стали марки Ст3. Для отслеживания симметричности процесса экспериментальной формовки заготовок и последующего определения геометрических параметров (радиусы, ширина, высота) сформованного образца на каждую заготовку с помощью лазерного станка нанесена сетка с ячейками размером  $20 \times 20$  мм.



(а) калибр в первой клети; (б) калибр второй клети  
Рисунок 3.3 – Геометрические параметры калибров



а – заготовка 1.Т; б – заготовка 1.3/П; в – заготовка 2.Т; г – заготовка 2.3/Т  
Рисунок 3.4 – Исходные полосовые заготовки

Формовка ТЗ проводится в области упругопластических деформаций [28], поэтому при распределении деформаций по толщине полосы присутствуют зоны упругих и пластических деформаций, при этом в начале процесса сворачивания ТЗ зоны упругих деформаций превышают протяженность зон пластических деформаций, далее упругая зона уменьшается, а пластическая зона увеличивается. Расчетные деформационные параметры заготовки при изгибе определялись по следующим формулам [61]:

Деформация текучести:

$$\varepsilon_{\text{Назг}}^{\text{упр}} = \frac{\sigma_T}{E}, \quad (3.1)$$

где  $E = 200\,000$  МПа – модуль упругости;

$\sigma_T = 255$  МПа – предел текучести стали Ст 3.

Деформация на поверхности листа «+» – растяжения; «-» – сжатие:

$$\varepsilon_{\text{Назг}}^{\text{пов}} = \frac{S_T}{2 \cdot R_n}, \quad (3.2)$$

где  $S_T = 1,5$  – толщина стенки полосы, мм;

Граница упругой зоны:

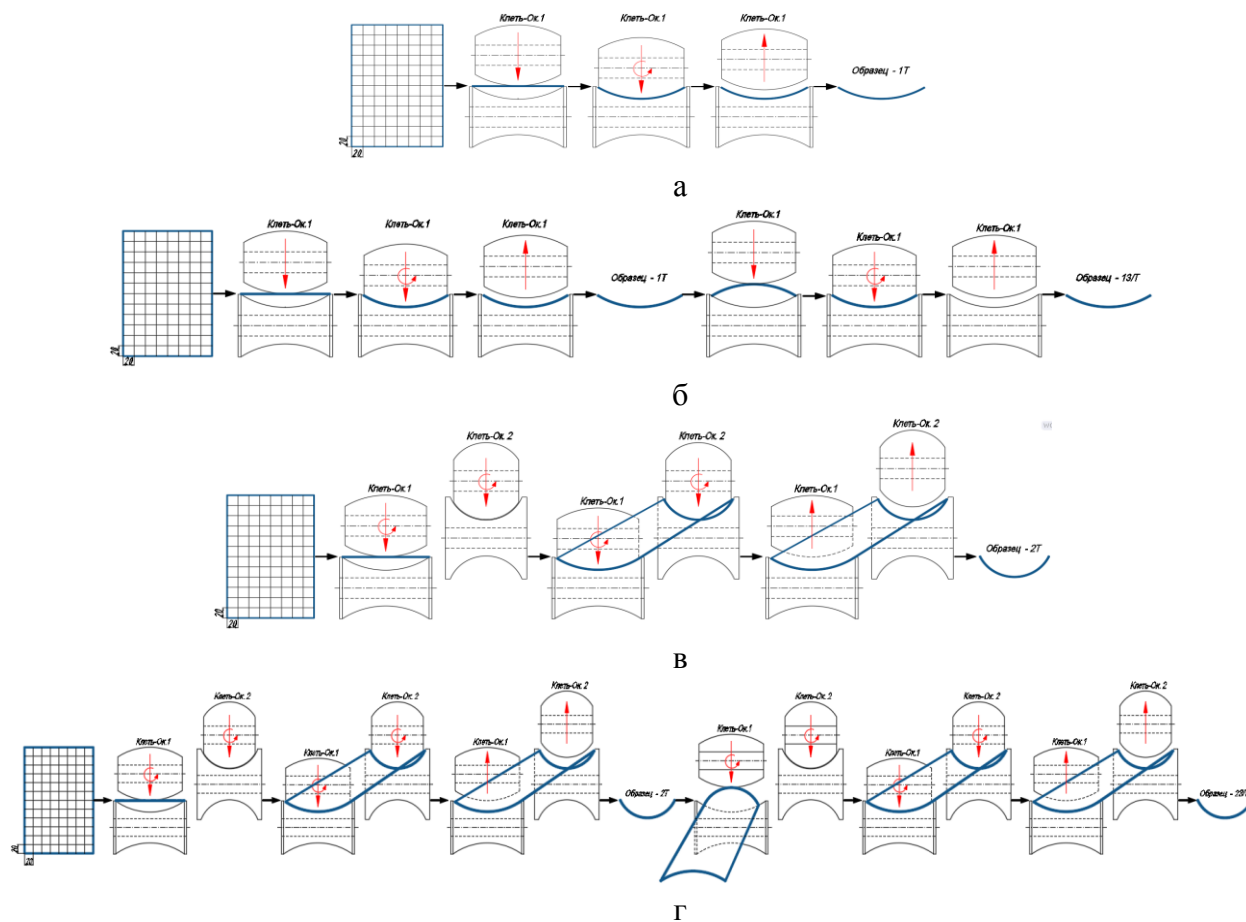
$$S_{\text{упр}} = \varepsilon_{\text{назг}}^{\text{упр}} \cdot R_{\text{н}}, \quad (3.3)$$

Расчетные деформационные параметры под нагрузкой в сечении калибров клеток представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Расчетные деформационные параметры заготовки под нагрузкой в сечении калибров клеток 1. ОК и 2. ОК

Клеть	$R_{\text{н}}$ , мм	$\varepsilon_{\text{упр}}$	$\varepsilon_{\text{пов}}$	$S_{\text{упр}}$ , мм
1.ОК	140	0,17%	0,54%	0,23
2.ОК	70	0,17%	1,071%	0,12

Исследование формоизменения трубных заготовок проводили по следующему четырем маршрутам – рисунок 3.5.



а, в – традиционная формовка заготовки в первой клетке – образец 1.Т и во второй клетке – образец 2.Т; б, г – знакопеременная формовка заготовки в первой клетке – образец 1.3/П и во второй клетке – образец 2.3/П

Рисунок 3.5 – Маршруты эксперимента по формоизменению трубных заготовок

Первый маршрут эксперимента – образец 1.Т– рисунок 3.5а заключался в следующем: в настройке калибра первой клетки (1.ОК) между нижним и верхними валками. Далее осуществлялась традиционная формовка с вращением валков, в где в осевой плоскости калибра заготовка приобретала профиль равным профилям валков, соответственно наружная поверхность заготовки соответствовала радиусу  $R_n=140,0$  мм угол  $\varphi_1=30^\circ$ , а внутренняя поверхность заготовки соответствовала радиусу  $R_v = 138,5$  мм. Процесс формовки останавливали, когда заготовка выходила из калибра на длину 150 мм. Затем разводили валки и извлекали сформованную заготовку.

Второй маршрут эксперимента – образец 1.3/П– рисунок 3.5б проходил следующим образом: начало второго маршрута соответствует первому маршруту, получали изогнутую исходную заготовку. Далее заготовку поворачивали кромками вниз на 180 градусов и осуществляли знакопеременную формовку в первой клетки. Также процесс формовки останавливали после выхода заготовки из калибра на длину 150 мм. Далее разводили валки, извлекали сворованную заготовку.

Третий маршрут эксперимента – образец 2.Т– рисунок 3.5в заключался в следующем: в настройке калибров первой (1.ОК) и второй (2.ОК) клетях. Расстояние между нижним и верхним валками соответствовало толщине образца. Расположение калибров, настраивали в горизонтальной плоскости относительно станины стана. Далее осуществлялась традиционная формовка с вращением валков, где в осевой плоскости калибров заготовка приобретала профиль равным профилям валков, соответственно в первой клетки наружная поверхность заготовки соответствовала радиусу  $R_n=140,0$  мм угол  $\varphi_1=30^\circ$ , а внутренняя поверхность заготовки соответствовала радиусу  $R_v = 138,5$  мм, во второй клетки наружная поверхность заготовки соответствовала радиусу  $R_n=70,0$  мм угол  $\varphi_1=74^\circ$ , а внутренняя поверхность заготовки соответствовала радиусу  $R_v = 68,5$  мм. В первой клетки заготовка формовалась на полную длину равной 300 мм. Во второй клетки процесс формовки останавливали, когда заготовка выходила на длину 150 мм. Далее разводили валки второй клетки и извлекали сформованную заготовку.

Четвёртый маршрут эксперимента – образец 2.3/П – рисунок 3.5г включал в себя повторение третьего маршрута, после чего получали исходную сформованную заготовку. Далее заготовку переворачивали на 180 градусов и задавали в настроенные калибры клеток. Из-за большой кривизны заготовки, в начале калибр первой клетки разводили на расстояние равным высоте профиля заготовки, далее устанавливали заготовку в калибре и прижимали валками. После осуществляли знакопеременную формовки в двух формовочных клетях.

Процесс формовки останавливали во второй клетке, когда заготовка выходила на длину 150 мм. Далее разводили валки второй клетки и извлекали сформованную заготовку.

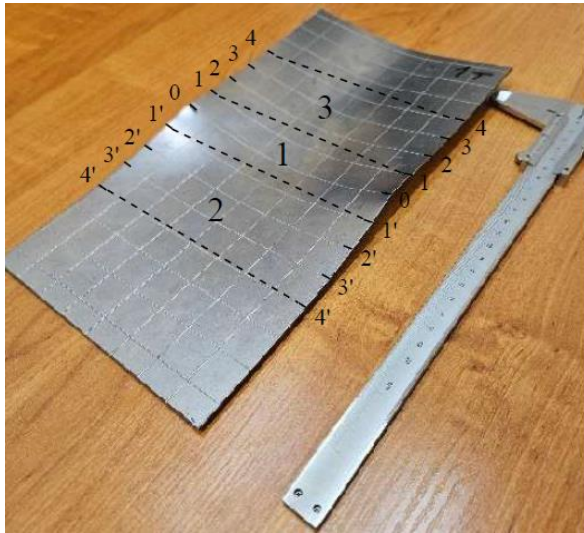
Фрагменты выполнения эксперимента по формовке ТЗ по традиционной схеме и знакопеременным схемам представлены на рисунке 3.6.



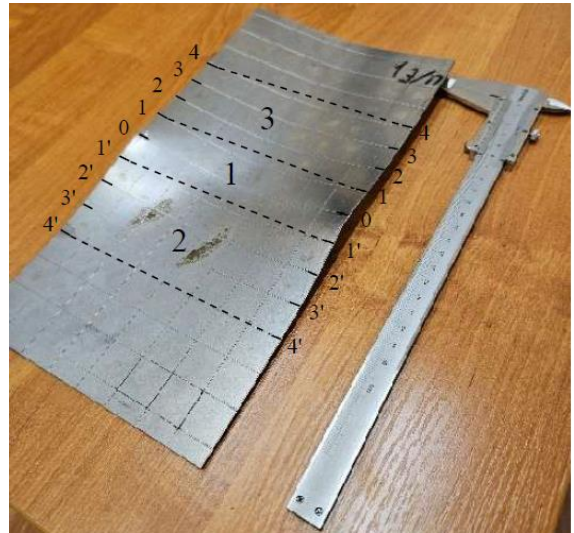
Рисунок 3.6 – Фрагменты выполнения эксперимента

Процесс формовки ТЗ проходил стабильно с полным контактом по наружной и внутренней поверхностям заготовки с валковым инструментом. Дефекты в виде асимметрии и гофров на кромках отсутствуют.

Образцы, сформованные по маршрутам (рисунок 3.5) представлены на рисунке 3.7.



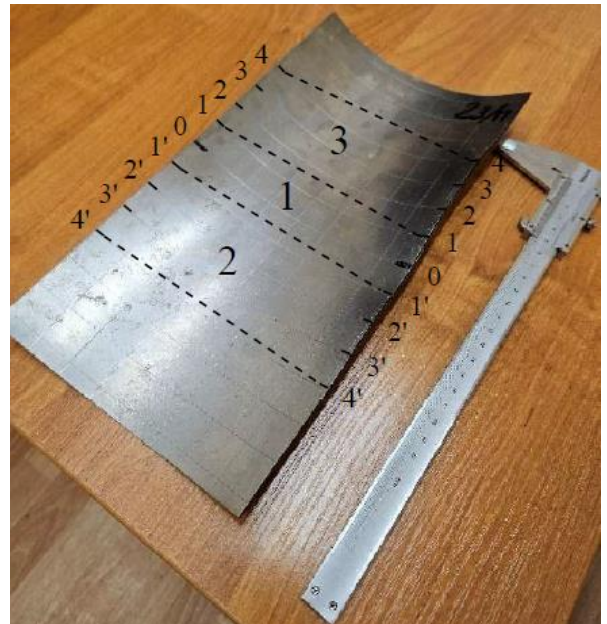
а



б



в



г

а – образец 1.Т; б – образец 1.3/П; в – образец 2.Т; г – образец 2.3/П

Рисунок 3.7 – Сформованные образцы

После формовки по каждому из маршрутов сформованные образцы были обработаны в девяти сечениях. Все образцы имеют характерные зоны формоизменения при непрерывной формовке [61]: в интервале сечений 4'– 4' и 1'– 1' – контактная зона деформации (1), в интервале сечений 1'–1' и 1–1 – внеконтактная зона деформации (2), в интервале сечений 1–1 и 4–4 – зона распружинивания (3).

Далее проводились измерения ширины (В) и высоты (h) полученных образцов в заданных сечениях. Затем рассчитывались радиусы кривизны (R) и величина, обратная

радиусу ( $1/R$ ), сформированных образцов, а также рассчитывалось распределение упругой и пластической зон по толщине заготовки.

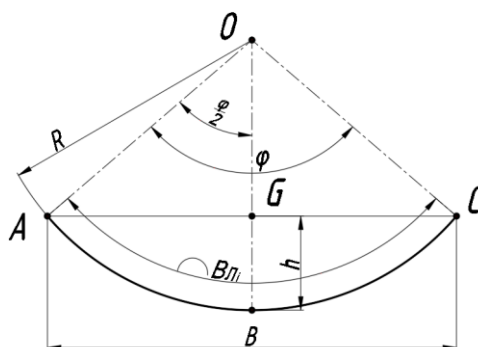
### 3.3 Обработка экспериментальных данных

Основные геометрические размеры заготовки после эксперимента измерялись по 9 сечениям, расположенным на расстоянии 20 мм друг от друга.

На заготовке имеются характерные участки для непрерывной формовки:

- участок в неконтактной деформации: сечения ( $4'-4'÷1'-1'$ );
- участок нагрузки: сечения (0-0);
- участок распружинивания: ( $1-1÷4-4$ ).

Измерение геометрических параметров полученных образцов по сечениям проводился по схеме – рисунок 3.8.



$R_n$  – радиус дуги по нижнего поверхности;  $B$  – длина хорды;  $h$  – высота дуги;  $\varphi$  – угол;  
 $B_{ли}$  – длина дуги

Рисунок 3.8 – Схема измерения геометрических параметров полученных образцов

На рисунке 3.8 рассмотрим треугольник  $\Delta OAG$  и радиус дуги ( $R$ ) определяется по следующей формуле:  $R^2 = AG^2 + OG^2$ ;  $AG = \frac{B}{2}$ ; и  $OG = OB - GB = R - h$ ;

$$R^2 = \left(\frac{B}{2}\right)^2 + (R - h)^2;$$

$$R^2 = \left(\frac{B}{2}\right)^2 + R^2 - 2 \cdot R \cdot h + h^2;$$

$$2 \cdot R \cdot h = h^2 + \left(\frac{B}{2}\right)^2;$$

$$R = \frac{h^2 + \left(\frac{B}{2}\right)^2}{2 \cdot h}, \quad (3.4)$$

Угол профиля ТЗ определяется по формуле:

$$\varphi_i = \frac{B_{ли}}{R_i}, \quad (3.5)$$

где  $B_{ли}$  – длина дуги центральный или периферийный участок штрипса в клетки, мм  
 Результат измерений ширин и высот образцов 1.Т и 1.3/П приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Результат измерения ширин и высот образцов ТЗ 1.Т и 1.3/П

Сечение	4'-4'	3'-3'	2'-2'	1'-1'	0-0	1-1	2-2	3-3	4-4
Образец	1.Т								
В, мм	159,8	159,6	159	158	156,3	157,5	158,4	158,9	159,1
h, мм	7,34	7,70	10,20	14,00	17,40	17,00	16,80	16,70	16,50
Образец	1.3/П								
В, мм	159,7	159,4	158,6	157,3	156,3	157,2	158	158,3	158,5
h, мм	9,60	10,55	12,85	16,10	17,85	17,80	17,70	17,60	17,58

Результат измерений ширин и высот образцов 2.Т и 2.3/П приведены в таблице. 3.3.

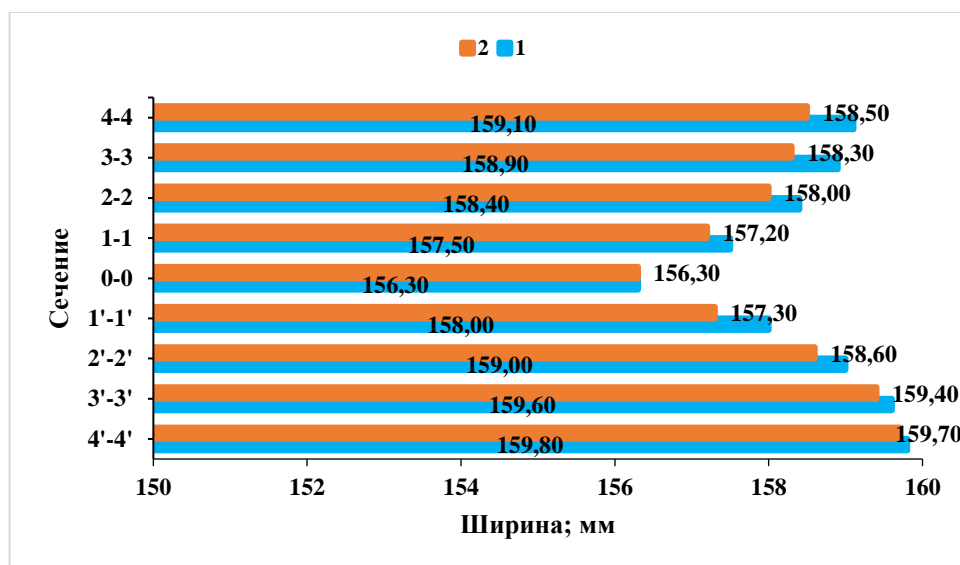
Таблица 3.3 – Результат измерения ширин и высот образцов 2.Т и 2.3/П

Сечение	4'-4'	3'-3'	2'-2'	1'-1'	0-0	1-1	2-2	3-3	4-4
Образец	2.Т								
В, мм	159,4	158,7	156,9	155,1	154,2	153,6	153	152,5	152
h, мм	10,40	12,65	17,10	19,70	21,05	22,45	23,35	24,20	24,75
Образец	2.3/П								
В, мм	155,2	154,4	153,3	153,2	152,9	151,3	150	149	148,4
h, мм	19,70	21,00	22,45	22,75	23,65	25,00	26,35	27,55	28,45

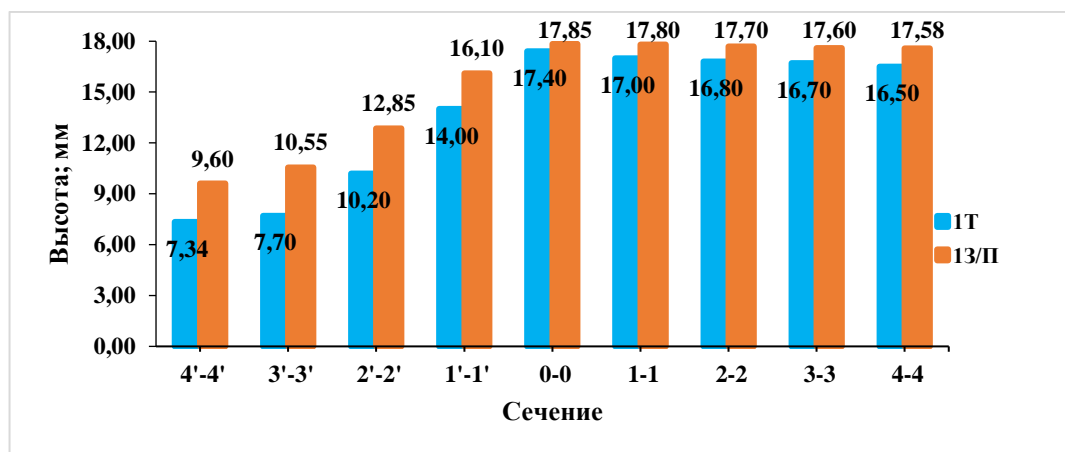
Графики изменения ширин и высот (рисунок 3.9) по сечениям вдоль трубных заготовок 1.Т и 1.3/П позволяют оценить характер формоизменения габаритов ТЗ по оси Y и по оси Z соответственно.

На графиках 3.9 видно, что на трубных заготовках 1.Т и 1.3/П наблюдается идентичный характер изменения как по ширине, так и по высоте заготовки. В сечении заготовки 0-0, которое соответствует плоскости калибра ширина и высота, соответственно наименьшая и наибольшая относительно других участков заготовки. После калибра профиль ТЗ распруживается, таким образом ширина увеличивается, а высота уменьшается. На участке ТЗ перед калибром также имеется кривизна, на этом участке наблюдается в неконтактная деформация. Ширина и высота на в неконтактной участке ТЗ больше и меньше, соответственно, чем на участке нагрузки и на участке распруживания.





а



б

а – ширина; б – высота

Рисунок 3.9 – Графики сравнения образцов 1.Т - 1 и 1.3/П – 2

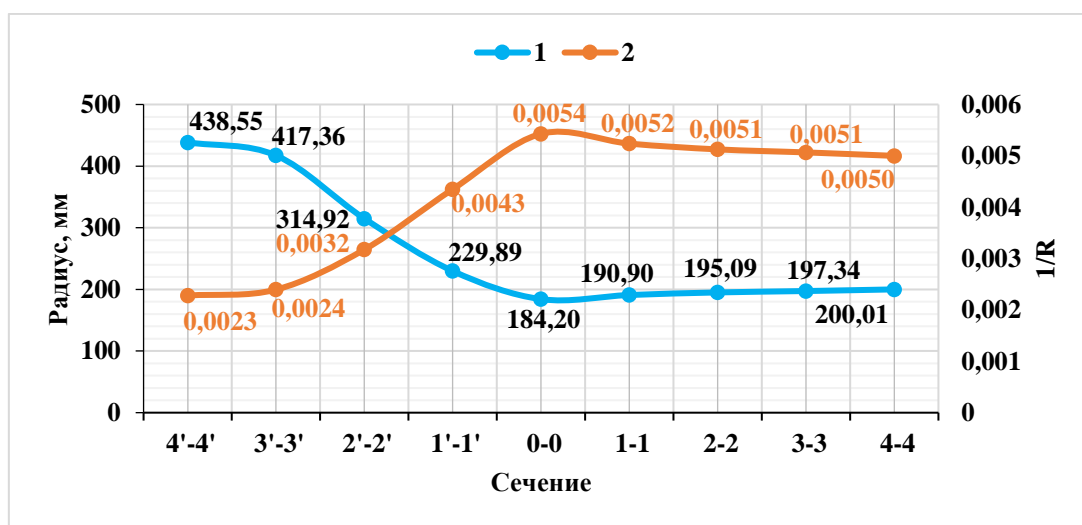
Таким образом трубная заготовка 1.3/П имеет меньшие габариты по ширине и большие габариты по высоте, это подтверждает факт [61], что формовка со знакопеременным изгибом способствует меньшему распруживанию профиля заготовки.

Далее на основе экспериментальных данных, представленных в таблице 3.2 и 3.3 и на рисунке 3.8 для заготовок 1.Т и 1.3/П рассчитаны радиусы и кривизны ТЗ – таблица 3.4.

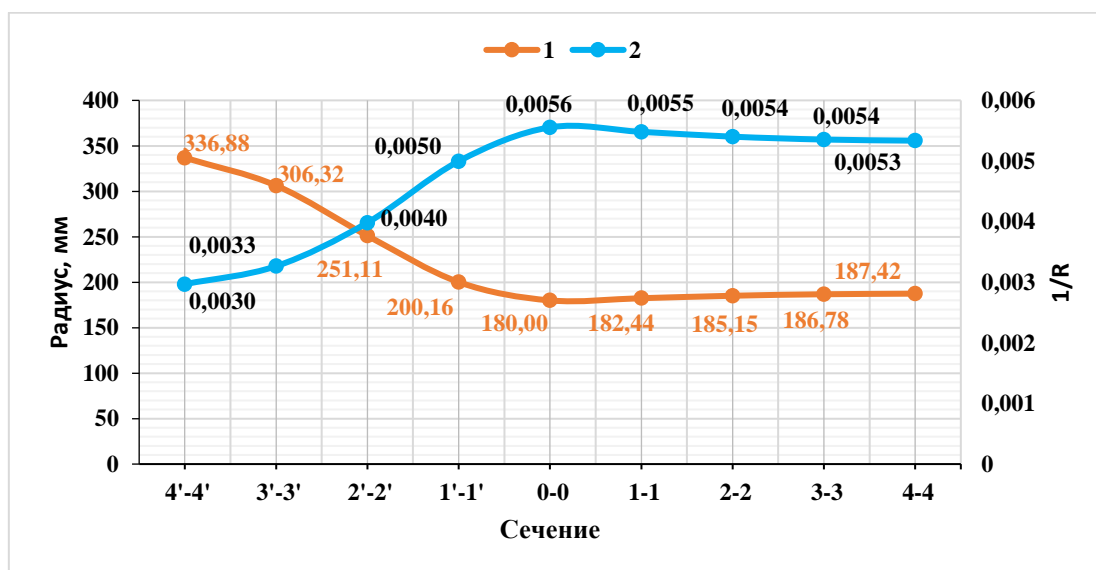
Таблица 3.4 – Кривизны и радиусы профиля трубных заготовок 1.Т и 1.3/П

Сечение	4'-4'	3'-3'	2'-2'	1'-1'	0-0	1-1	2-2	3-3	4-4
Образец	1.Т								
R <sub>п</sub> , мм	438,55	417,36	314,92	229,89	184,20	190,90	195,09	197,34	200,01
1/R <sub>п</sub> , мм	0,0023	0,0024	0,0032	0,0043	0,0054	0,0052	0,0051	0,0051	0,0050
Образец	1.3/П								
R <sub>п</sub> , мм	336,88	306,32	251,11	200,16	180,00	182,44	185,15	186,78	187,42
1/R <sub>п</sub> , мм	0,0030	0,0033	0,0040	0,0050	0,0056	0,0055	0,0054	0,0054	0,0053

По значениям из таблицы 3.4 построены графики распределения радиусов и кривизны для образцов 1.Т и 1.3/П (рисунок 3.10).



а



б

а – образец 1.Т; б – образец 1.3/П

Рисунок 3.10 – Графики распределения радиусов (1) и кривизна (2) по длине образца

Из графиков видно, что радиус трубных заготовок 1.Т и 1.3/П по направлению формовки постепенно уменьшаются, а кривизна обратно пропорционально увеличивается.

Радиусы и кривизны, которые определяют геометрические параметры формоизменение профиля ТЗ 1.Т находятся в следующих диапазонах:  $R_{\text{п}} = 438,55 \div 200,01$  мм,  $1/R_{\text{п}} = 0,0023 \div 0,0050$ .

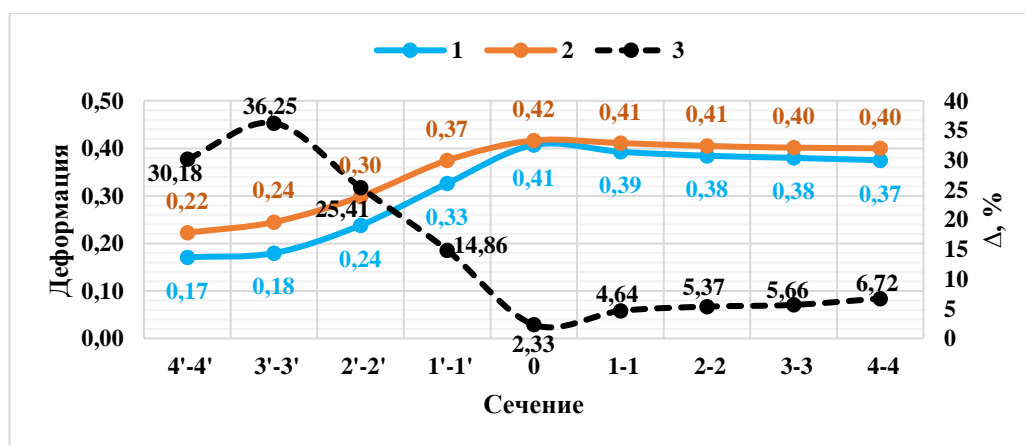
Радиусы и кривизны, профиля ТЗ 1.3/П находятся в диапазонах:  $R_{\text{п}} = 336,88 \div 187,42$  мм,  $1/R_{\text{п}} = 0,0030 \div 0,0053$ .

Результат расчета поперечных деформаций по сечения и деформационных зон по толщине у образцов 1.Т и 1.3/П: упругая и пластическая зона, приведены в таблице 3.5

Таблица 3.7 – Результат поперечных деформаций по сечения и деформационных зон по толщине у образцов 1.Т и 1.3/П.

Сечение	4'-4'	3'-3'	2'-2'	1'-1'	0-0	1-1	2-2	3-3	4-4
Образец	1.Т								
$\epsilon_{\text{пов}}, \%$	0,17	0,18	0,24	0,33	0,41	0,39	0,38	0,38	0,37
$S_{\text{упр}}, \text{мм}$	0,72	0,69	0,52	0,38	0,30	0,31	0,32	0,33	0,33
$S_{\text{пл}}, \text{мм}$	0,03	0,06	0,23	0,37	0,45	0,44	0,43	0,42	0,42
Образец	1.3/П								
$\epsilon_{\text{пов}}, \%$	0,22	0,24	0,30	0,37	0,42	0,41	0,41	0,40	0,40
$S_{\text{упр}}, \text{мм}$	0,56	0,51	0,41	0,33	0,30	0,30	0,31	0,31	0,31
$S_{\text{пл}}, \text{мм}$	0,19	0,24	0,34	0,42	0,45	0,45	0,44	0,44	0,44

Распределение поперечной деформации по длине образцов 1.Т и 1.3/П представлено на рисунке 3.11.



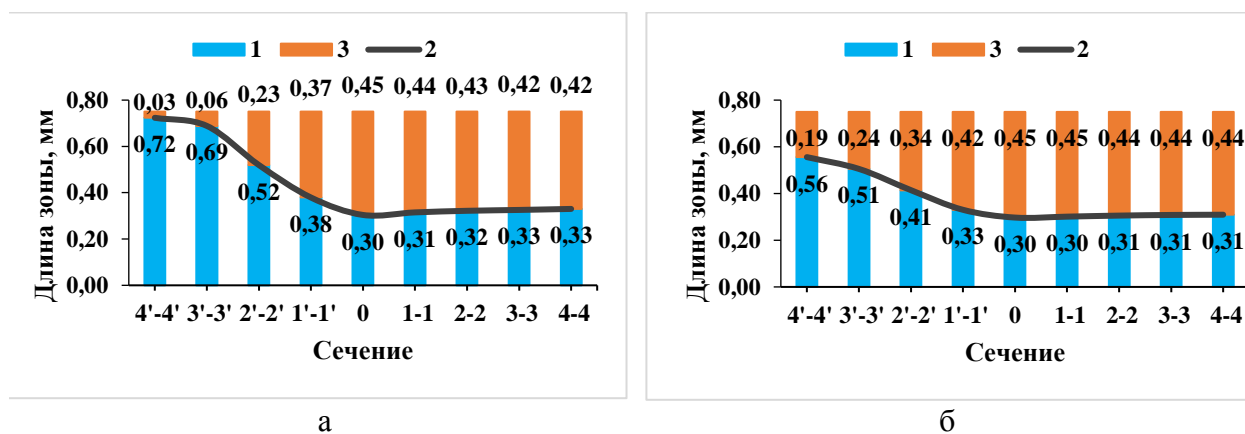
1 – поперечная деформация образца 1.Т; 2 – деформация образца 1.3/П; 3 – разность деформаций

Рисунок 3.11 – Распределение поперечной деформации по сечениям

Сравнение двух образцов 1.Т и 1.П/З показало, что радиусы профиля образца 1.Т по всей длине больше, чем радиусы образца 1.3/П. Значительное увеличение радиуса профиля образца 1.П/З наблюдается на участке внеконтактной деформации (сечения  $4'-4' \div 3'-3'$ ) радиусы образца 1.П/З больше на  $14,86 \div 36,25$  % (по радиусу). На участках нагрузки (сечение 0-0) и распружинивания (сечения  $4-4 \div 1-1$ ) поперечной деформации образца 1.П/З больше на  $2,33 \div 6,72$  %.

Таким образом, амплитуда знакопеременного изгиба от профиля заготовки с начальным радиусом  $R=184,20$  мм и до знакопеременной формовки ТЗ в калибре  $R=140$  мм показывает, что распружинивание ТЗ увеличивается на  $2,33 \div 6,72$  %.

Распределение упругой (1) и пластической (3) зон на половине толщины образца 1.Т и 1.3/П (распределение протяженности зон на второй половине идентично) на рисунке 3.12.



а – образец 1.Т; б – образец 1.3/П

Рисунок 3.12 – Распределение упругой (1) и пластической (3) зон на половине толщины образца; граница между зонами (2)

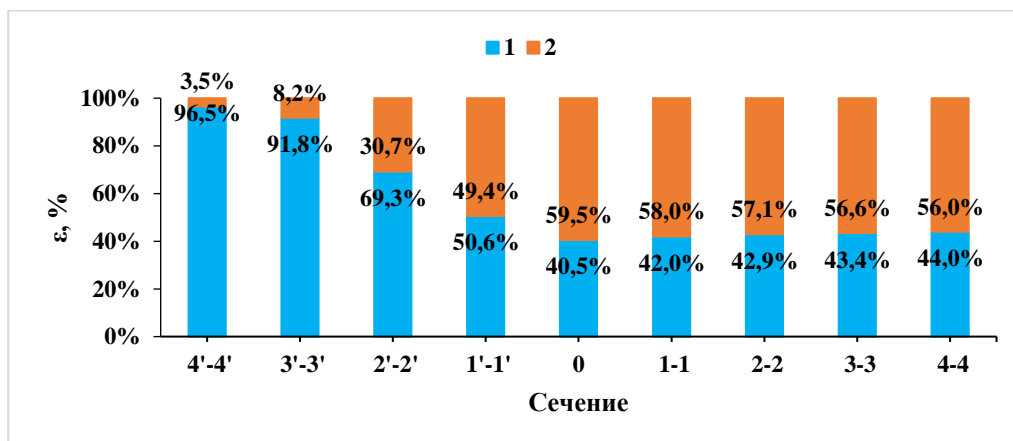
Знакопеременная формовка показывает, влияет на вне контактную деформацию ТЗ, которая находится перед калибром.

На графике (рисунок 3.12а) – видно, что в сечениях ( $4'-4' \div 3'-3'$ ) упругая деформация занимает более 91,82 % толщины заготовки. В сечениях ( $2'-2' \div 1'-1'$ ) упругая зона снижается в среднем до 50,58 %, но также остается больше половины толщины ТЗ, что способствует большему распружиниванию после выхода ТЗ после калибра.

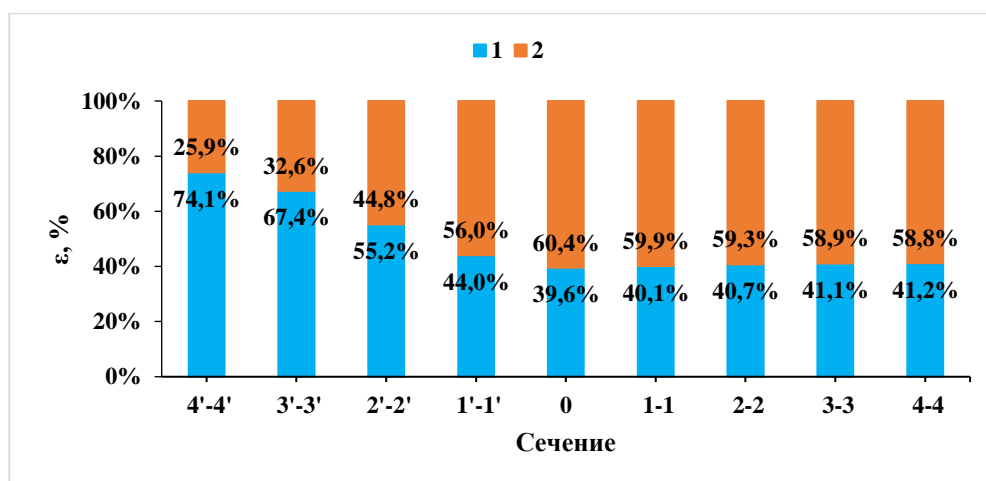
На рисунке 3.12б на участке входа в калибр упругая зона в сечениях ( $4'-4' \div 3'-3'$ ) ниже, чем на рисунке 3.12а на 22,37 %, что составляет 74,11 % от толщины заготовки.

Таким образом на выходе упругая составляющая образца 1.3/П меньше на  $2,77$  %  $\div 8,05$  %, чем у образца 1.Т, а среднее упругой составляющей по всей длине заготовки ниже на 8,60 %.

Распределение в процентах упругой (1) пластической (2) зон на половине толщины образцов 1.Т и 1.3/П представлено на рисунке 3.13.



а



б

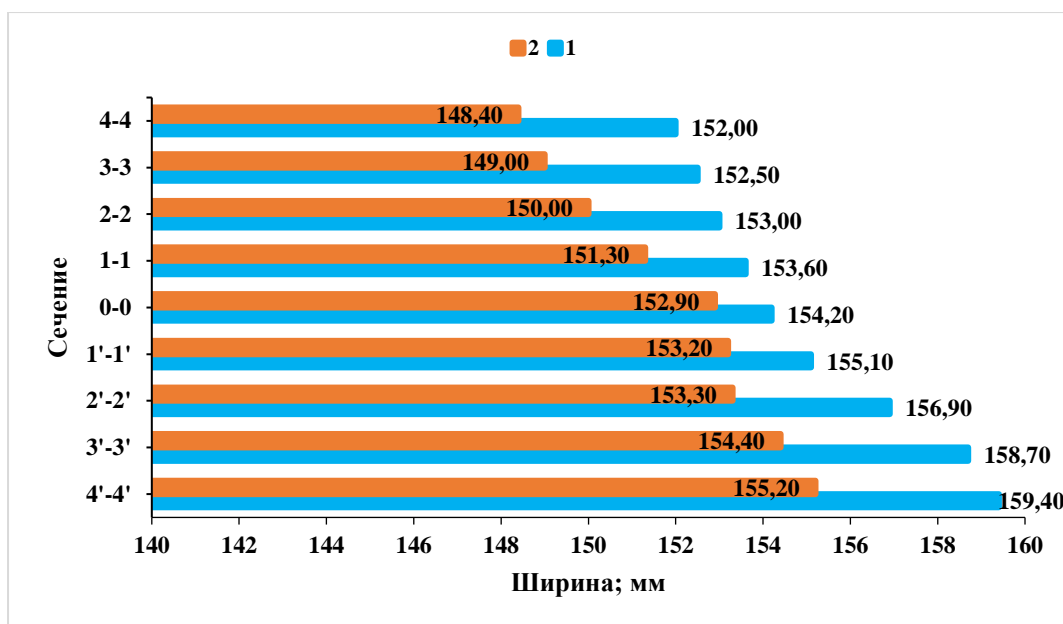
а - образец 1.Т; б - образец 1.3/П

Рисунок 3.13 – Распределение в процентах упругой (1) пластической (2) зон на половине толщины образцов

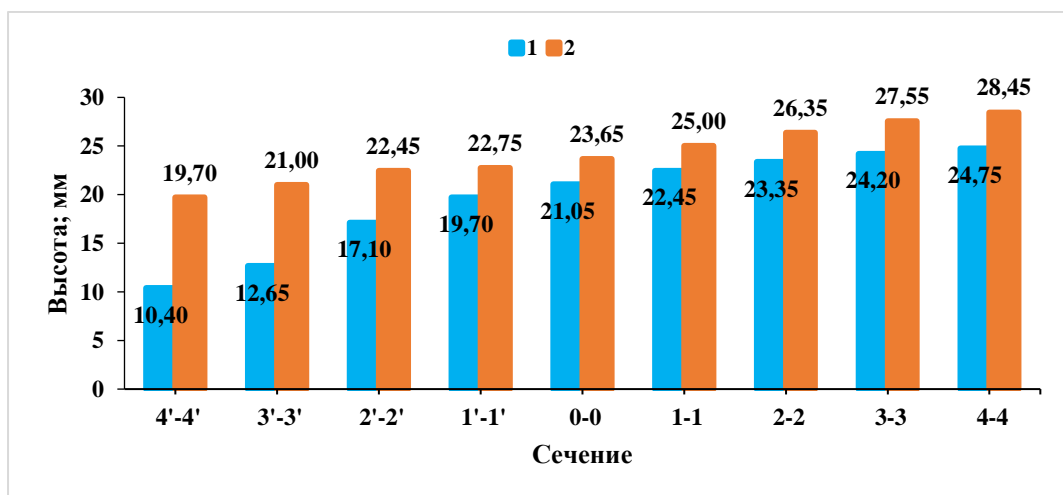
Для анализа влияния амплитуды знакопеременной формовки проведен эксперимент во второй формовочной клетке с радиусом калибра 71 мм.

Маршрут эксперимента для заготовок 2.Т и 2.3/П представлен на рисунках 3.5в, и 3.5г.

Графики изменения ширины и высоты (рисунок 3.14) по сечениям вдоль трубных заготовок 2.Т и 2.3/П позволяют оценить характер деформации габаритов ТЗ по оси Y и по оси Z соответственно.



а



б

а – ширина; б - высота

Рисунок 3.14 – Графики сравнения образцов 2.Т - 1 и 2.З/П – 2

Из графиков, представленных на рисунках 3.14 наблюдается общая закономерность, что заготовки, сформованные со знакопеременным изгибом, имеют наибольшую остаточную кривизну профиля ТЗ, чем заготовки, сформованные по традиционной схеме.

В отличие от заготовок сформованных только в одной клетке, в заготовках сформованных в двух последовательно расположенных клетках ширина и высота профиля изменяются равномерно от наибольшей ширины к меньшей и от наименьшей высоты к большей.

Ширина образцов характеризуется уменьшением величины по направлению формовки, а высота образцов имеет характер возрастания.

Так для образца 2.Т наибольшая ширина составляет  $b = 159,4$  мм в начале образца, наименьшая ширина  $b = 152,0$  мм в конце образца, высота в начале образца составляет  $h = 10,40$  мм, а в конце образца  $h = 24,75$  мм.

Для образца 2.3/П наибольшая ширина составляет  $b = 155,20$  мм в начале образца, наименьшая ширина  $b = 148,4,0$  мм в конце образца, высота в начале образца составляет  $h = 19,70$  мм, а в конце образца  $h = 28,45$  мм.

Образец 2.3/П имеет меньшие габариты по ширине, чем образец 2.Т, и большие габариты по высоте.

Далее на основе графиков, представленных на рисунке 3.14 по сечениям заготовок 2.Т и 2.3/П рассчитаны кривизны ТЗ, которые соответствуют приведенным радиусам – таблица 3.6.

Таблица 3.6 – Кривизны и радиусы профиля трубных заготовок 2.Т и 2.3/П

Сечение	4'-4'	3'-3'	2'-2'	1'-1'	0-0	1-1	2-2	3-3	4-4
Образец	2.Т								
$R_n$ , мм	310,59	255,20	188,50	162,49	151,72	142,59	136,99	132,23	129,06
$1/R_n$	0,0032	0,0039	0,0053	0,0062	0,0066	0,0070	0,0073	0,0076	0,0077
Образец	2.3/П								
$R_n$ , мм	162,69	152,40	142,08	140,33	135,39	126,96	119,91	114,51	110,98
$1/R_n$	0,0061	0,0066	0,0070	0,0071	0,0074	0,0079	0,0083	0,0087	0,0090

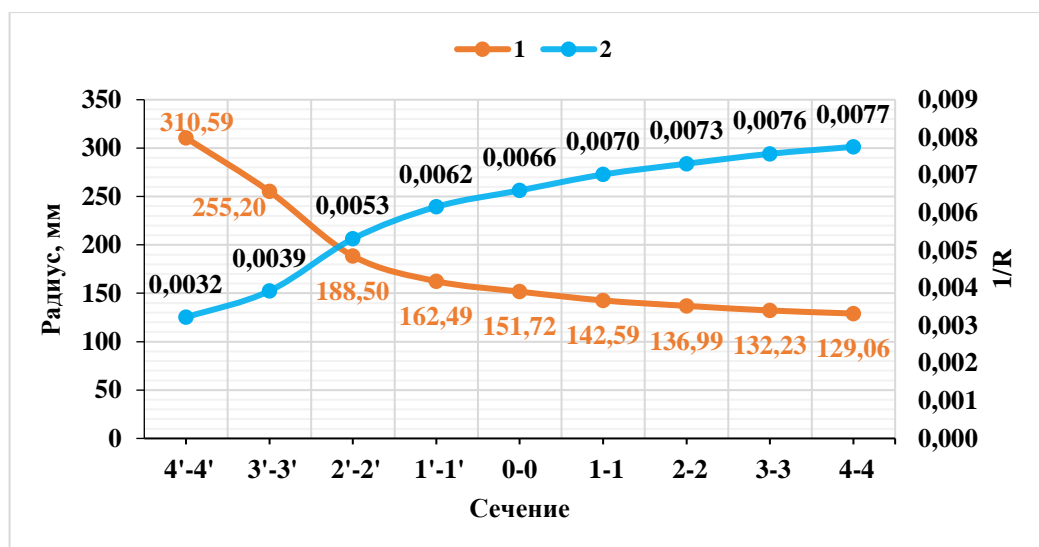
По табличным данным таблицы 3.6 построены графики распределения радиусов и кривизна для образцов 2.Т и 2.3/П - рисунок 3.15.

Из графиков – рисунок 3.15 видно, что радиус трубных заготовок 2.Т и 2.П/3 по направлению формовки постепенно уменьшаются, а кривизна обратно пропорционально увеличивается.

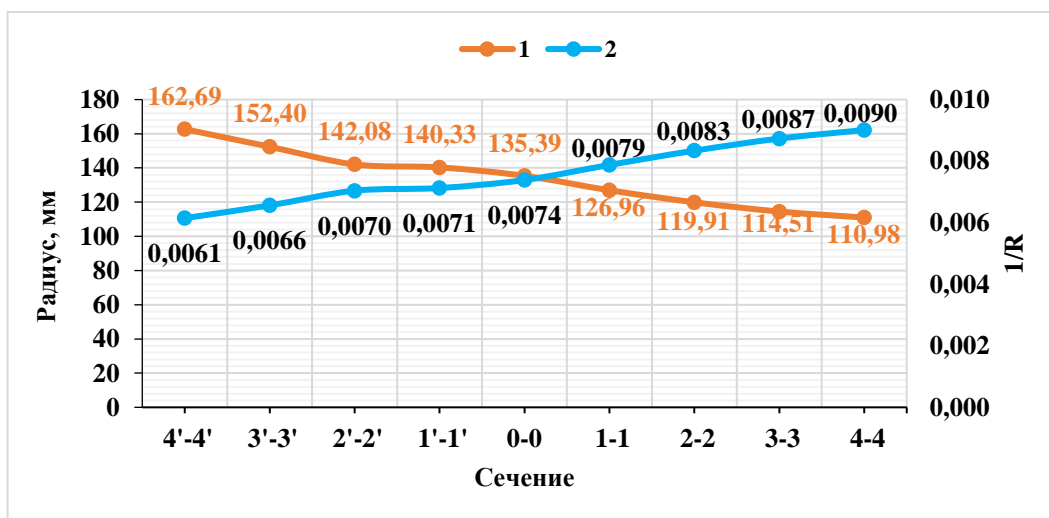
Радиусы и кривизны, которые определяют геометрические параметры формоизменение профиля ТЗ 2.Т находятся в следующих диапазонах:  $R_n = 310,59 \div 129,06$  мм,  $1/R_n = 0,0032 \div 0,0077$ .

Радиусы и кривизны, профиля ТЗ 2.П/3 изменяется в пределах диапазона:  $R_n = 162,69 \div 110,98$  мм,  $1/R_n = 0,0061 \div 0,0090$ .

Результат расчета поперечных деформаций по сечения и деформационных зон по толщине у образцов 2.Т и 2.3/П: упругая и пластическая зона, приведены в таблице 3.5.



а



б

а – образец 2.Т; б – образец 2.3/П

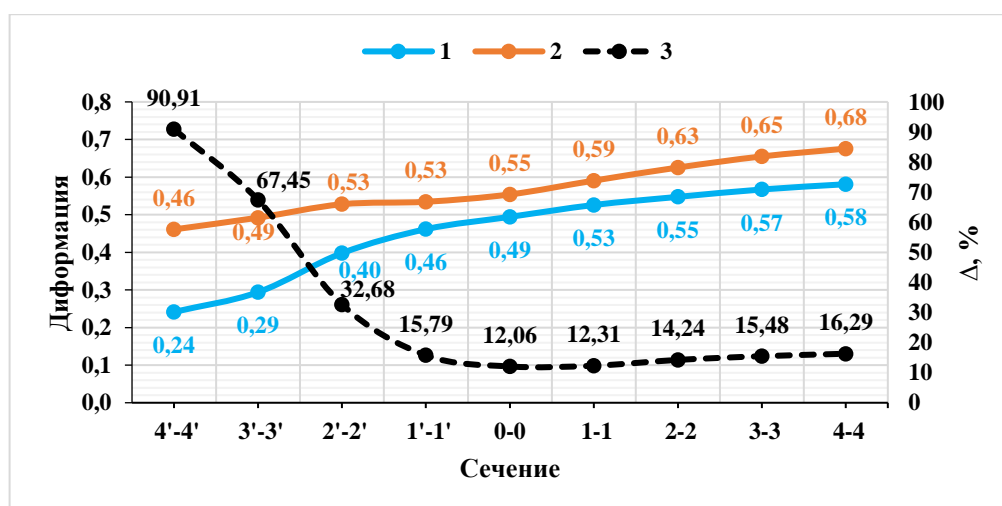
Рисунок 3.15 – Графики распределения радиусов (1) и кривизна (2) по длине образцов



Таблица 3.7 - Результат поперечных деформаций по сечения и деформационных зон по толщине у образцов 2.Т и 2.3/П.

Сечение	4'-4'	3'-3'	2'-2'	1'-1'	0-0	1-1	2-2	3-3	4-4
Образец	2.Т								
$\epsilon_{пов}, \%$	0,24	0,29	0,40	0,46	0,49	0,53	0,55	0,57	0,58
$S_{упр}, мм$	0,51	0,42	0,31	0,27	0,25	0,24	0,23	0,22	0,21
$S_{пл}, мм$	0,24	0,33	0,44	0,48	0,50	0,51	0,52	0,53	0,54
Образец	2.3/П								
$\epsilon_{пов}, \%$	0,46	0,49	0,53	0,53	0,55	0,59	0,63	0,65	0,68
$S_{упр}, мм$	0,27	0,25	0,23	0,23	0,22	0,21	0,20	0,19	0,18
$S_{пл}, мм$	0,48	0,50	0,52	0,52	0,53	0,54	0,55	0,56	0,57

На рисунке 3.16 представлено распределение поперечной деформации образцов 2.Т и 2.3/П.



1 – образец 2.Т; 2 – образец 2.3/П; 3 – разность деформаций

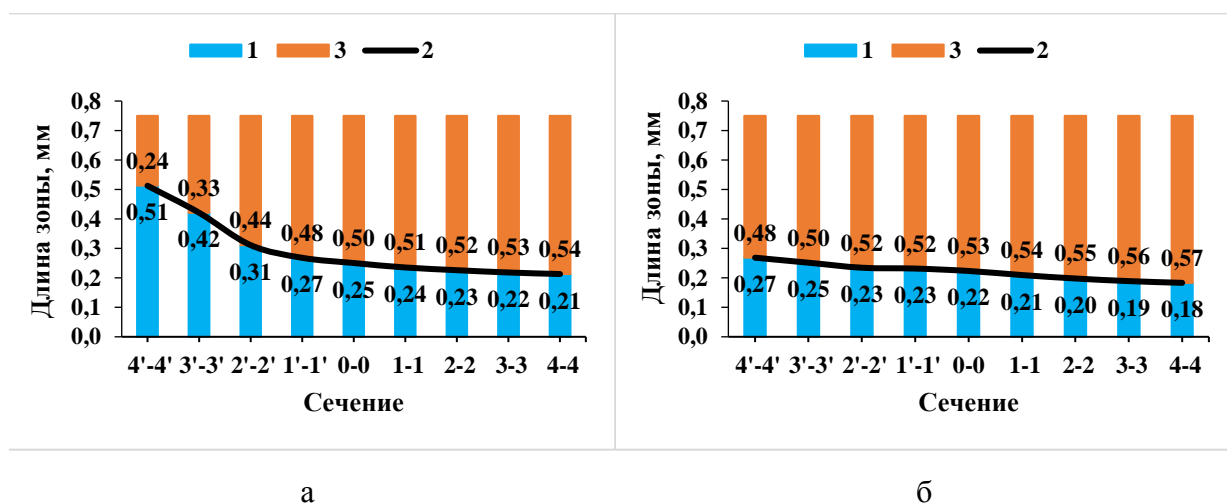
Рисунок 3.16 – Распределение поперечной деформации по сечениям

Сравнение двух образцов 2.Т и 2.3/П показало, что радиусы профиля образца 2.Т по всей длине больше, чем радиусы образца 2.3/П. Значительной увеличение радиуса профиля образца 2.3/П наблюдается на участке в неконтактной деформации (сечения 4'-4'÷1'-1') радиусы образца 2.3/П. На участках нагрузки (сечение 0-0) и распружинивания (сечения 4-4÷1-1) радиусы образца 2.3/П больше на 12,31÷16,29 %.

Амплитуда знакопеременногогиба от профиля заготовки с начальным радиусом  $R=174,19$  мм и до знакопеременной формовки ТЗ в калибрах с радиусами  $R_{1.ок} = 140$  мм и  $R_{2.ок} = 71$  мм показывает, что распружинивание ТЗ снижается на 12,06÷16,29 %.

Сравнение маршрутов знакопеременных изгибов заготовок 1.3/П и 2.3/П показывает, что маршрут формовки заготовки 2.3/П снижает распружинивание профиля ТЗ примерно на 10% относительно маршрута заготовки 1.3/П.

Распределение пластической (1) и упругой (2) зон на половине толщины образцов 2.Т и 2.3/П (распределение протяженности зон на второй половине идентично) показано на рисунке 3.17.



а – образец 2.Т; б – образец 2.3/П

Рисунок 3.17 – Распределение упругой (1) и пластической (3) зон на половине толщины образцов и граница между зонами (2)

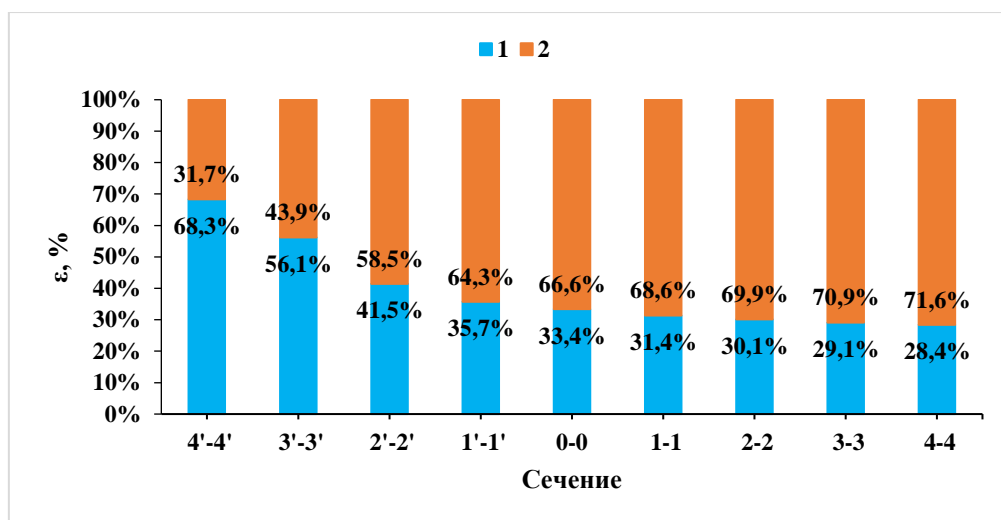
На рисунок 3.17а (образец 2.Т) – видно, что в сечениях (4'-4'÷3'-3') упругая деформация занимает от 68,33 % до 56,14 % толщины заготовки. В сечениях (0-0÷4-4) упругая зона составляет меньше половины толщины и составляет от 33,38 % до 28,39 %.

На рисунке 3.17б (образец 2.3/П) во всех сечениях образца упругие зоны составляют меньше половины толщины и находятся в интервале 35,79 %÷24,42 %.

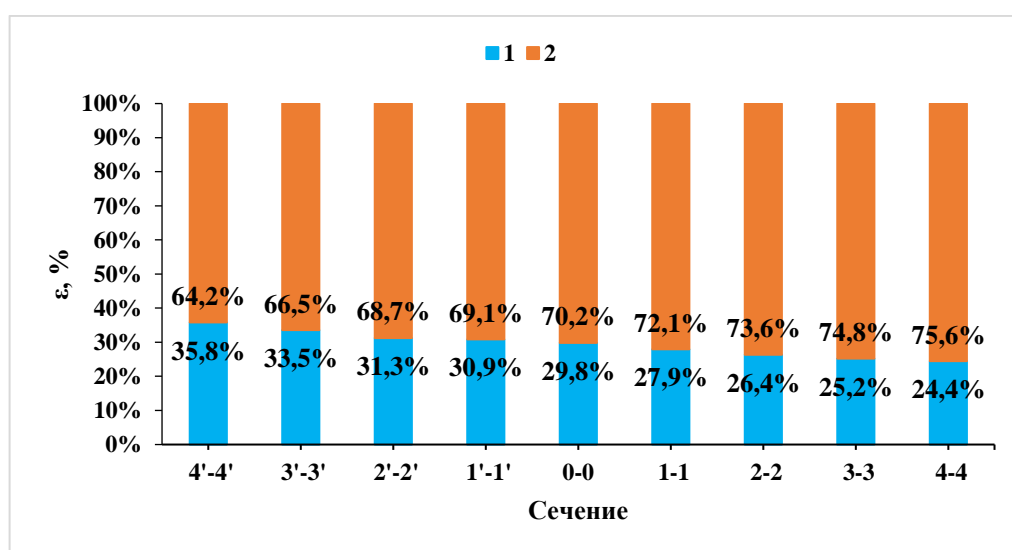
Общая средняя зона упругих деформаций по толщине образца 2.Т составляет 39,34%, а общая средняя зона упругих деформаций по толщине образца 2.3/П составляет 29,46 %.

Таким образом у образца 2.3/П по всей длине упругая составляющая по толщине ниже на 9,88 %, чем у образца 2.Т а на выходе из калибра упругая составляющая меньше на 3,98 %÷5,04 %».

Распределение в процентах упругой (1) пластической (2) зон на половине толщины образцов 2.Т и 2.3/П представлено на рисунке 3.18.



а



б

а – образец 2.Т; б - образец 2.3/П

Рисунок 3.18 – Распределение в процентах упругой (1) пластической (2) и зон на половине толщины образцов

Из графика на рисунках 3.13 и 3.18 видны, что как при традиционной схеме изгиба (1.Т и 2.Т), так и при знакопеременной схеме изгиба (1.3/П и 2.3/П) зон упругой деформации заготовки задней формовочной клетки меньше, чем у передней формовочной клетки, и наоборот, зон пластической деформации заготовки задней формовочной клетки больше, чем у передней формовочной клетки. При этом среднее значение зоны упругой деформации составляет соответственно: 1.Т =57,89%; 2.Т =39,34%; 1.3/П =49,29% и 2.3/П =29,46%;.

### 3.4 Выводы

1) Провели эксперимент по формовке трубных заготовок по традиционной и знакопеременной схемам на опытно-экспериментальном стане ТЭСА-10-60. Отличительной особенностью эксперимента стало создание условий непрерывного формоизменения заготовок в отдельных клетях (1.ОК и 2.ОК). В результате получили четыре образца, сформованных по разным маршрутам: два образца изготовили в первой клетке (1.ОК) по традиционной и знакопеременной схемам, а ещё два — в двух последовательно расположенных клетях (1.ОК и 2.ОК) с комбинированным использованием этих схем.

2) Экспериментально подтверждено, что знакопеременная формовка снижает разгрузку упругих напряжений по толщине полосы и уменьшает распруживание ТЗ. Отмечено, что зона упругих деформаций сокращается в поперечном сечении заготовки, что способствует снижению деформации профиля после снятия нагрузки.

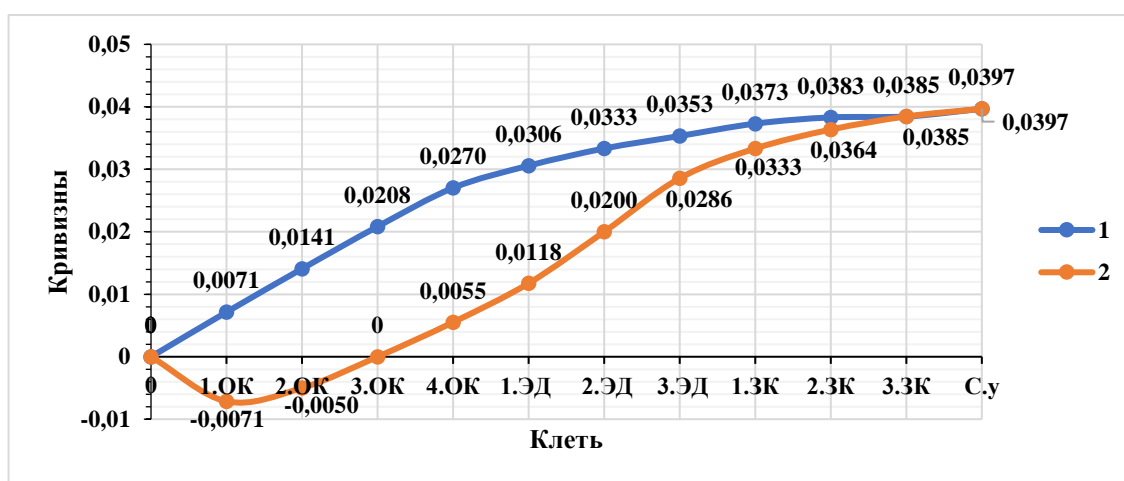
3) Экспериментально установлена зависимость между амплитудой знакопеременной формовки (в диапазоне от отрицательной до положительной кривизны) и степенью снижения распруживания трубных заготовок. Увеличение амплитуды деформации при переходе от формовки в одном калибре ( $R = 140$  мм) к последовательной обработке в двух калибрах ( $R = 140 \rightarrow 71$  мм), приводит к увеличению остаточной кривизны образцов после упругого восстановления: распруживание снижается с 12,06–16,29% до 2,33–6,72%. Таким образом, контроль распруживания достигается регулированием амплитуды знакопеременного изгиба заготовки в клетях формовочного стана.

## Глава 4 Разработка методик расчёта геометрических параметров формоизменения и валкового инструмента для знакопеременной формовки

### 4.1 Расчет геометрических параметров формоизменения трубной заготовки для знакопеременной формовки

Основой расчёта геометрических параметров ТЗ при знакопеременной формовке для трубы  $\text{Ø}50 \times 1,5$  мм является график распределения кривизны ТЗ – рисунок 4.1 [83–89].

На рисунке 4.1 представлены графики распределения кривизны ТЗ в клетях формовочного стана ТЭСА 10–60 с четырьмя открытыми и тремя закрытыми и тремя эджерными клетями для трубы  $\text{Ø}50 \times 1,5$  мм.



1 – периферийный участок; 2 – центральный участок

Рисунок 4.1 – Распределение кривизны ТЗ со знакопеременным изгибом по клетям формовочного стана ТЭСА 10–60 для трубы  $\text{Ø}50 \times 1,5$  мм

Порядок формоизменения профиля ТЗ в формовочных клетях стана ТЭСА 10–60 осуществляется поэтапно. На первом этапе знакопеременный изгиб центральной части заготовки выполняется в открытых клетях, начиная с первой и заканчивая второй. В третьей открытой клетке осуществляется обратная гибка, при этом центральная часть сохраняет прямолинейность. Начиная с четвертой открытой клетки, процесс формоизменения переходит к традиционной двухрадиусной калибровке, что обеспечивает окончательное формирование профиля [84].

На рисунке 4.2 представлена компоновка клеток формовочного стана ТЭСА 10–60.

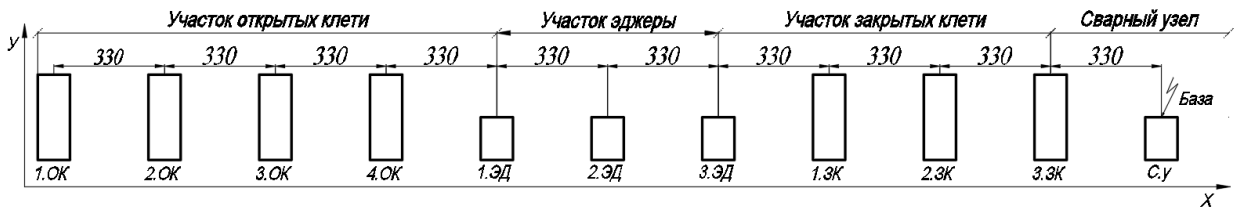


Рисунок 4.2 - Компоновка клеток формовочного стана ТЭСА 10–60

Исходные данные для трубы 50x1,5 мм в условиях ТЭСА 10–60 НИТУ МИСИС:

- Компоновка оборудования: 4 открытые клетки с профилем перегиба центрального участка (1.ОК-4.ОК); 2 заправочные (тянущие клетки); 3 закрытые клетки ( $n_3$ ); 4 клетки калибровочного стана ( $n_k$ ).

- Диаметр готовой трубы -  $D_T$ , мм;

- Толщина стенки трубы -  $S_T$ , мм;

- Материал полосы - марка Ст3.

Определение начальной ширины полосы (штрипса), с учетом допусков на обжатие в формовочном стане, в сварочном узле [46,84–86,90] и в калибровочных клетях, мм:

$$B_L = \pi \cdot D_T \cdot (1 + (\Delta_\phi \cdot n_3 + \Delta_{CB} + \Delta_K \cdot n_k)), \quad (4.1)$$

где  $D_T$  – диаметр готовой трубы, мм;

$n_3$  – количество формовочных клеток закрытого типа, шт.;

$n_k$  – количество калибровочных клеток, шт.;

$\Delta_\phi = 0,2\%$  – допуск на формовку в закрытых калибрах;

$\Delta_{CB} = 0,2\%$ ; – допуск на уменьшение периметра в сварочном узле;

$\Delta_K = 0,25\%$  – допуск на редуцирование в калибровочных клетях [84].

Для решения задачи разбиваем исходную заготовку на 3 участка – рисунок 4.3, задавшись соотношением [28,84,85]:

- Центральный участок, мм;

$$B^H = BC = 25\% \cdot B_L, \quad (4.2)$$

- Периферийные участки, мм;

$$B^H = AB = CD = \frac{(AD - BC)}{2} = 37,5\% \cdot B_L, \quad (4.3)$$

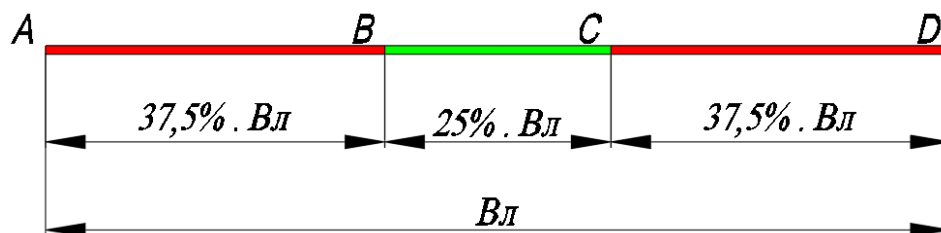


Рисунок 4.3 – Разделение исходную заготовку на 3 участка

### Расчет радиусов и углов сворачивания ТЗ

В соответствии с распределением кривизны по клетям при формовке, по схеме с центральным изогнутым участком для трубы диаметром  $\text{Ø}50 \times 1,5$  мм (рисунок 4.1), определяем значения кривизны ТЗ для ТЭСА 10–60 [84].

Определение радиусов центрального и периферийных участков ТЗ в  $i$ -й клетки исходя кривизны ТЗ [84–86], мм:

$$\begin{cases} R_i^{\Pi} = \frac{1}{\varkappa_i^{\Pi}} \\ R_i^{\Pi} = \frac{1}{\varkappa_i^{\Pi}} \end{cases}, \quad (4.4)$$

Соответствующие углы формовки участков, рад:

$$\begin{cases} \varphi_i^{\Pi} = \frac{BC}{R_i^{\Pi}} \\ \varphi_i^{\Pi} = \frac{AB'}{R_i^{\Pi}} \end{cases}, \quad (4.5)$$

На рисунке 4.4 представлена схема профиля ТЗ с центральным противоизгибом

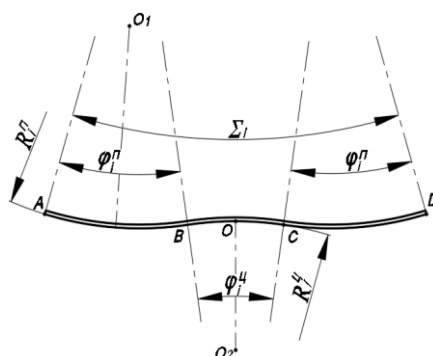


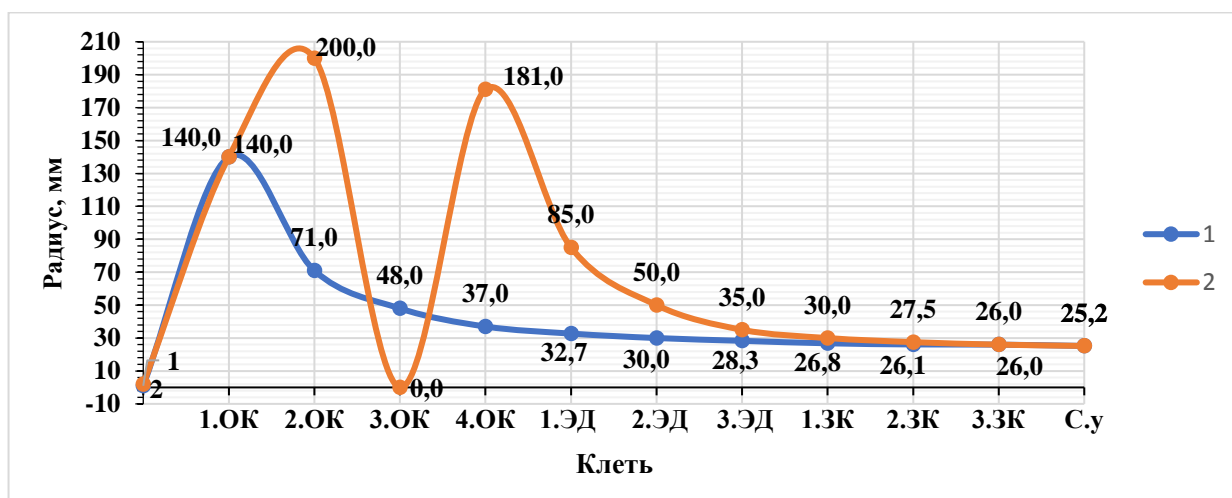
Рисунок 4.4 – Схема профиля ТЗ с центральным противоизгибом

Результаты расчёта кривизны, радиусов и углов ТЗ для знакопеременной формовки трубы  $\text{Ø}50 \times 1,5$  мм приведены в таблице 4.1.

В таблице 4.1 знак минус «-» означает, что центральная часть заготовки изогнута в направлении, противоположном периферийным частям. По результатам расчета построены графики распределения радиусов центральной и периферийной частей двухрадиусной калибровки по длине очага деформации, показанные на рисунке 4.5, и графики распределения углов формовки ТЗ, представленные на рисунке 4.6.

Таблица 4.1 – Результаты расчёта кривизны, радиусов и углов ТЗ для знакопеременной формовки трубы Ø50×1,5 мм

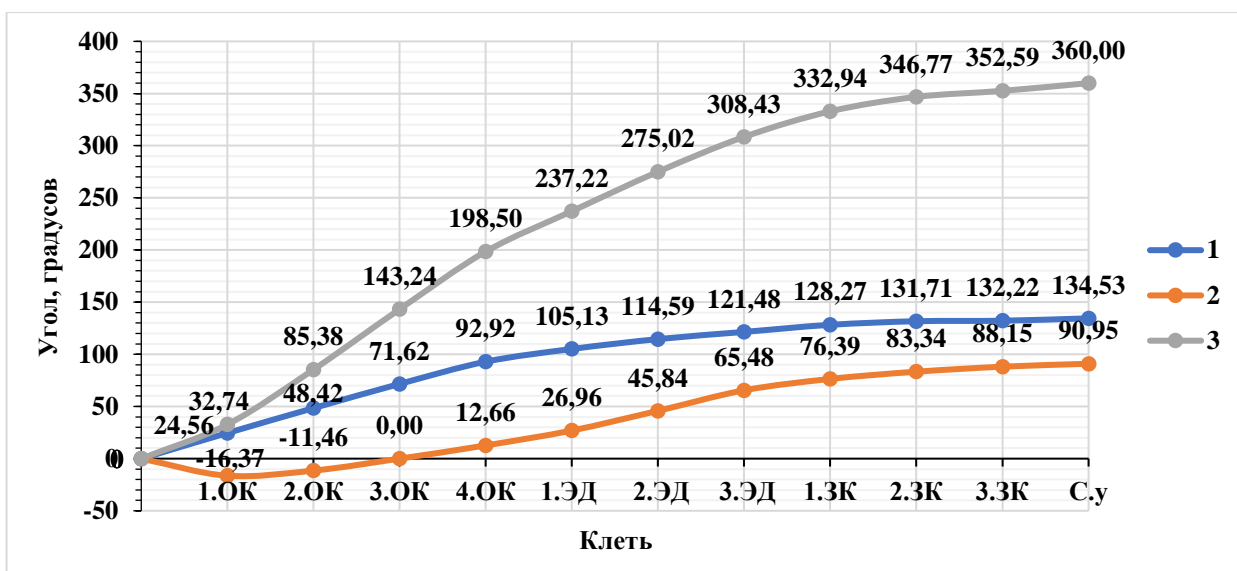
Клеть	Кривизна		Радиус, мм		Угол, рад		
	$\lambda_{\text{п}}$	$\lambda_{\text{ц}}$	$R_{\text{п}}$	$R_{\text{ц}}$	$\varphi_{\text{п}}$	$\varphi_{\text{ц}}$	$\Sigma$
1.ОК	0,0071	-0,0071	140,0	140,0	0,4286	-0,2857	0,5714
2.ОК	0,0141	-0,0050	71,0	200,0	0,8451	-0,2000	1,4901
3.ОК	0,0208	0,0000	48,0	0,0	1,2500	0	2,5000
4.ОК	0,0270	0,0055	37,0	181,0	1,6218	0,2210	3,4645
1.ЭД	0,0306	0,0118	32,7	85,0	1,8349	0,4706	4,1403
2.ЭД	0,0333	0,0200	30,0	50,0	2,0000	0,8000	4,8000
3.ЭД	0,0353	0,0286	28,3	35,0	2,1201	1,1429	5,3831
1.3К	0,0373	0,0333	26,8	30,0	2,2388	1,3333	5,8109
2.3К	0,0383	0,0364	26,1	27,5	2,2989	1,4545	6,0522
3.3К	0,0385	0,0385	26,0	26,0	2,3077	1,5385	6,1538
С.у	0,0397	0,0397	25,2	25,2	2,3479	1,5874	6,2832



1 – периферийный участок; 2 – центральный участок; 3 – полный профиль

Рисунок 4.5 – Распределение радиусов по участкам профиля ТЗ





1 –периферийный участок; 2 –центральный участок; 3 – полный профиль

Рисунок 4.6 – Распределение углов формовки по участкам профиля ТЗ

Из графика видно, что в первой и второй клетях (1.ОК, 2.ОК) центральная часть изгибается в противоположном направлении относительно периферийной части, а радиус постепенно увеличивается с  $R_1=140$  мм до  $R_2=200$  мм. Далее, на третьей клетке (3.ОК), центральный участок выпрямляется для передачи заготовки на реверсивную клетку (4.ОК). После этого заготовке придается профиль, необходимый для получения окончательной формы перед сваркой.

#### *Расчет геометрических параметров профиля ТЗ по клетям формовочного стана*

Расчет геометрических параметров профиля поперечного сечения ТЗ для знакопеременной формовки, основан на распределении кривизны ТЗ. [84–86].

Методика позволяет рассчитывать радиусы, углы, ширину и высоту как для отдельных участков профиля (центрального и периферийных), так и для полного сечения заготовки во всех клетях формовочного стана ТЭСА.

Расчет геометрических параметров валкового инструмента исходя из геометрических параметров ТЗ.

Геометрические параметры ТЗ (ширина  $V_i^{\text{III}}$ , высота  $H_i^{\text{B}}$  и зазор  $A_i^{\text{З}}$ , мм), применяемой для знакопеременной формовки, рассчитываются по следующим формулам в зависимости от типа профиля заготовки

Характерные типы профилей заготовки, формирующие очаг деформации по длине сворачивания ТЗ и «цветок» формовки представлен на рисунке 4.7.

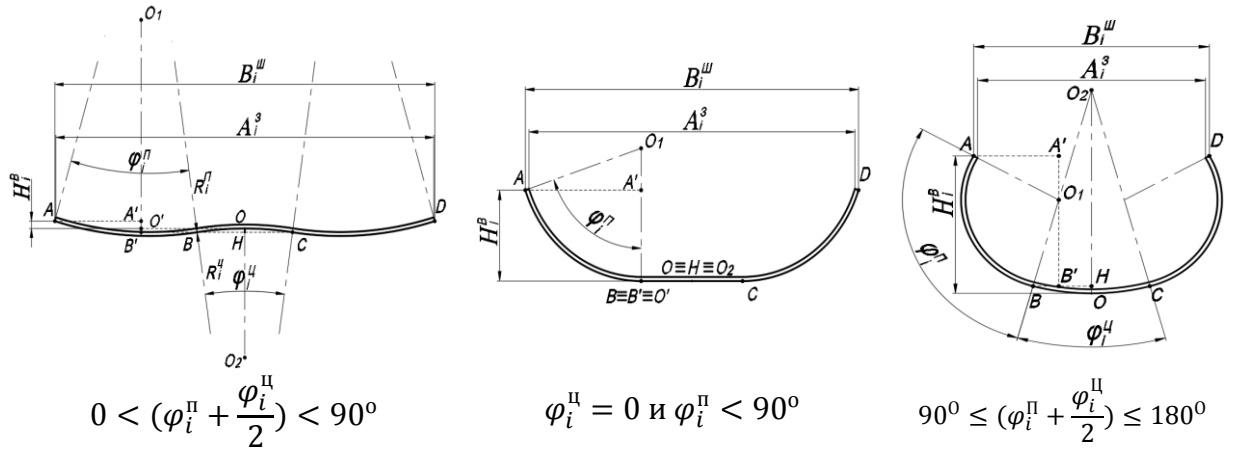


Рисунок 4.7 – Характерные типы профилей заготовки по длине очага сворачивания ТЗ

Геометрические параметры профиля ТЗ с диапазоном углов  $0 < (\varphi_i^{\text{II}} + \frac{\varphi_i^{\text{II}}}{2}) < 90^\circ$ , где центральная часть ТЗ изгибается в противоположном направлении относительно периферической, рассчитываются следующим образом:

$$\begin{cases} B_i^{\text{III}} = 2 \cdot (AA' + B'B + BH) \\ H_i^{\text{P}} = A'B' - HO \\ A_i^{\text{III}} = B_i^{\text{III}} - 2 \cdot \Delta \end{cases}, \quad (4.6)$$

$\Delta$  - отклонение зависит от толщины  $S_T$  штрипса, мм;

$$\Delta = S_T \cdot \sin\left(\varphi_i^{\text{II}} - \frac{\varphi_i^{\text{II}}}{2}\right), \quad (4.7)$$

Поскольку  $A'B' = O_1B' - O_1A'$ ; и  $HO = R_i^{\text{II}} - O_2H$ ; итак, формула (4.6) эквивалентна:

$$\begin{cases} B_i^{\text{III}} = 2 \cdot (AA' + B'B + BH) \\ H_i^{\text{P}} = (O_1B' - O_1A' - (R_i^{\text{II}} - O_2H)), \\ A_i^{\text{III}} = B_i^{\text{III}} - 2 \cdot \Delta \end{cases}, \quad (4.8)$$

Рассмотрим прямоугольный треугольник в точке  $A'$ ;  $\Delta O_1A'A$ :

$$AA' = R_i^{\text{II}} \cdot \sin\left(\varphi_i^{\text{II}} - \frac{\varphi_i^{\text{II}}}{2}\right);$$

$$O_1A' = R_i^{\text{II}} \cdot \cos\left(\varphi_i^{\text{II}} - \frac{\varphi_i^{\text{II}}}{2}\right);$$

Рассмотрим прямоугольный треугольник в точке  $H$ ;  $\Delta O_2HB$ :

$$BH = R_i^{\text{II}} \cdot \sin\left(\frac{\varphi_i^{\text{II}}}{2}\right);$$

$$O_2H = R_i^{\text{II}} \cdot \cos\left(\frac{\varphi_i^{\text{II}}}{2}\right);$$

Рассмотрим прямоугольный треугольник в точке В';  $\Delta O_1 B' B$ :

$$BB' = R_i^{\Pi} \cdot \sin\left(\frac{\varphi_i^{\Pi}}{2}\right);$$

$$O_1 B' = R_i^{\Pi} \cdot \cos\left(\frac{\varphi_i^{\Pi}}{2}\right);$$

Подставить значения в формулу (4.8) и преобразовав, получим конечные формулы:

$$\begin{cases} B_i^{\text{III}} = 2 \cdot R_i^{\Pi} \cdot \left( \sin\left(\varphi_i^{\Pi} - \frac{\varphi_i^{\Pi}}{2}\right) + \sin\left(\frac{\varphi_i^{\Pi}}{2}\right) \right) + 2 \cdot R_i^{\Pi} \cdot \sin\left(\frac{\varphi_i^{\Pi}}{2}\right), \text{ мм} \\ H_i^{\text{B}} = R_i^{\Pi} \cdot \left( \cos\left(\frac{\varphi_i^{\Pi}}{2}\right) - \cos\left(\varphi_i^{\Pi} - \frac{\varphi_i^{\Pi}}{2}\right) \right) - R_i^{\Pi} \cdot \left( 1 - \cos\left(\frac{\varphi_i^{\Pi}}{2}\right) \right), \text{ мм} , \\ A_i^3 = B_i^{\text{III}} - 2 \cdot S_T \cdot \sin\left(\varphi_i^{\Pi} - \frac{\varphi_i^{\Pi}}{2}\right), \text{ мм} \end{cases} \quad (4.9)$$

**Геометрические параметры профиля ТЗ с диапазоном углов  $\varphi_i^{\Pi} = 0$  и  $\varphi_i^{\Pi} < 90^\circ$  рассчитываются по следующим формулам:**

$$\begin{cases} B_i^{\text{III}} = 2 \cdot (AA' + BO) \\ H_i^{\text{B}} = A'B' \\ A_i^3 = B_i^{\text{III}} - 2 \cdot \Delta \end{cases} , \quad (4.10)$$

$\Delta$  - отклонение зависит от толщины  $S_T$  штрипса, мм;

$$\Delta = S_T \cdot \sin(\varphi_i^{\Pi}), \quad (4.11)$$

Поскольку  $A'B' = R_i^{\Pi} - O_1 A'$  и  $BO = \frac{BC}{2} = \frac{25\% \cdot B_{\text{Д}}}{2}$ , итак, формула (4.6) эквивалентна:

$$\begin{cases} B_i^{\text{III}} = 2 \cdot AA' + BC \\ H_i^{\text{B}} = R_i^{\Pi} - O_1 A' \\ A_i^3 = B_i^{\text{III}} - 2 \cdot \Delta \end{cases} , \quad (4.12)$$

Рассмотрим прямоугольный треугольник в точке А';  $\Delta O_1 A' A$ :

$$AA' = R_i^{\Pi} \cdot \sin(\varphi_i^{\Pi});$$

$$O_1 A' = R_i^{\Pi} \cdot \cos(\varphi_i^{\Pi});$$

Подставить значения в формулу (4.12) и преобразовав, получим конечные формулы:

$$\begin{cases} B_i^{\text{III}} = 2 \cdot R_i^{\Pi} \cdot \sin(\varphi_i^{\Pi}) + B^{\text{II}}, \text{ мм} \\ H_i^{\text{B}} = R_i^{\Pi} \cdot (1 - \cos(\varphi_i^{\Pi})), \text{ мм} , \\ A_i^3 = B_i^{\text{III}} - 2 \cdot S_T \cdot \sin(\varphi_i^{\Pi}), \text{ мм} \end{cases} \quad (4.13)$$

**Геометрические параметры профиля ТЗ с диапазоном углов  $90^\circ < (\varphi_i^{\text{II}} + \frac{\varphi_i^{\text{II}}}{2}) < 180^\circ$ .**

Центральная часть ТЗ изгибается реверсивно (обратно) в том же направлении, что и периферический участок, рассчитываются по следующим формулам:

$$\begin{cases} B_i^{\text{III}} = 2 \cdot (AA' - B'B + BH) \\ H_i^{\text{B}} = A'B' + HO \\ A_i^{\text{З}} = B_i^{\text{III}} - 2 \cdot \Delta \end{cases}, \quad (4.14)$$

$\Delta$  - отклонение зависит от толщины  $S_T$  штрипса, мм;

$$\Delta = S_T \cdot \text{Sin} \left( \varphi_i^{\text{II}} + \frac{\varphi_i^{\text{II}}}{2} \right), \quad (4.15)$$

Поскольку  $A'B' = O_1A' + O_1B'$  и  $HO = R_i^{\text{II}} - O_2H$ , и так, формула (4.16) эквивалентна:

$$\begin{cases} B_i^{\text{III}} = 2 \cdot (AA' - B'B + BH) \\ H_i^{\text{B}} = O_1A' + O_1B' + R_i^{\text{II}} - O_2H, \\ A_i^{\text{З}} = B_i^{\text{III}} - 2 \cdot \Delta \end{cases}, \quad (4.17)$$

Рассмотрим прямоугольный треугольник в точке А';  $\Delta O_1A'A$  есть:

$$AA' = R_i^{\text{II}} \cdot \text{Sin} \left( \varphi_i^{\text{II}} + \frac{\varphi_i^{\text{II}}}{2} \right);$$

$$O_1A' = R_i^{\text{II}} \cdot \text{Cos} \left( \varphi_i^{\text{II}} + \frac{\varphi_i^{\text{II}}}{2} \right);$$

Рассмотрим прямоугольный треугольник в точке Н;  $\Delta O_2HB$  есть:

$$BH = R_i^{\text{II}} \cdot \text{Sin} \left( \frac{\varphi_i^{\text{II}}}{2} \right);$$

$$O_2H = R_i^{\text{II}} \cdot \text{Cos} \left( \frac{\varphi_i^{\text{II}}}{2} \right);$$

Рассмотрим прямоугольный треугольник в точке В';  $\Delta O_1B'B$  есть:

$$BB' = R_i^{\text{II}} \cdot \text{Sin} \left( \frac{\varphi_i^{\text{II}}}{2} \right);$$

$$O_1B' = R_i^{\text{II}} \cdot \text{Cos} \left( \frac{\varphi_i^{\text{II}}}{2} \right);$$

Подставить значения в формулу (4.16) и преобразов, получим конечные формулы:

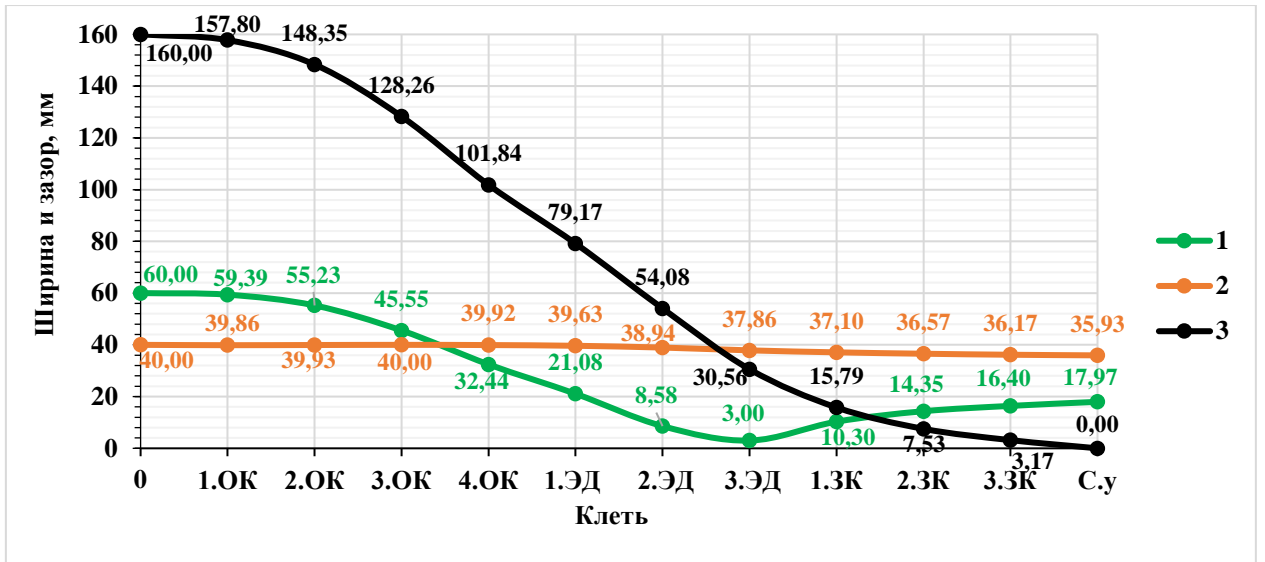
$$\begin{cases} B_i^{\text{III}} = 2 \cdot \left( R_i^{\text{II}} \cdot \left( \sin \left( \varphi_i^{\text{II}} + \frac{\varphi_i^{\text{II}}}{2} \right) - \sin \left( \frac{\varphi_i^{\text{II}}}{2} \right) \right) + 2 \cdot R_i^{\text{II}} \cdot \sin \left( \frac{\varphi_i^{\text{II}}}{2} \right) \right), \text{ мм} \\ H_i^{\text{B}} = R_i^{\text{II}} \cdot \cos \left( \varphi_i^{\text{II}} + \frac{\varphi_i^{\text{II}}}{2} \right) + R_i^{\text{II}} \cdot \cos \left( \frac{\varphi_i^{\text{II}}}{2} \right) + R_i^{\text{II}} - R_i^{\text{II}} \cdot \cos \left( \frac{\varphi_i^{\text{II}}}{2} \right), \text{ мм} \\ A_i^{\text{З}} = B_i^{\text{III}} - 2 \cdot S_T \cdot \sin \left( \varphi_i^{\text{II}} + \frac{\varphi_i^{\text{II}}}{2} \right), \text{ мм} \end{cases} \quad (4.18)$$

Результаты расчета геометрических параметров знакопеременной формовки ТЗ по всем клетям для трубы  $\text{Ø}50 \times 1,5$  мм, представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Результаты расчета геометрических параметров знакопеременной формовки ТЗ по всем клетям для трубы  $\text{Ø}50 \times 1,5$  мм

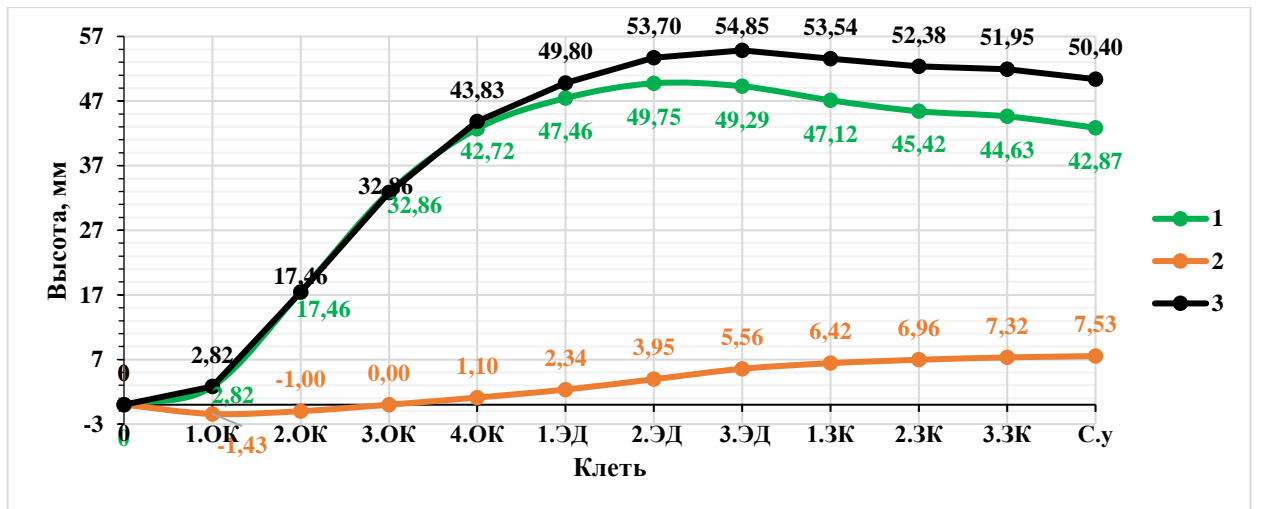
Клеть	Ширины участков, мм			Высоты участков, мм		
	$B^{\text{II}}$	$B^{\text{II}}$	$A^{\text{З}}$	$H^{\text{II}}$	$H^{\text{II}}$	$H^{\text{B}}$
0	60,00	40,00	160,00	0,00	0,00	0,00
1.ОК	59,39	39,86	157,80	2,82	-1,43	2,82
2.ОК	55,23	39,93	148,35	17,46	-1,00	17,46
3.ОК	45,55	40,00	128,26	32,86	0,00	32,86
4.ОК	32,44	39,92	101,84	42,72	1,10	43,83
1.ЭД	21,08	39,63	79,17	47,46	2,34	49,80
2.ЭД	8,58	38,94	54,08	49,75	3,95	53,70
3.ЭД	3,00	37,86	30,56	49,29	5,56	54,85
1.ЗК	10,30	37,10	15,79	47,12	6,42	53,54
2.ЗК	14,35	36,57	7,53	45,42	6,96	52,38
3.ЗК	16,40	36,17	3,17	44,63	7,32	51,95
С.у	17,97	35,93	0,00	42,87	7,53	50,40

На основе результатов расчета, представленных в таблице 4.2, построены графики распределения ширины и высоты ТЗ в калибрах, представленные на рисунке 4.8 и рисунке 4.9 соответственно.



1 –периферийный участок; 2 –центральный участок; 3 – полный профиль

Рисунок 4.8 – Распределение ширины ТЗ



1 –периферийный участок; 2 –центральный участок; 3 – полный профиль

Рисунок 4.9 – Распределение высоты ТЗ

Расчет напряженно-деформированного состояния ТЗ в клетях формовочного стана  
 Расчеты выполнены для исследуемой схемы формования с горизонтальностью центрального волокна, как показано на рисунке 4.10.

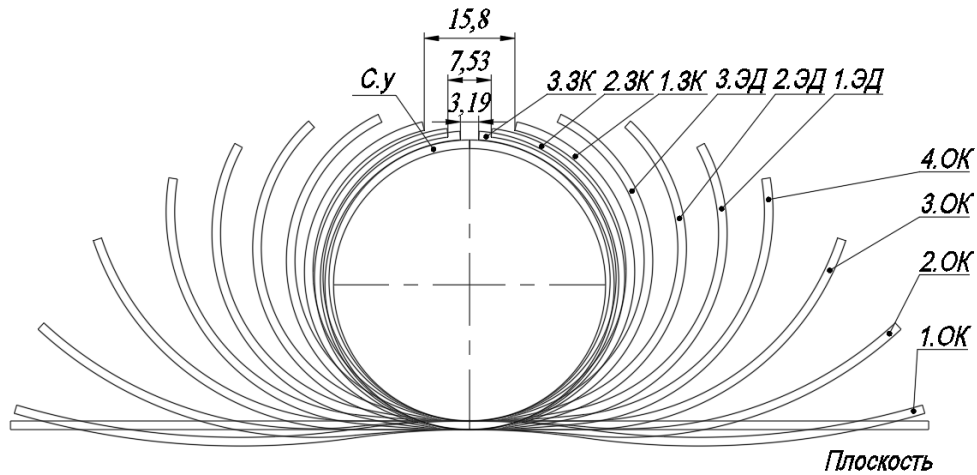


Рисунок 4.10 – «Цветок» формовки для трубы Ø50×1,5 мм

В предлагаемой схеме сворачивания ТЗ значения продольных деформаций не превышают  $-0,030$ , а центральный участок профиля снижает распружинивание профиля ТЗ в диапазоне 10–15% [47].

Кривизна профиля ТЗ в процессе формовки оказывает большое влияние на продольную деформацию кромок ТЗ в зоне формовки. Кривизна кромок [91,92] ТЗ, влияет на дефекты формовки и качество сварного соединения трубы [93,94].

Определение деформации кромок заготовки по схеме, представленной на рисунке 4.10.

При выбранной схеме осевое волокно центрального участка ТЗ перемещается по прямолинейной траектории.

Определение горизонтального перемещения и вертикального смещения боковой кромки при расстоянии между калибровками клетями равно  $X_i = L_i = 330$  мм;

$$\begin{cases} Y_i^\Gamma = \frac{B_i^\text{III} - B_{i-1}^\text{III}}{2}, \\ Z_i = H_i^\text{II} - Z_{i-1} \end{cases}, \quad (4.19)$$

где  $B_i^\Gamma$ ;  $Z_i$  – горизонтальное смещение боковой кромки, мм;

$B_0^\text{III} = B_\text{Л} = 160$  мм – ширина полосы;  $Z_i = 0$ , мм;

Определение перемещения материальных точек в вертикальной плоскости и удлинения боковой кромки ТЗ, мм;

$$\begin{cases} Y_i^\text{II} = \sqrt{Y_i^{\Gamma^2} + Z_i^2}, \\ L_i^\text{K} = \sqrt{X_i^2 + Y_i^{\text{II}^2}}, \end{cases} \quad (4.20)$$

Продольная деформация кромки:

$$\varepsilon_{xx,i}^{\text{п}} = \frac{L_i^K - L_i}{L_i} \cdot 100\% \quad (4.21)$$

Расчет напряжений металла кромки, определяем по закону Гука;

$$\sigma_{xx,i}^{\text{п}} = \varepsilon_{xx,i}^{\text{п}} \cdot E, \quad (4.22)$$

где  $E$  – модуль упругости, МПа;

В какой области находятся материальные точки периферийного волокна (кромки) при формовке в первой обжимной клетки, определяем по границе упругой деформации исходя из свойств материала заготовки.

$$\varepsilon_T^{\text{п}} = \frac{\sigma_T}{200000} \cdot 100\%; \quad (4.23)$$

где  $\sigma_T$  - предел текучести, МПа;

Материальные волокна кромки находятся в упругой зоне, если продольные деформации не превышают  $\varepsilon_T^{\text{п}} = 0,15\%$ .

Результат расчета перемещения кромки, продольной деформации кромки и напряжений металла кромки очага формовки с горизонтальным положением осевого волокна по всей длине очага сворачивания ТЗ по в линии формовочного стана ТЭСА 10–60, представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Результат расчета боковой перемещения кромки, продольной деформации кромки и напряжений металла кромки очага формовки с горизонтальным положением осевого волокна по всей длине очага сворачивания с применением знакопеременной формовки для трубы  $\varnothing 50 \times 1,5$  мм:

Клеть	$L_k$ , мм	$\sigma_{\text{п}}$ , Мпа	$\varepsilon_{\text{п}}$ , %
1.ОК	330,01	7,74	0,0039
2.ОК	330,35	212,21	0,1061
3.ОК	330,50	303,12	0,1516
4.ОК	330,41	247,95	0,1240
1.ЭД	330,23	141,95	0,0710
2.ЭД	330,26	156,34	0,0782
3.ЭД	330,22	135,01	0,0675
1.ЗК	330,10	58,55	0,0293
2.ЗК	330,03	19,70	0,0098
3.ЗК	330,01	5,26	0,0026
С.у	330,01	5,42	0,0027



На основе результатов расчета, представленных в таблице 4.3, построены графики продольного перемещения кромки ТЗ и продольной деформации кромки, представленные на рисунке 4.11 и рисунке 4.12 соответственно.

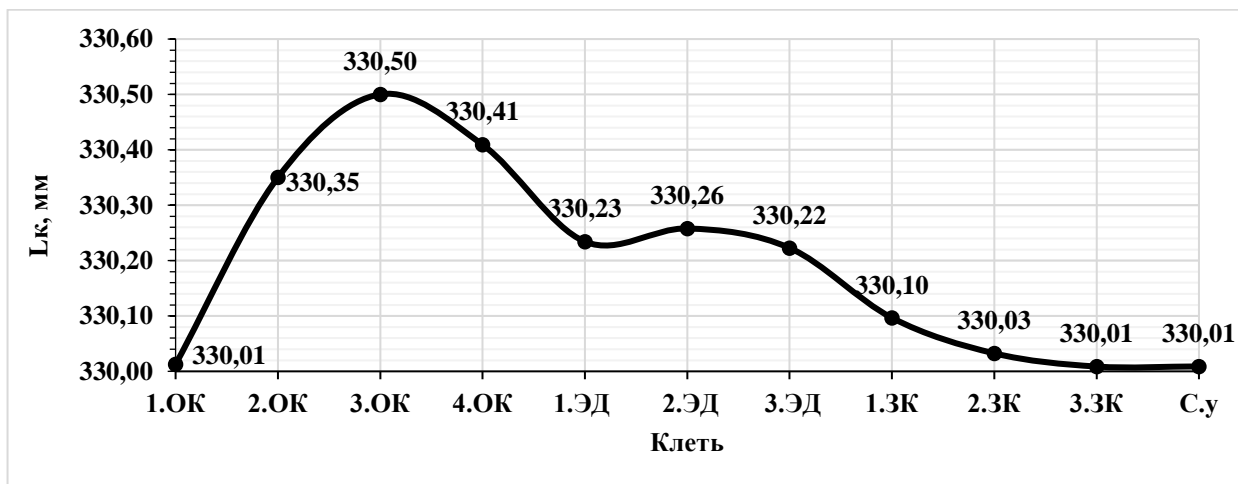


Рисунок 4.11 – График продольного перемещения кромки ТЗ

Из графика продольного перемещения кромки ТЗ видно, что перемещение кромки ТЗ достигает максимального значения в третьей формовочной клетке (в которой центральной части заготовки переходит противоположный изгиб, в том же направлении что периферийной части заготовки).

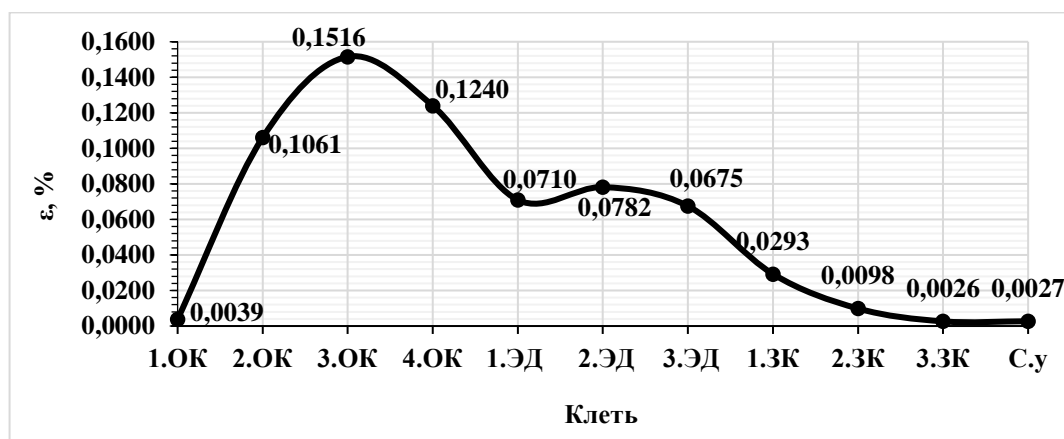


Рисунок 4.12 – График продольной деформации кромки ТЗ

Из графика, показывающего продольную деформацию волокон соответствующей кромки заготовки, видно, что продольная деформация находится в пределах упругой области, поскольку уровень продольной деформации не превышает:  $\epsilon_T^{\text{II}} = 0,15\%$

На основании результатов расчетов с помощью программного обеспечения Solidworks сформировано изображение ТЗ при использовании метода знакопеременного изгиба центральной части по рисункам. 4.1, 4.2 и в таблице 4.1 и показан на рисунке 4.13.

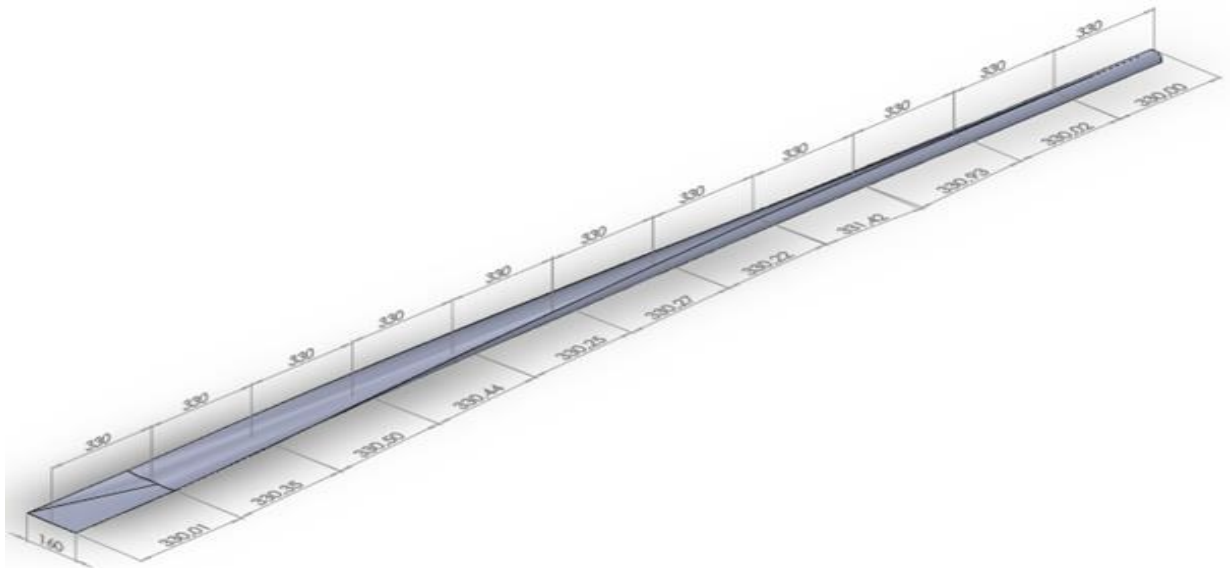


Рисунок 4.13 – Очаг сворачивания ТЗ для трубы Ø50x1,5 мм

Сопоставление траектория перемещения кромок заготовки модели Solidworks с траекторией смещения разработанного метода расчета, показывает, что значение полностью соответствует. Разработанный метод расчёта геометрических параметров ТЗ для знакопеременной формовки и проведённый анализ деформационного и напряжённого состояния очага сворачивания подтверждают возможность формования электросварных труб без потери устойчивости профиля ТЗ и снижения качества продукции малого и среднего диаметра.

#### **Расчет поперечных деформаций ТЗ на формовочной стане**

При схеме знакопеременной формовки центральной части ширина исходной заготовки (штрипса) делится на 3 части [84–86]:

Центральная часть:  $BC = 25\% \div 50\%$  от ширины исходного штрипса.

Периферийные части:  $AB = CD = 37,5\% \div 25\%$  от ширины исходного штрипса.

На рисунке 4.14 представлена схема с исходной разбивкой исходной заготовки и на участки (центральный и периферийные). Ширина исходного штрипса равна  $B_{л} = 160$  мм на, ширина центрального участка  $BC = 25\%$ , ширина периферийного участка  $AB = CD = 37,5\%$  [84–86].

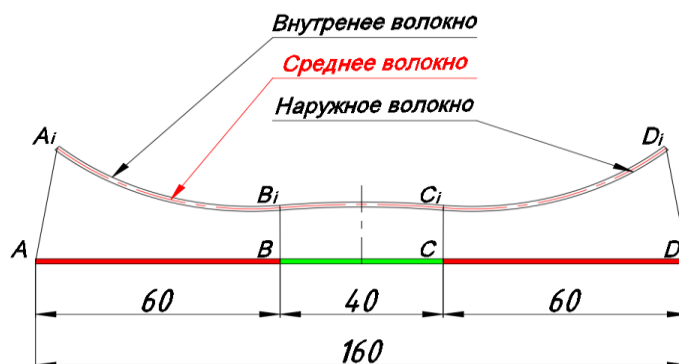


Рисунок 4.14 – Схема исходную заготовку, поделенная на участки для трубы  $\text{Ø}50 \times 1,5$  мм

**Определение деформационное состояние ТЗ для периферийной части будут растягиваться в  $i$ -й клетки ( $i \geq 1$ ).**

Периферийные участки заготовки равны и имеют протяженность равную 60 мм по срединной поверхности. Соответственно наружные волокна этого участка будут растягиваться, поскольку наружный радиус изгиба этого участка равен [84]:

$$\begin{cases} R_i^{\Pi}, \text{ мм} \\ R_i^{\text{H.}\Pi} = R_i^{\Pi} + \frac{s_{\text{T}}}{2}, \text{ мм} \\ R_i^{\text{B.}\Pi} = R_i^{\Pi} - \frac{s_{\text{T}}}{2}, \text{ мм} \end{cases} \quad (4.24)$$

где  $s_{\text{T}} = 1,5$  мм – толщина стенки трубы.

$R_i^{\Pi}$  – средний радиус периферийного участка, мм.

$R_i^{\text{H.}\Pi}$  – наружный радиус периферийного участка, мм.

$R_i^{\text{B.}\Pi}$  – внутренний радиус периферийного участка, мм.

Тогда поперечная деформация периферического участка составит:

$$\varepsilon_i^{\Pi} = \frac{s_{\text{T}}}{2 \cdot R_i^{\Pi}}, \% \quad (4.25)$$

Расчет деформаций волокон на периферийном участке ТЗ по длине волокна:

$$K_i^{\Pi} = \frac{AB}{R_i^{\Pi}} \quad (4.26)$$

где  $K_i^{\Pi}$  – коэффициент изгиба периферийного участка.

Расчет длинных волокон периферийного участка:

$$\begin{cases} B_i^{\Pi} = R_i^{\Pi} \cdot K_i^{\Pi}, \text{ мм} \\ B_i^{\text{H.}\Pi} = R_i^{\text{H.}\Pi} \cdot K_i^{\Pi}, \text{ мм} \\ B_i^{\text{B.}\Pi} = R_i^{\text{B.}\Pi} \cdot K_i^{\Pi}, \text{ мм} \end{cases} \quad (4.27)$$

где  $B_i^{\Pi}$ ;  $B_i^{\text{H.}\Pi}$ ; и  $B_i^{\text{B.}\Pi}$  – длина среднего, наружного и внутреннего волокна периферийного участка, мм.

Деформация в области растяжения составит:

$$\varepsilon_i^{\text{H.П}} = \frac{B_i^{\text{H.П}} - B_i^{\text{П}}}{B_i^{\text{П}}}, \% \quad (4.28)$$

Знак (+) означает, что волокна ТЗ растянуты.

Деформация в области сжатия составит:

$$\varepsilon_i^{\text{В.П}} = \frac{B_i^{\text{В.П}} - B_i^{\text{П}}}{B_i^{\text{П}}}, \% \quad (4.29)$$

Знак (-) означает, что волокна ТЗ сжаты.

**Определение деформационное состояние ТЗ для центральной части в клетки со знакопеременном изгибом в  $i$ -й клетки ( $i = 1 \div 2$ ).**

Центральный участок заготовки имеет протяженность равную 40 мм по срединной поверхности. Соответственно наружные волокна этого участка будут сжиматься, поскольку рассматривается знакопеременный изгиб и центральный участок изгибается в отрицательной области. Наружный радиус изгиба этого участка равен [84]:

$$\begin{cases} R_i^{\text{П}}, \text{ мм} \\ R_i^{\text{H.Ц}} = R_i^{\text{П}} - \frac{s_{\text{T}}}{2}, \text{ мм} \\ R_i^{\text{В.Ц}} = R_i^{\text{П}} + \frac{s_{\text{T}}}{2}, \text{ мм} \end{cases} \quad (4.30)$$

где  $s_{\text{T}} = 1,5$  мм – толщина стенки трубы.

$R_i^{\text{П}}$  – средний радиус центрального участка, мм.

$R_i^{\text{H.Ц}}$  – наружный радиус центрального участка, мм.

$R_i^{\text{В.Ц}}$  – внутренний радиус центрального участка, мм.

Тогда поперечная деформация центрального участка составит:

$$\varepsilon_i^{\text{Ц}} = \frac{s_{\text{T}}}{2 \cdot R_i^{\text{П}}}, \% \quad (4.31)$$

Расчет деформаций волокон на центрального участке ТЗ по длине волокна:

$$K_i^{\text{Ц}} = \frac{BC}{R_i^{\text{П}}} \quad (4.32)$$

где  $K_i^{\text{Ц}}$  – коэффициент изгиба центрального участка.

Расчет длинных волокон центрального участка:

$$\begin{cases} B_i^{\text{П}} = R_i^{\text{П}} \cdot K_i^{\text{Ц}}, \text{ мм} \\ B_i^{\text{H.Ц}} = R_i^{\text{H.Ц}} \cdot K_i^{\text{Ц}}, \text{ мм} \\ B_i^{\text{В.Ц}} = R_i^{\text{В.Ц}} \cdot K_i^{\text{Ц}}, \text{ мм} \end{cases} \quad (4.33)$$

где  $B_i^{\Pi}$ ;  $B_i^{H.\Pi}$ ; и  $B_i^{B.\Pi}$  – Длина среднего, наружного и внутреннего волокна центрального участка, мм.

Деформация в области растяжения составит:

$$\varepsilon_i^{B.\Pi} = \frac{B_i^{B.\Pi} - B_i^{\Pi}}{B_i^{\Pi}}, \% \quad (4.34)$$

Деформация в области сжатия составит:

$$\varepsilon_i^{H.\Pi} = \frac{B_i^{H.\Pi} - B_i^{\Pi}}{B_i^{\Pi}}, \% \quad (4.35)$$

**Определение деформационное состояние ТЗ для центральной части в клетке не со знакопеременном изгибом в  $i$ -й клетки ( $i \geq 3$ ).**

Центральный участок заготовки имеет протяженность равную 40 мм по срединной поверхности. Соответственно наружные волокна этого участка будут растягиваться, и не рассматривается знакопеременный изгиб и центральный участок изгибается в положительной области. Наружный радиус изгиба этого участка равен:

$$\begin{cases} R_i^{\Pi}, \text{ мм} \\ R_i^{H.\Pi} = R_i^{\Pi} + \frac{s_T}{2}, \text{ мм} \\ R_i^{B.\Pi} = R_i^{\Pi} - \frac{s_T}{2}, \text{ мм} \end{cases} \quad (4.36)$$

где  $s_T = 1,5$  мм – Толщина стенки трубы.

$R_i^{\Pi}$  – средний радиус центрального участка, мм.

$R_i^{H.\Pi}$  – наружный радиус центрального участка, мм.

$R_i^{B.\Pi}$  – внутренний радиус центрального участка, мм.

Тогда поперечная деформация центрального участка составит:

$$\varepsilon_i^{\Pi} = \frac{s_T}{2 \cdot R_i^{\Pi}}, \% \quad (4.37)$$

Расчет деформаций волокон на центрального участке ТЗ по длине волокна:

$$K_i^{\Pi} = \frac{BC}{R_i^{\Pi}} \quad (4.38)$$

где  $K_i^{\Pi}$  – коэффициент изгиба центрального участка.

Расчет длинных волокон центрального участка:

$$\begin{cases} B_i^{\Pi} = R_i^{\Pi} \cdot K_i^{\Pi}, \text{ мм} \\ B_i^{H.\Pi} = R_i^{H.\Pi} \cdot K_i^{\Pi}, \text{ мм} \\ B_i^{B.\Pi} = R_i^{B.\Pi} \cdot K_i^{\Pi}, \text{ мм} \end{cases} \quad (4.39)$$

Деформация в области растяжения составит:

$$\varepsilon_i^{\text{Н.Ц}} = \frac{B_i^{\text{Н.Ц}} - B_i^{\text{Ц}}}{B_i^{\text{Ц}}}, \% \quad (4.40)$$

Деформация в области сжатия составит:

$$\varepsilon_i^{\text{В.Ц}} = \frac{B_i^{\text{В.Ц}} - B_i^{\text{Ц}}}{B_i^{\text{Ц}}}, \% \quad (4.41)$$

Результаты расчета деформации поперечных центрального и периферийных участков по срединной поверхности для трубы Ø50x1,5 мм представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Результаты расчета деформации поперечных ТЗ для трубы Ø50x1,5 мм

Клеть	Периферийный участок		Центральный участок	
	ε.В	ε.Н	ε.В	ε.Н
1.ОК	-0,536%	0,536%	0,536%	-0,536%
2.ОК	-1,056%	1,056%	0,375%	-0,375%
3.ОК	-1,563%	1,563%	0,0%	0,0%
4.ОК	-2,027%	2,027%	-0,414%	0,414%
1.ЭД	-2,294%	2,294%	-0,882%	0,882%
2.ЭД	-2,500%	2,500%	-1,500%	1,500%
3.ЭД	-2,650%	2,650%	-2,143%	2,143%
1.3К	-2,799%	2,799%	-2,500%	2,500%
2.3К	-2,874%	2,874%	-2,727%	2,727%
3.3К	-2,885%	2,885%	-2,885%	2,885%
С.у	-2,976%	2,976%	-2,976%	2,976%

Периферийные части заготовки в формованных 1.ОК; 2.ОК наружные волокна средней поверхности растянуты, поскольку величина поперечной деформации равна (+), а внутренние волокна сжаты, так как величина поперечной деформации равна (-). И наоборот, в центральной части заготовки наружные волокна сжимаются (значение деформации имеет знак (-), внутренние волокна растягиваются значение деформации имеет знак (+), поскольку в этих формирующих калибрах применяется знакопеременный изгиб.

## 4.2 Разработка методики расчёта геометрических параметров валкового инструмента для знакопеременной формовки

### Расчёт геометрических параметров валков в открытых клетях

После определения геометрических параметров «цветка» формовки (схемы калибровки валков) следующим этапом является проектирование валкового инструмента, которое выполняется с учётом конструктивных характеристик формовочного стана [84–86].

Диаметры верхних валков рассчитываются исходя из диаметра рабочего вала и высоты профиля ТЗ в сечении калибра, диаметры нижних валков рассчитываются по конструктивному диаметру рабочего вала. Ширина валков рассчитывается с учётом ширины профиля ТЗ в калибре и ширины дистанционных втулок.

### Расчёт для нижнего валка открытых клетей

Диаметр нижнего валка по дну центральной участки калибровки в клетях  $i$ -й ( $D_i^{H.D}$ , мм) определяется, исходя из максимального по размеру диаметра формовочного оборудования и не изменения, с учетом удобства регулировки положения нижних валков калибровочной клетки формовочного стана ТЭСА 10–60.

$$D_i^{H.D} = (1,0 \div 1,5) \cdot D_{\text{MaxT}}, \quad (4.42)$$

где  $D_{\text{MaxT}} = 60$  мм – максимальный наружный диаметр трубы;

Диаметр нижнего валка по реборде периферийных участков калибровки ( $D_i^{H.P}$ , мм), с учетом полного охвата в калибровочной клетях  $i$ -й, определяют исходя из диаметра нижнего валка по дну центральной участки калибровки и высоты изгиба ТЗ в клетях  $i$ -й.

$$D_i^{H.P} = D_i^{H.D} + 2 \cdot H_i^B \quad (4.43)$$

- Первая открытая клеть (1.ОК) – полного охвата.

- Следующая открытая клеть (2.ОК; 3.ОК; 4.ОК) – неполного охвата. Поэтому диаметры  $D_2^{H.P}$ ;  $D_3^{H.P}$ ;  $D_4^{H.P}$  определяют с соответствующим уменьшением (5 ÷ 10%); (10 – 30%); (30 – 45%) по сравнению с расчетом.

Ширина нижнего валка ( $B_i^H$ , мм) рассчитывают исходя из ширины полосы по сечению ТЗ на  $i$ -й клетях с учетом полного охвата калибровочной клетки:

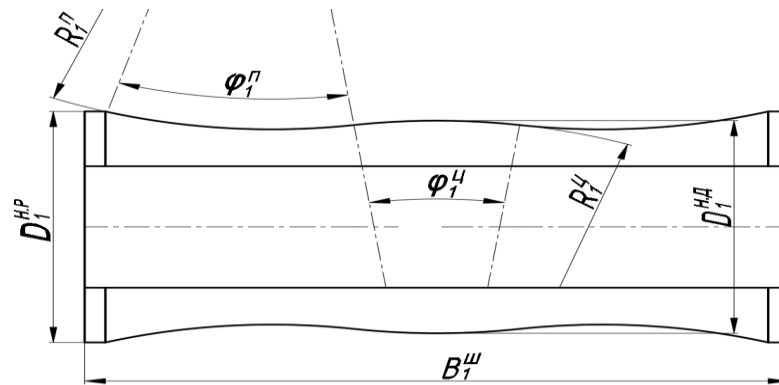
$$B_i^H = B_i^{\text{III}} + (7 \div 15), \quad (4.44)$$

где  $B_i^{\text{III}}$  – ширина профиля ТЗ в клетях  $i$ -й, мм;

- Первая открытая клеть (1.ОК) – полного охвата.

- Следующая открытая клеть (2.ОК; 3.ОК; 4.ОК) – неполного охвата. Поэтому ширина нижнего валка определяется по ширину полосы  $B_2^H$ ;  $B_3^H$ ;  $B_4^H$  с соответствующим уменьшением (5 ÷ 7%); (7 – 15%); (15 – 25%) по сравнению с расчетом.

На рисунке 4.15 представлен нижний валок в 1.ОК. с геометрическими параметрами.



Рисунке 4.15 – Нижний валок в клетке 1.ОК

### Расчёт для верхнего вала открытых клеток

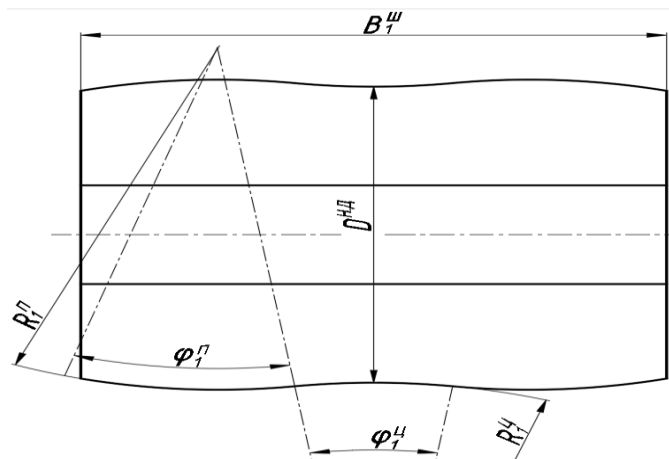
Диаметр верхнего вала по центральной участки в  $i$ -й ( $D_i^{B,D}$ , мм) формовочной клетки зависит от высоты гибки ТЗ и определяется исходя из диаметра по периферийному участку нижнего вала.

$$D_i^{B,D} = (1,5 \div 2,5) \cdot D_i^{H,P}, \quad (4.45)$$

Ширина верхнего вала ( $B_i^B$ , мм) должна определяться исходя из ширины нижнего вала калибровочной клетки, с уменьшением (7 ÷ 15%); (15 – 25%); (25 – 60%), соответствующим формовочной клетки 1.ОК; 2.ОК; 3.ОК; 4.ОК:

$$B_i^B = B_i^H \cdot (95 \div 40\%), \quad (4.46)$$

На рисунке 4.16 представлен верхний валок 1.ОК с геометрическими параметрами.



Рисунке 4.16 – Верхний валок в клетке 1.ОК



## Расчёт геометрических параметров валков в эджерных клетей

Эджерные (вертикальные) клетки располагаются между открытыми клетями и закрытыми формовочными клетями предназначены для предотвращения распушинивания ТЗ.

Расчет геометрических параметров эджерных валков ведется исходя из радиусов и углов формовки периферийной и центральной частей профиля ТЗ в эджерной клетей.

Диаметр эджерного валка по нижней реборде дна принимают таким, чтобы кромка валка составляла около 25%  $BC = 10$  мм ( $BC$  - длины центрального участка волокна материала по сечению ТЗ эджерной клетей)  $l_{3i} = 10$  мм.

Соответственно радиуса эджерного валка по нижней реборде, мм:

$$R_i^{H.Э} = \frac{D_i^{H.Э}}{2}, \quad (4.47)$$

где  $D_i^{H.Э} = 2 \cdot D_{MaxT} = 120$  мм – диаметр эджерного валка по дну.

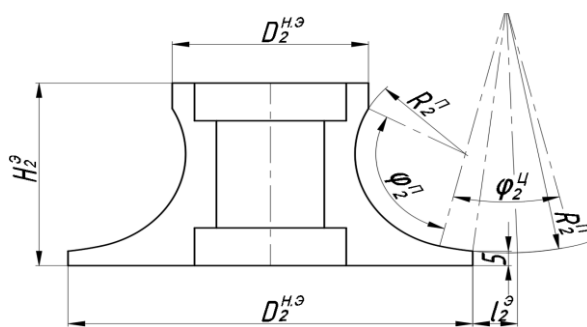
Радиус эджерного валка по верхней реборде, мм:

$$R_i^{B.Э} = R_i^{H.Э} - R_i^{H.П} \cdot \sin\left(\varphi_i^П + \frac{\varphi_i^П}{2}\right) - (R_i^{H.Ц} - R_i^{H.П}) \cdot \sin\left(\frac{\varphi_i^П}{2}\right) + l_i^Э, \quad (4.48)$$

Высота эджерного валка будет равны, мм:

$$H_i^Э = R_i^{H.П} \cdot \left(\cos\left(\frac{\varphi_i^П}{2}\right) - \cos\left(\varphi_i^П + \frac{\varphi_i^П}{2}\right)\right) + \sqrt{R_i^{H.Ц}^2 - l_i^Э^2} - R_i^{H.Ц} \cdot \cos\left(\frac{\varphi_i^П}{2}\right) + (10 \div 15), \quad (4.49)$$

На рисунке 4.17 представлен эджерный валок 2.ЭД с геометрическими параметрами.



Рисунке 4.17 – Эджерный валок в клетей 2.ЭД

## Расчёт геометрических параметров валков в закрытых клетей

Расчет геометрические параметры валков закрытых клетей ведется исходя из радиусов и углов формовки периферийной и центральной частей профиля ТЗ клетей закрытого типа.

### Расчёт для нижнего закрытого валка

Диаметр центрального участка по дну нижнего валка, мм:

$$D_i^{\text{Н.Д.ЗК}} = D_i^{\text{Н.Д}}, \quad (4.50)$$

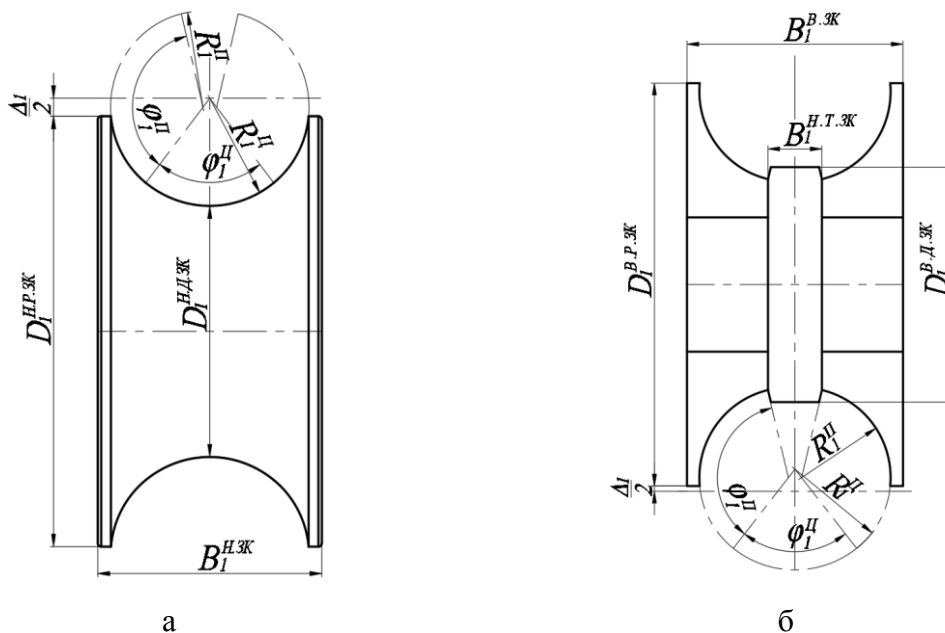
Диаметр реборды нижнего валка принимают из такой конструкции, которая обеспечивает наличие всегда зазора ( $\Delta_1 = 3 \div 5$  мм) между верхним и нижним валками, чтобы диаметра по реборде нижнего валка, мм:

$$D_i^{\text{Н.Р.ЗК}} = 2 \cdot D_{\text{MaxT}}, \quad (4.51)$$

Ширина нижнего валка рассчитывается исходя из максимального по размеру диаметра формовочного оборудования, мм:

$$B_i^{\text{Н.ЗК}} = 2 \cdot D_{\text{MaxT}} + (5 \div 10), \quad (4.52)$$

На рисунке 4.18а представлен нижний и верхний валки с геометрическими 1.3К клетки.



Рисунке 4.18 – Нижний валок (а) и верхний валок (б) в клетки 1.3К

### Расчёт для верхнего закрытого валка

Диаметр центрального участка по дну верхнего валка, мм:

$$D_i^{\text{В.Д.ЗК}} = D_i^{\text{Н.Р.ЗК}} - D_r + 2 \cdot \Delta_1, \quad (4.53)$$

Диаметр реборды верхнего валка, мм:

$$D_i^{\text{В.Р.ЗК}} = D_i^{\text{Н.Р.ЗК}}, \quad (4.54)$$

Ширина верхнего валка рассчитан равным ширину нижнего валка, мм.

$$B_i^{B.3K} = B_i^{H.3K}, \quad (4.55)$$

Ширина разрезной шайбы верхнего валка ( $B_i^{B.T.3K}$ , мм) рассчитывается в соответствии с шириной зазоры формовки ТЗ в соответствии по поперечному сечению калибровочной клетки, закрытой типа.

$$B_i^{B.T.3K} = (0,75 \div 1) \cdot A_i^3, \quad (4.56)$$

где  $A_i^3$  – зазор сечения ТЗ в i-й клетки, мм;

На рисунке 4.18б представлен верхний валок с геометрическими параметрами 1.3К клетки.

Результаты расчета геометрических параметров валкового инструмента для знакопеременной формовки трубы  $\varnothing 50 \times 1,5$  мм представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Результаты расчета геометрических параметров валкового инструмента для знакопеременной формовки трубы  $\varnothing 50 \times 1,5$  мм

обозначения	Валок	Номер клеть									
		1.ОК	2.ОК	3.ОК	4.ОК	1.ЭД	2.ЭД	3.ЭД	1.3К	2.3К	3.3К
R <sub>Ц</sub> , мм	Н	140	200	-	181	85	50	35	30	27,5	26
	В	141,5	201,5	-	179,5	83,5	48,5	33,5	28,5	26	24,5
φ <sub>Ц</sub> , мм	Н	-0,29	-0,2	-	0,22	0,47	0,80	1,14	1,33	1,45	1,54
	В	-0,29	-0,2	-	0,22	0,47	0,80	1,14	1,33	1,45	1,54
R <sub>П</sub> , мм	Н	140	71	48	37	32,7	30	28,3	26,8	26,1	26
	В	138,5	69,5	46,5	35,5	31,2	28,5	26,8	25,3	24,6	24,5
φ <sub>П</sub> , мм	Н	0,43	0,83	1,25	1,62	1,83	2,00	2,12	2,24	2,30	2,31
	В	0,43	0,83	1,25	1,62	1,83	2,00	2,12	2,24	2,30	2,31
D <sub>Д</sub> , мм	Н	70	70	70	70	-	-	-	70	70	70
	В	120	150	170	190	-	-	-	70	70	70
D <sub>Р</sub> , мм	Н	76	96	100	90	-	-	-	120	120	120
	В	-	-	-	-	120	120	120	120	120	120
H <sub>В</sub> , мм	Н	-	-	-	-	63	63	63	-	-	-
B <sub>Ш</sub> , мм	Н	170	150	120	90	-	-	-	65	65	65
	В	150	120	80	40	-	-	-	65	65	65
B <sub>Н.Т</sub> , мм	В	-	-	-	-	-	-	-	14,5	7	3
l <sub>Э</sub> , мм	-	-	-	-	-	10	10	10	-	-	-

### 4.3 Определение энергосиловых параметров процесса формовки

Расчёт энергосиловых параметров процесса знакопеременной формовки [67,86,88], выполняется с учётом компоновки формовочных открытых, закрытых и эджерных клетей.

Поскольку в условиях одного формовочного стана возможны различные варианты компоновки приводных и холостых клетей, важно сначала установить принципиальное воздействие тянущих и тормозящих усилий в каждой клетке.

Компоновка опытного ТЭСА 10–60 с распределением тянущих и тормозящих усилий в каждой клетке в процессе формовки (рисунок 4.19) состоит из следующих характерных участков: участок 1 — открытые клетки (1.ОК; 2.ОК; 3.ОК); участок 2 — эджерные клетки (1.ЭД; 2.ЭД; 3.ЭД); участок 3 — закрытые клетки (1.ЗК; 2.ЗК; 3.ЗК).

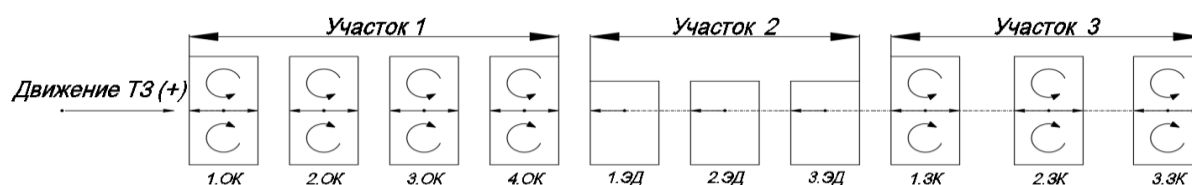


Рисунок 4.19 – Компоновка опытного ТЭСА 10–60 с распределением тянущих (Т) и тормозящих (Р) усилий в каждой клетке в процессе формовки

Для устойчивой формовки на каждом участке формовочного стана необходимо, чтобы тянущие усилия превышали усилия сопротивления, обеспечивая непрерывность процесса формовки и продвижение трубной заготовки через все клетки формовочного стана [84].

Расчёт энергосиловых параметров формовки проводился из условия равновесия ТЗ, где активная составляющая (тянущее усилие) протягивания ТЗ через калибр должна превышать сумму тормозящих усилий: сопротивление перемещению ТЗ в открытых, закрытых и эджерных (холостых) калибрах.

Для расчета вертикального усилия формовки в клетях выполнялось усреднение радиусов калибров с учетом знакопеременного характера деформации, охватывающей как центральный, так и периферийные участки калибра в рабочей клетке.

Определение усредненного радиуса в клетях по внешней стороне заготовки, мм [84].

$$R_i^{cp} = \frac{2 \cdot (R_i^{\Pi} \cdot AB) + (R_i^{\text{II}} \cdot BC)}{2 \cdot AB + BC}, \quad (4.57)$$

Где  $i$  – порядковый номер клетки;

Определение величин деформации, соответствующей пределу текучести:

$$\varepsilon_T = \frac{\sigma_T}{E}, \quad (4.58)$$

где  $\sigma_T = 255$  МПа – предел текучести стали Ст3;

$E = 200\,000$  МПа – модуль упругости первого рода.

Определение величин деформаций в приводных клетях по внешней стороне заготовки [84,95]:

$$\varepsilon_i = \frac{S_T}{2 \cdot R_i^{cp}}, \quad (4.59)$$

где  $S_T = 1,5$  мм – толщина полосы.

Определение напряженного состояния на внешней поверхности заготовки, МПа:

$$\sigma_i^{\Pi} = \sigma_T + (\varepsilon_i - \varepsilon_T) \cdot \Pi, \quad (4.60)$$

где  $\Pi = 5000$  МПа – предел прочности.

Определение угла подгибки, рад:

$$\alpha_i = (1 + \beta) \cdot (\varphi_i - \varphi_{i-1}), \quad (4.61)$$

где  $\beta = 10\%$  - увеличение разницы между углами формовки между калибрами с учетом распруживания на 10%.

$\varphi_0 = 0$ , рад;  $\varphi_{i-1}$  – угол формовки предыдущей клетки, рад.

$\varphi_i$  - угол формовки рассматриваемой клетки, рад.

$$\varphi_i = (2 \cdot \varphi_i^{\Pi} + \varphi_i^{\text{H}}), \quad (4.62)$$

Определение усилий сопротивления перемещению полосы в открытых калибрах, Н [84]:

$$P_i^{\Gamma.0} = 0,266 \cdot \sigma_i^{\Pi} \cdot S_T^2 \cdot \alpha_i, \quad (4.63)$$

Расчёт активной составляющей протягивания полосы через калибр во всех клетях линии ТЭСА, Н [84]:

$$T_i = K_{\text{конт}} \cdot \frac{\sigma_i^{\Pi}}{\sqrt{3}} \cdot F_i, \quad (4.64)$$

где  $K_{\text{конт}} = (0,01 \div 0,03)$ ;

$$F_i = B_{\text{л}} \cdot l_{\text{конт}.i}, \quad (4.65)$$

где  $l_{\text{конт}} = (4 \div 8)$ , мм;

Разница тянущих и тормозящих усилий, Н:

$$\Delta_{i \text{ Участок}}^{\text{Тянущий}} = \sum_i T_i - \sum_i P_i^{\Gamma.0}, \quad (4.66)$$

Если активный компонент, протягивающий штрипса через клеть больше усилия сопротивления перемещению штрипса в клетки, то заготовка проходит через калибр клетки в калибр следующую клетки.[84].

### Расчет усилий на первом участке стана для Ø50x1,5 мм

На первом участке тянущие усилия ТЗ обеспечивают клетки (1.ОК, 2.ОК; 3.ОК; 4.ОК) и сопротивление возникает во всей клетях первого участка[84].

Разница тянущих и тормозящих усилий, Н:

$$\Delta_{i \text{ Участок}}^{\text{Тянущий}} = \sum_{i=1}^4 T_i - \sum_{i=2}^4 P_i^{\Gamma.0}$$

Параметры расчета усилий на первом участке стана ТЭСА 10–60 для трубы Ø50x1,5 мм, представлены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Параметры расчета усилий на первом участке стана

Клеть	R <sub>CP</sub> , мм	ε <sub>i</sub> , рад	σ <sub>i</sub> , Мпа	φ <sub>i-1</sub> , рад	φ <sub>i</sub> , рад	α <sub>i</sub> , рад	P <sub>Г.о.и</sub> , Н	L <sub>Конт.и</sub> , мм	F <sub>i</sub> , Н	T <sub>i</sub> , Н	Δ <sub>Тянущий</sub> , Н
1.ОК	140	0,0054	275	0	1,1429	1,2571	207	4	640	2035	1828
2.ОК	103,25	0,0073	285	1,1429	1,8901	0,8220	140	5	800	2632	2492
3.ОК	36	0,0208	353	1,8901	2,500	0,6708	142	6	960	3911	3769
4.ОК	73	0,0103	300	2,500	3,4645	1,0610	190	7	1120	3880	3689

Результаты расчета усилий на первом участке стана ТЭСА 10–60 для трубы Ø50x1,5 мм, представляем на рисунке 4.20.

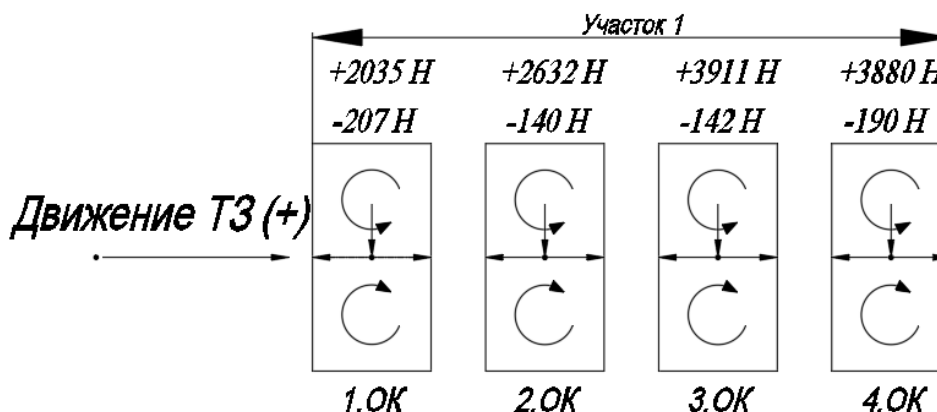


Рисунок 4.20 – Результаты расчета усилий на первом участке

Поскольку тянущие усилия полосы через калибр в первом участке превышает усилия сопротивления её перемещению, полоса продолжит движение во втором участке.

### Расчет усилий на втором участке стана для Ø50x1,5 мм

На втором участке - эджерные клетки (1.ЭД; 2.ЭД; 3.ЭД) не приводные, поэтому во всей клетях второго участка [84] сопротивление перемещению полосы, возникающее, обусловлено частью создаваемой вертикальной силы.

Расчёт усилий для эджерных клеток.

Усилие сопротивления равно, Н:

$$P_i^{C.Э} = 0,1 \cdot P_i^Э, \quad (4.67)$$

Вертикальное усилие равно, Н:

$$P_i^{B.Э} = \frac{1,1 \cdot \sigma_i^П \cdot S_T^2 \cdot L_{i-1,i}}{1,5 \cdot H_i^Э}, \quad (4.68)$$

где  $L_{i-1,i}$  – расстояние между двумя клетям на втором участке, мм;

$i = 1 \div 3$  – порядковый номер эджерной клетки;

$H_i^Э$  - высота эджерного или закрытого валка, примерно равна высоте изгиба полосы в сечении формовочной клетки.

Параметры расчета усилий на втором участке стана ТЭСА 10–60 для трубы Ø50x1,5 мм, представляем в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Параметры расчета усилий на втором участке стана

Клеть	$\sigma_i$ , Мпа	$l_i$ , мм	$H_{Эi}$ , мм	$P_{Эi}$ , Н	$P_{C.Эi}$ , Н
1.ЭД	331	330	49,80	3614	361
2.ЭД	356	330	53,70	3607	360
3.ЭД	374	330	54,85	3710	371

Результаты расчета усилий на втором участке стана ТЭСА 10–60 для трубы Ø50x1,5 мм, представляем на рисунке 4.21

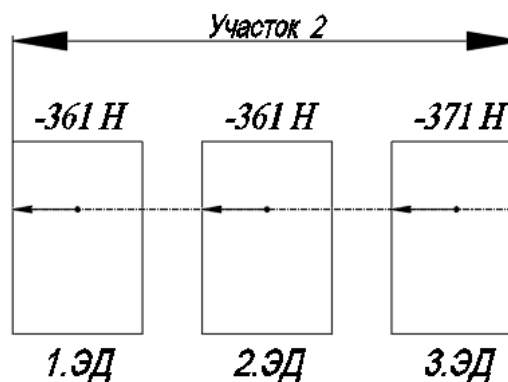


Рисунок 4.21 – Результаты расчета усилий на втором участке

### Расчет усилий на третьем участке стан для Ø50x1,5 мм

На третьем участке для повышения качества формовочной ТЗ в закрытых клетях (1.3К; 2.3К; 3.3К) происходит обжатие ТЗ по периметру [84].

Расчёт усилий для закрытых клетей.

Тянущее усилие равно, Н:

$$P_i^{\text{Тя.3К}} = 0,1 \cdot P_i^{\text{В.3К}}, \quad (4.69)$$

Вертикальное усилие равно, Н:

$$P_i^{\text{В.3К}} = \frac{1,1 \cdot \sigma_i^{\text{П}} \cdot S_{\text{T}}^2 \cdot L_{i-1,i}}{1,5 \cdot H_i^3} + \sigma_i^{\text{П}} \cdot B_{\text{Л}} \cdot n, \quad (4.70)$$

где  $i = 1 \div 3$  – порядковый номер закрытой клетки;

$\sigma_i^{\text{П}} \cdot B_{\text{Л}} \cdot n$  - добавка от трения по периметру заготовки, где  $n$  – где  $n$  – поправочный коэффициент ( $1,5 \div 3$ ) [84].

Усилие сопротивления равно, Н:

$$P_i^{\text{С.3К}} = 0,266 \cdot \sigma_i^{\text{П}} \cdot S_{\text{T}}^2 \cdot \alpha_i \cdot m + \sigma_i^{\text{П}} \cdot B_{\text{Л}} \cdot S_{\text{T}} \cdot \varepsilon, \quad (4.71)$$

где  $\varepsilon = 0,5 - 1\%$  – обжатие в закрытом калибре;

$m = 2$  коэффициент упрочнения материала, н/мм<sup>2</sup>.

Сумма усилия сопротивления на третьем участке, Н:

$$\sum P_{3 \text{ Участок}}^{\text{Сопротивление}} = \sum_{i=1}^3 |P_i^{\text{С.Э}}| + \sum_{i=1}^3 |P_i^{\text{С.3К}}|, \quad (4.72)$$

Сумма тянущего усилия на третьем участке, Н:

$$\sum P_{3 \text{ Участок}}^{\text{Тянущий}} = \sum_{i=1}^3 P_i^{\text{Тя.3К}}, \quad (4.73)$$

Разница тянущих и тормозящих усилий, а третьем участке, Н:

$$\Delta_{3 \text{ Участок}} = \sum P_{3 \text{ Участок}}^{\text{Тянущий}} - \sum P_{3 \text{ Участок}}^{\text{Сопротивление}}, \quad (4.74)$$

Параметры расчета усилий на третьим участке стана ТЭСА 10–60 для трубы Ø50x1,5 мм, представляем в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Параметры расчета усилий на третьим участке стана

Клеть	$\sigma_{\text{T}}$ , Мпа	$l_i$ , мм	$H_{\text{ЗК}}$ , мм	$n$	$i$	$\varepsilon$	$P_{\text{Тя.3К}}$ , н	$P_{\text{С.3К}}$ , н	$\sum P_{\text{Тянущий}}$ , н	$\sum P_{\text{Сопротивление}}$ , н	$\Delta_{3 \text{ участок}}$ , н
1.3К	384	330	53,54	1	1	0,5%	6543	678	19893	1794	18098
2.3К	390	330	52,38	1	2	0,5%	6652	593			
3.3К	393	330	51,95	1	3	0,5%	6697	524			



Результаты расчета усилий на втором участке стана ТЭСА 10–60 для трубы Ø50x1,5 мм, представляем на рисунке 4.22.

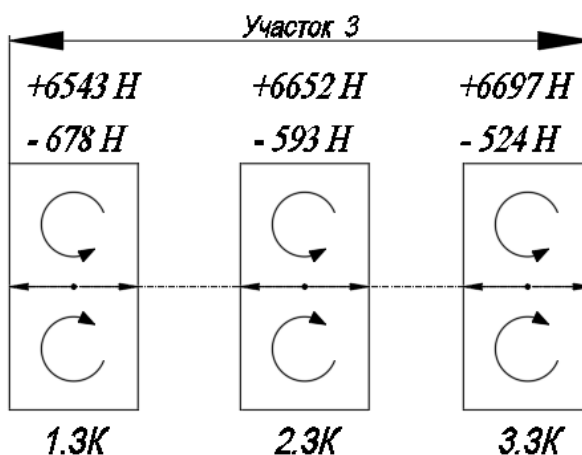


Рисунок 4.22 – Результаты расчета усилий на третьим участке

**Данные расчета силовых параметров для формовочного стана ТЭСА 10–60 для Ø50x1,5 мм**

Расчёт тянущих усилий формовочного стана, Н:

$$T_{\text{Формовочного стана}} = \sum T_i + \sum P_{\text{З Участок}}^{\text{Тянущий}}, \quad (4.75)$$

$$T_{\text{Формовочного стана}} = 35918 \text{ (Н)}$$

Схема распределения усилий по клетям формовочного стана [84] ТЭСА 10–60 для Ø50x1,5 мм, представлена на рисунке 4.23.

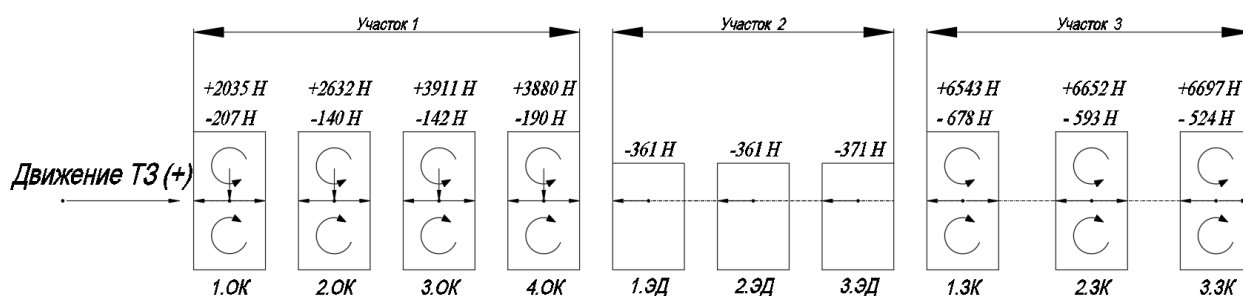
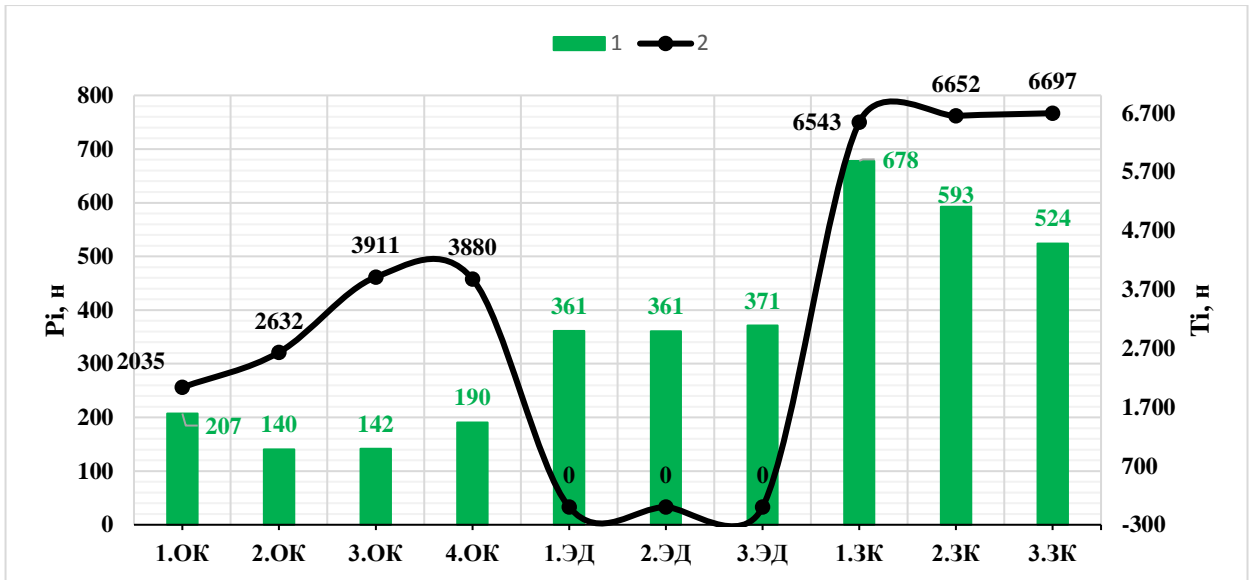


Рисунок 4.23 – Схема распределения усилий по клетям формовочного стан ТЭСА 10–60 для Ø50x1,5 мм

График распределения тянущих усилий и усилий сопротивления по всем клетям формовочного стана ТЭСА 10–60 для трубы Ø50x1,5 мм, представлен на рисунке 4.24.



1 – усилия сопротивления ( $P_i$ ); 2 – тянущие усилия ( $T_i$ )

Рисунок 4.24 – Распределения тянущих и сопротивления усилий по клетям формовочного оборудования ТЭСА 10–60 для трубы  $\varnothing 50 \times 1,5$  мм

Результаты расчета энергосиловых параметров показывают, что усилие сопротивления перемещения полосы оказывает незначительное снижение на тянущие усилия через калибры, требуемые для деформирования заготовки. При этом в каждой приводной клетке тянущие усилия существенно превышают силы сопротивления перемещения полосы, что свидетельствует о стабильности и управляемости процесса формовки.

#### 4.4 Выводы

1) На основе экспериментальных данных для трубы  $\text{Ø}50 \times 1,5$  мм для знакопеременной формовки определены кривые распределения кривизны центральных и периферийных участков по профилю ТЗ для всех формовочных клеток ТЭСА 10–60, а также построена общая кривая распределения кривизны профиля ТЗ в клетях, которая позволяет оценить общий характер формоизменения ТЗ.

2) Разработана методика расчета геометрических параметров профиля ТЗ для знакопеременной формовки, на основе анализа распределения кривизны ТЗ, которая позволяет рассчитать радиусы, углы, ширины и высоты как для отдельных участков профиля (центральная и периферийные), так и для полного сечения заготовки по всем клетям формовочного стана ТЭСА. По разработанной методике рассчитаны геометрические параметры для знакопеременной формовки для трубы  $\text{Ø}50 \times 1,5$  мм. Проанализировано деформированное состояние заготовки по всему очагу сворачивания.

3) Разработана методика расчёта геометрических параметров валкового инструмента для непрерывной знакопеременной формовки, позволяющая определять все необходимые геометрические параметры для открытых клеток полного и неполного контакта, закрытых клеток и эджерных клеток формовочного стана. По разработанной методике рассчитаны геометрические параметры комплекта валкового инструмента для трубы  $\text{Ø}50 \times 1,5$  мм в условиях опытно-экспериментальной установки ТЭСА 10–60.

4) Разработанные методики описаны в методическом пособии «Расчет и анализ технических параметров процесса непрерывной формовки прямошовных труб в схемах ТЭСА с применением знакопеременного гйба заготовки.»

5) Для трубы  $\text{Ø}50 \times 1,5$  мм и компоновки формовочного стана ТЭСА 10–60 выполнены расчёты энергосиловых характеристик процесса непрерывной знакопеременной формовки. Результаты анализа показали, что усилие сопротивления перемещения полосы оказывает незначительное снижение на тянущие усилия через калибры, требуемые для деформирования заготовки. При этом в каждой приводной клетки тянущие усилия существенно превышают силы сопротивления перемещения полосы, что свидетельствует о стабильности и управляемость процесса формовки

## Глава 5 Экспериментальная знакопеременная формовка трубы $\text{Ø}50 \times 1,5$ мм на экспериментальном ТЭСА 10–60 НИТУ МИСИС

### 5.1 Разработка чертежей и изготовление валкового инструмента

Экспериментальную проверку непрерывной знакопеременную формовку ТЗ со [47,55,85,89] осуществляли на опытно-экспериментальном ТЭСА 10–60 НИТУ МИСИС. Для этого разработали комплект чертежей валкового инструмента для участка открытых клетях (1.ОК; 2.ОК; 3.ОК; 4.ОК) и на основании чертежей его изготовить комплект для трубы  $\text{Ø}50 \times 1,5$  мм.

Чертежи валкового инструмента (положения А) разрабатывались на основе геотермических параметров, рассчитанных по методике, представленной в главе 4.

Изготовленный четыре пары валкового инструмента по два валка на каждую формовочную клеть открытого участка формовки. Валковый инструмент по разработанным чертежам для участка открытых клетей представлен на рисунке 5.1.



1 - верхний и нижний валки в клетях 1.ОК; 2 - верхний и нижний валки в клетях 2.ОК; 3 - верхний и нижний валки в клетях 3.ОК; 4 - верхний и нижний валки в клетях 4.ОК

Рисунок 5.1 – Валковый инструмент для участка открытых клетей

Габаритные и соединительные размеры валков представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 - Габаритные и соединительные размеры валков

Обозначения	Валок	Клеть			
		1.ОК	2.ОК	3.ОК	4.ОК
D <sub>д</sub> , мм	Н	70	70	70	70
	В	120	150	170	190
D <sub>р</sub> , мм	Н	76	96	100	90
В <sub>ш</sub> , мм	Н	170	150	120	90
	В	150	120	80	40

## 5.2 Перевалка валков и настройка клетей

Эксперимент проводился в четырёх открытых формовочных клетях на экспериментально-опытном ТЭСА 10–60 [65,66] - рисунке 5.2 при использовании нового комплекта валкового инструмента [17].

Произвели замену валков с однорадиусной калибровкой на валки со знакопеременном изгибом.



Рисунок 5.2 – Формовочная части экспериментального оборудования ТЭСА 10–60 НИТУ МИСИС

Процесс перевалки валков производился в следующем порядке:

- Отключить питание ТЭСА 10–60;
- Подготовить инструменты для разборки и замены: (гаечный рожковый 36 мм головка торцевая 1/2' 36 мм; ключ; 30x32 мм; 24x27 мм; 22x24 мм; 12x14 мм; 13 мм; 10 мм;

линейка 300 мм; угольник столярный 300 мм; штангенциркуль электронный 0-200 0,02 мм; маркер; карандаш);

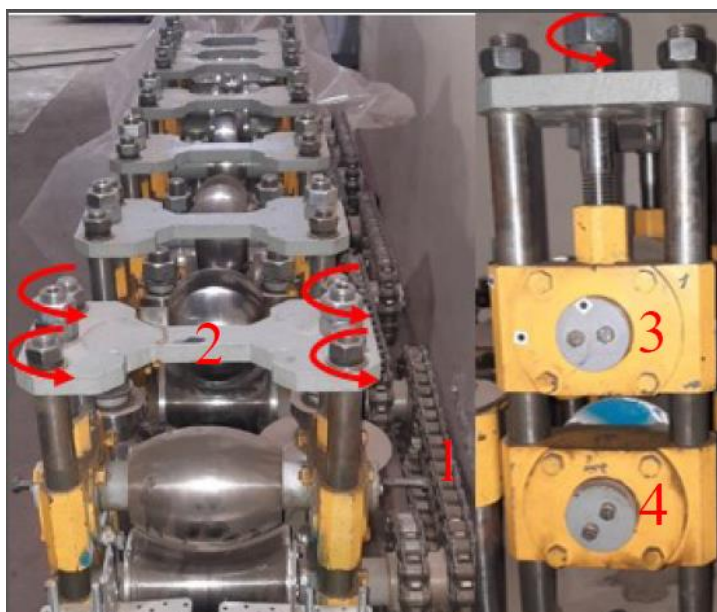
- Приготовить смазочные материалы и очистить оборудование и детали перед разборкой.

- Демонтировать передаточные части привода формовочных клеток - рисунок 5.3.



Рисунок 5.3 – Приводная цепи формовочных клеток

- Снять верхний и нижний валковые узлы 3 и 4 – рисунок 5.4.

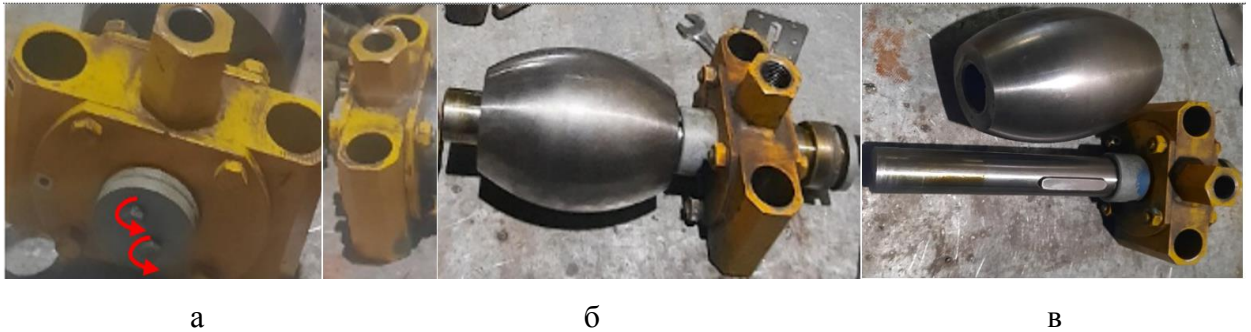


1 - цепной привод; 2 – крышку; 3 - верхний валковый узел; 4 - нижний валковый узел

Рисунок 5.4 – Демонтаж формовочной клетки

**Последовательность замены верхнего валкового узла – рисунок 5.5:**

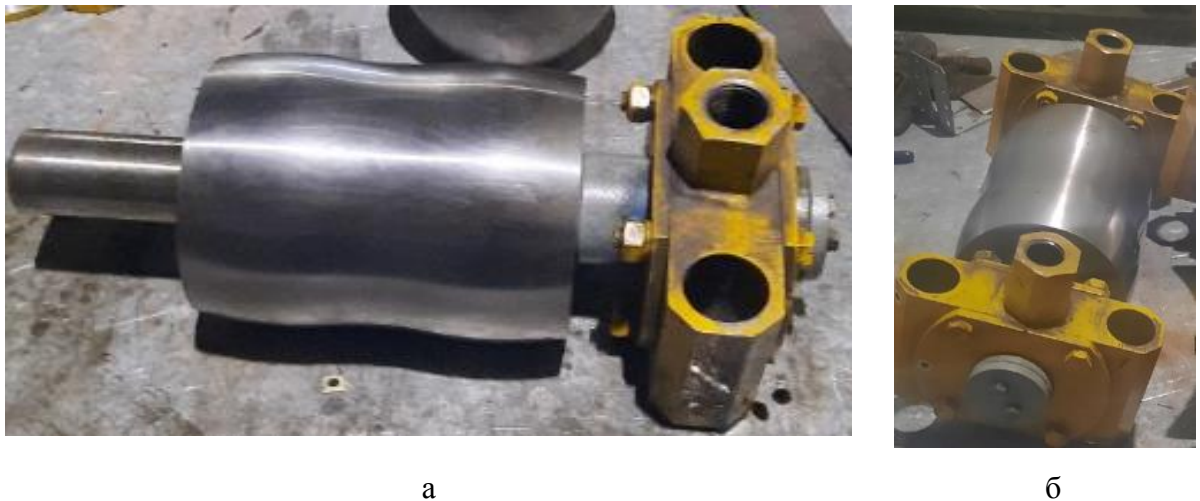
- Снять фиксирующую гайку конца вала (а),
- Снять левый подшипник (б);
- Снять валок (в).



а - снятие фиксирующей гайки с вала; б – снятие подшипника; в - снятие валка с вала

Рисунок 5.5 – Разборка валкового узла

Далее очистить приводной вал от загрязнений, нанести на вал тонкий слой смазки, установить на вал валок со знакопеременным изгибом профилем (а). Обеспечить совмещение шпонки со шпоночным пазом на валу и валке, затем установить правый корпус подшипника, установите конец вала и затянуть крепежные винты конца вала (б). Установить дистанционные втулки, как показано на рисунке 5.6.



а – установка валка; б – собранный валковый узел

Рисунок 5.6 – Установка на валку со знакопеременным изгибом

**Последовательность замены нижнего валкового узла – рисунок 5.8.**

Процедура замены нижнего валкового узла в сборе аналогична процедуре замены верхнего валкового узла, показано на рисунке 5.7.



Рисунок 5.7 – Процедура замены нижнего валкового узла

После замены нижних и верхних валков. Процесс установки валковых узлов на стойки выполняется в обратном порядке: установить нижний валковый узел, затем установить верхний валковый узел. Требования к установке указаны в разделе 3.1 главы 3.

В последующих клетях процесс замены валков производится аналогично.

### 5.3 Экспериментальная формовка

Исходный образец - заготовка размером 1250x160x1,5 мм (рисунок 5.8) из марки стали Ст 3. На заготовку нанесена сетка с размером ячейки 20x20 мм.

Для того чтобы заготовка изначально лучше направлялась, на листовой заготовке отрезаны фаски (рисунок 5.8) с кромкой 60 мм и углом скоса 30–45°.



Рисунок 5.8 – Исходная полосовая заготовка

Эксперименты формоизменения ТЗ с комплектом формовочного инструмента для знакопеременным изгибом, проводили по следующей схеме - рисунок 5.9.

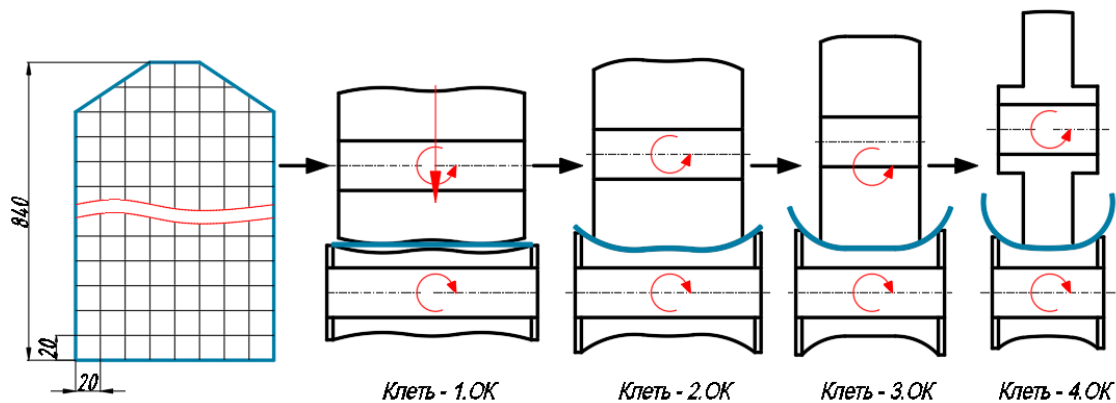


Рисунок 5.9 – Образец исходного штрипса (а) и схема эксперимента (б)



Настройка клеток формовочного стана ТЭСА 10–60 НИТУ МИСИС.

Положение валков регулируется и позиционируется регулировочными винтами [61], как показано на рисунке 5.10 и таблице 5.2.

Расстояние между нижним и верхним валком определяется по формуле, мм:

$$H_i^{H-B} = \frac{D_i^{H,D}}{2} + \frac{D_i^{B,D}}{2} + S_T, \quad (5.1)$$

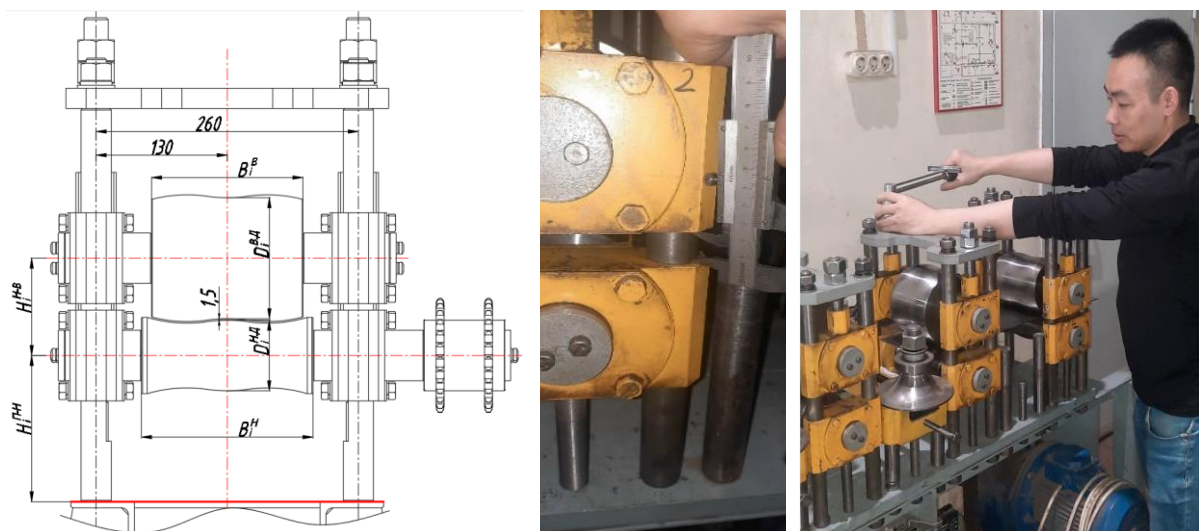


Рисунок 5.10 – Схема настройки положений валков в клетях

Настроечные параметры положения валкового инструмента в формовочных клетях по открытого типа представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Настроечные параметры положения валкового инструмента в формовочных клетях.

Размеры	Валок	Клеть			
		1.ОК	2.ОК	3.ОК	4.ОК
$B_H$ , мм	Н	170	150	120	90
$B_B$ , мм	В	120	150	170	190
$D_{H,D}$ , мм	Н	70	70	70	70
$D_{B,D}$ , мм	В	120	150	170	190
$H_{H-H}$ , мм	Н	100	100	100	100
$H_{H-B}$ , мм	В	96,5	111,5	121,5	131,5

Определив расстояние между верхними и нижними валками, зафиксировали их положение на формовочных клетях.

Порядок проведения формовки:

- Листовая заготовка подводится к первой клетки (1.ОК), кромки заготовки симметричны друг другу относительно оси устройства.

- Когда заготовка по всей ширине вошла в зону контакта с поверхностью валков в клетки 1.ОК, проверяется контакт заготовки с формовочными валками. Наилучшим условием контакта заготовки с формообразующими валками является отсутствие зазора между ними (зазор между заготовкой и верхним и нижним валками равен 0). Представлен на рисунке 5.11.

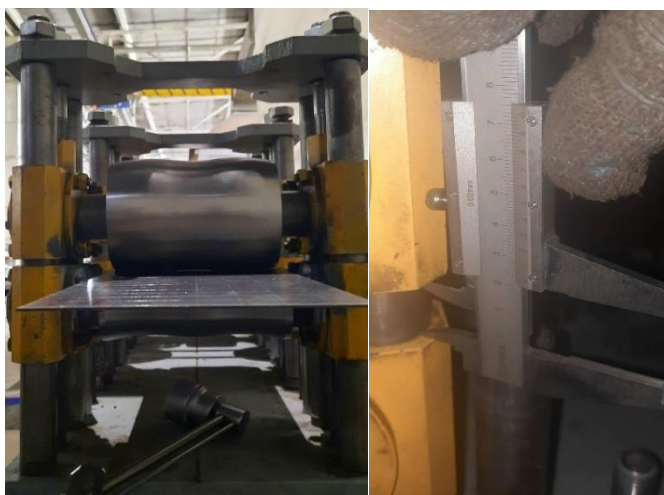


Рисунок 5.11 – Проверка контакт заготовки с формовочными валками в клетки 1.ОК

Процесс перемещения заготовки от первой формовочной клетки (1.ОК) к следующей формовочной клетки (2.ОК; 3.ОК; 4.ОК) обеспечивалась симметричность кромок заготовки относительно оси устройства. При этом регулярно необходимо проверять расстояние между валками, чтобы обеспечить наилучшие условия контакта заготовки с формообразующими валками.

Процесс формования геометрии ТЗ продолжается до тех пор, пока заготовка не пройдет через четвертую формовочную клетку (4.ОК) на расстояние 100–200 мм, а затем выключается привод валков – знакопеременная формовка завершена.

Далее перемещаем верхние валки вверх, извлекаем сформованную заготовку из клетей. Получаем торможенку очага сворачивания трубы  $\text{Ø}50 \times 1,5$  мм – рисунок 5.12.

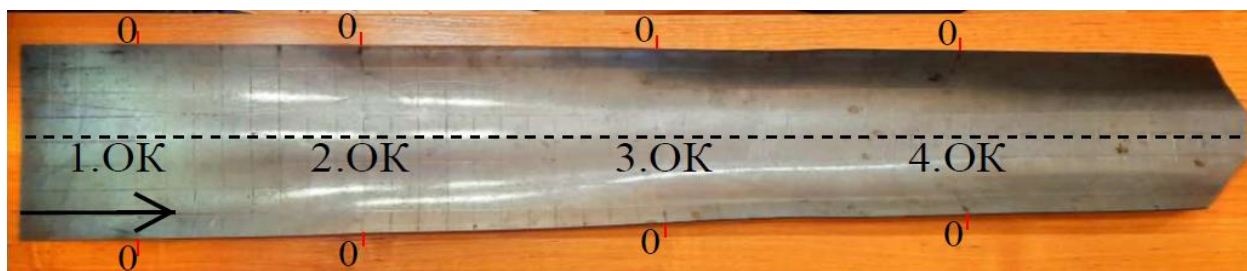


Рисунок 5.12 – Торможенка очага сворачивания трубы  $\text{Ø}50 \times 1,5$  мм

## 5.4 Обработка экспериментальных результатов

Для того чтобы определить радиуса любой изогнутой дуги необходимо знать ширину дуги и высоту изгиба сформованного участка.

Таким образом, изменение формы - кривизны (радиуса) ТЗ зависит от изменения хотя бы одного из трех факторов: ширины, высоты или угла изгиба заготовки.

По длине экспериментального образца ТЗ, производилось измерения геометрических параметров по девяти сечениям для каждого сформованного участка в определенной клетке (1.ОК, 2.ОК, 3.ОК, 4.ОК) - на рисунок 5.13.

На заготовке имеются характерные участки для непрерывной формовки:

- участок в неконтактной деформации: сечения (4'-4' – 1'-1');
- участок нагрузки: сечения (0-0);
- участок распружинивания: (1-1-4-4).

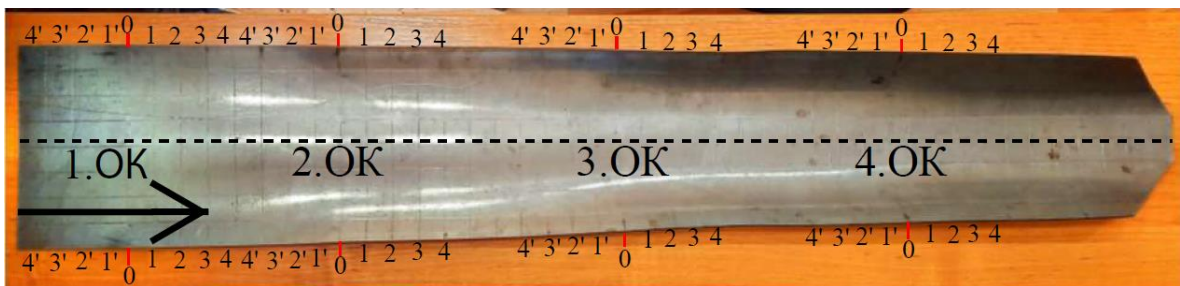


Рисунок 5.13 – Разметка по длине образца

Измерение геометрических параметров полученного образца по сечениям в центральном и периферийных частях проводился по схеме – рисунок 5.14.

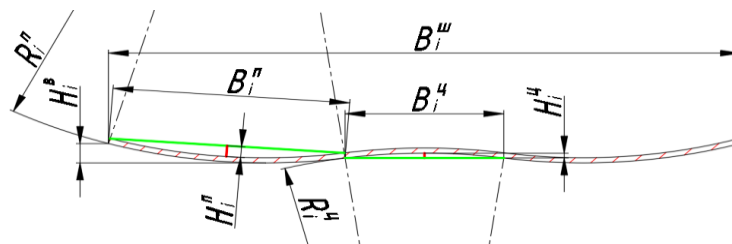


Рисунок 5.14 – Схема измерения геометрических параметров полученного образца

Поскольку трубная заготовка формируется из плоской полосы формовочным инструментом со знакопеременным изгибом, для понимания процесса формоизменения ТЗ необходимо определить радиус, ширину и высоту изгиба центральной и периферийной части ТЗ.

Поскольку профиль поперечного сечения заготовки имеет чередующуюся криволинейную форму, необходимо предварительно измерить ширину дуги изгиба центральной и периферийной частей. После определения ширины и высоты изгибов используйте формулу 5.2 для определения радиуса участков.

Результаты измерений ширины центральной и периферийных частей заготовки по сечениям представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Результаты измерения ширины ТЗ по сечения заготовки

Клеть	Размеры	Сечение								
		4'-4'	3'-3'	2'-2'	1'-1'	0-0	1-1	2-2	3-3	4-4
1.ОК	В <sub>ц</sub> , мм	39,98	39,96	39,94	39,9	39,84	39,82	39,8	39,78	39,76
	В <sub>п</sub> , мм	59,96	59,9	59,8	59,7	59,4	59,42	59,46	59,44	59,4
2.ОК	В <sub>ц</sub> , мм	39,76	39,8	39,84	39,9	39,98	39,96	39,92	39,88	39,84
	В <sub>п</sub> , мм	59,4	59,3	59,16	59	58,7	58,5	58,36	58,2	58
3.ОК	В <sub>ц</sub> , мм	39,8	39,84	39,88	39,94	40	39,98	39,94	39,9	39,86
	В <sub>п</sub> , мм	57,9	57,96	58	58,04	58,06	58,08	58,1	58,12	58,12
4.ОК	В <sub>ц</sub> , мм	39,9	39,88	39,86	39,84	39,8	39,78	39,76	39,74	39,72
	В <sub>п</sub> , мм	58,08	58,02	57,94	57,84	57,8	57,8	57,8	57,82	57,84

По таблице 5.3 построены диаграммы изменения ширины центральной части и периферийных частей заготовки, как показано на рисунке 5.15 и 5.16.

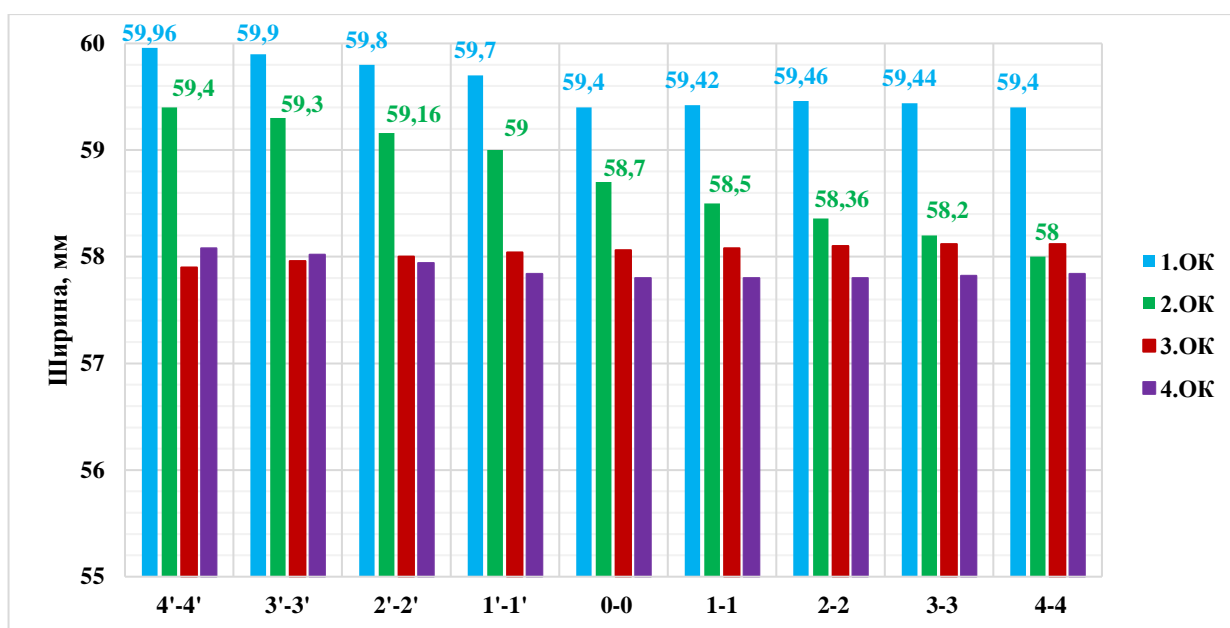


Рисунок 5.15 – График изменения ширины периферийной части по сечениям ТЗ

Из графика изменения ширины периферийной части заготовки видно, что в клетях 1.ОК и 2.ОК центральная часть изгибается в противоположную сторону (изгиб в отрицательную сторону) к периферии, ширина периферийной части заготовки от сечения 4'–4' до сечения 4–4 в этих формовочных клетях имеет тенденцию к постепенному уменьшению. Одновременно, ширина периферии заготовки в задней клетке также уменьшается по сравнению с передней клетки.

В клетях 3.ОК и 4.ОК ширина периферийной части заготовки имеет тенденцию к медленному увеличению, когда заготовка достигает стадии плоскости центральной части заготовки на клетке 3.ОК и центральная часть и периферийные части заготовки изгибаются в одном положительном направлении в 4.ОК.

Поскольку заготовка разделена на центральную часть и периферийные части, изменение ширины заготовки зависит от изменения ширины периферийных частей и центральной части.

Далее построили график изменения ширины периферийной части ТЗ - рисунке 5.16.

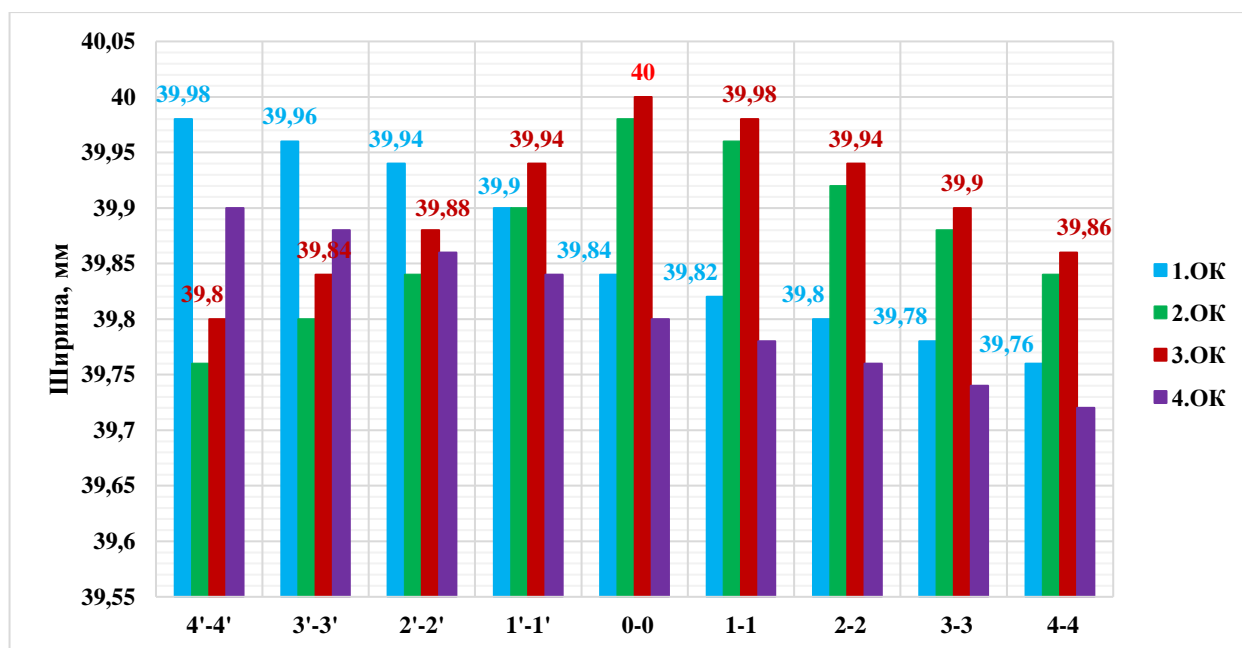


Рисунок 5.16 – График изменения ширины периферийной части ТЗ

В первой клетке – 1.ОК: участок бесконтактной деформации от сечения 4'-4' до сечения 1'-1', ширина центра ТЗ постепенно уменьшается (увеличивается высота гибки), после проходя через зону контакта инструмента (участок 0-0), ширина заготовки продолжает уменьшаться (высота изгиба увеличивается) и достигает максимального значения на участке 4-4. Значение пружинная деформация заготовки уменьшилась. Этот результат будет виден более четко, если мы рассмотрим изменение высоты и периферийной

ширины и высоты в этой формирующей клетки и последующих формирующих клетях (клетях 2. ОК, 3. ОК и 4. ОК).

Во второй клетки 2.ОК: на участке бесконтактной деформации от участка 4'–4' до участка 1'–1' ширина ТЗ увеличивается и достигает максимального значения при входе в зону контакта с инструментом на сечении 0-0. Это происходит потому, что высота изгиба центральной части инструмента на стойке 2.ОК меньше высоты изгиба центральной части инструмента на стойке 1.ОК; После выхода заготовки из части, контактирующей с инструментом, ширина заготовки постепенно уменьшается, в результате чего трубчатая заготовка продолжает процесс изгиба.

В третьей клетки – 3. ОК: заготовка после выхода, ширина центральной части заготовки будет постепенно уменьшаться до наименьшего значения на этом участке, затем ширина этой центральной части снова постепенно увеличится. Затем ширина этой центральной части будет постепенно увеличиваться от сечения 4'–4' до сечения 1'–1' и устанавливать максимальное значение - возвращаясь к исходному значению на сечении 0-0, когда заготовка вступит в контакт с инструментом третья (3.ОК), на которой центральной части заготовки выравнивается. Завершение процесса попеременного изгиба (центральная часть сгибается в отрицательное направление, противоположную периферийной части) для перехода к процессу изгиба вперед, при котором центральная часть заготовки изгибается в том же направлении, что и периферийная часть.

В четвертой клетки – 4. ОК: поскольку заготовка вступила в процесс обратного изгиба, центральная часть изгибается в том же направлении, что и периферийные части заготовки, из этого видно, что ширина заготовки непрерывно уменьшается от 4'–4' поперечное сечение к сечению 4–4.

Для проверки распределения кривизны ТЗ по формовочным клетям необходимо провести измерение высоты центральной и периферийных частей заготовки и определить их радиус. Результаты измерений высоты и расчетов радиусов представлены в таблице 5.4.

По таблице результатов измерений 5.5 построили график изменения высоты для центральной части и периферийных частей заготовки, как показано на рисунке 5.17.

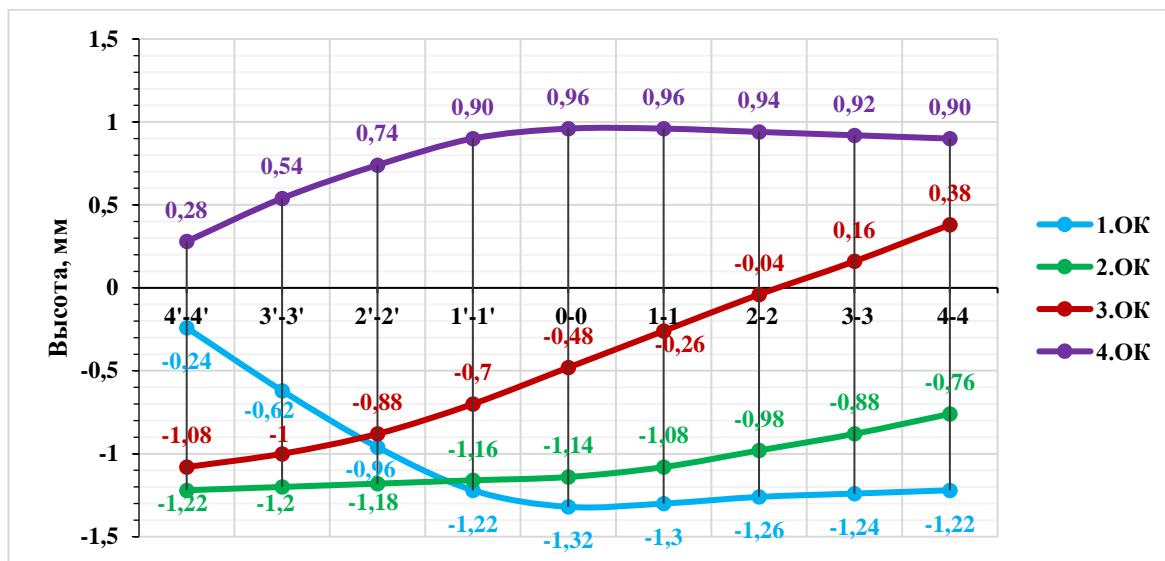
Таблица 5.4 – Высота и радиус ТЗ клетях по сечениям

Клеть	Обозначение	Сечение								
		4'-4'	3'-3'	2'-2'	1'-1'	0-0	1-1	2-2	3-3	4-4
1.ОК	H <sub>ц</sub> , мм	-0,24	-0,62	-0,96	-1,22	-1,32	-1,3	-1,26	-1,24	-1,22
	H <sub>п</sub> , мм	3,20	3,34	3,60	4,40	5,60	6,00	6,14	6,22	6,30
	R <sub>ц</sub> , мм	-832,62	-322,25	-208,19	-163,73	-150,97	-153,11	-157,78	-160,14	-162,58
	R <sub>п</sub> , мм	142,04	135,95	125,97	103,45	81,56	76,56	75,05	74,11	73,16
2.ОК	H <sub>ц</sub> , мм	-1,22	-1,2	-1,18	-1,16	-1,14	-1,08	-0,98	-0,88	-0,76
	H <sub>п</sub> , мм	6,3	6,4	6,64	7,3	8,2	8,5	8,52	8,54	8,6
	R <sub>ц</sub> , мм	-162,58	-165,60	-168,73	-172,13	-175,83	-185,36	-203,76	-226,35	-261,44
	R <sub>п</sub> , мм	73,16	71,88	69,21	63,26	56,63	54,58	54,23	53,85	53,20
3.ОК	H <sub>ц</sub> , мм	-1,08	-1	-0,88	-0,7	-0,48	-0,26	-0,04	0,16	0,38
	H <sub>п</sub> , мм	8,82	8,9	9,14	9,4	9,7	9,68	9,66	9,64	9,62
	R <sub>ц</sub> , мм	-183,88	-198,90	-226,35	-285,21	-416,91	-768,59	0,00	1243,84	522,83
	R <sub>п</sub> , мм	51,92	51,63	50,58	49,50	48,29	48,40	48,51	48,62	48,70
4.ОК	H <sub>ц</sub> , мм	0,28	0,54	0,74	0,90	0,96	0,96	0,94	0,92	0,92
	H <sub>п</sub> , мм	9,86	10,02	10,26	10,6	10,86	10,86	10,86	10,84	10,82
	R <sub>ц</sub> , мм	710,86	368,42	268,75	220,90	206,74	206,53	210,69	215,03	219,57
	R <sub>п</sub> , мм	47,75	47,18	46,34	45,22	44,42	44,44	44,47	44,53	44,60

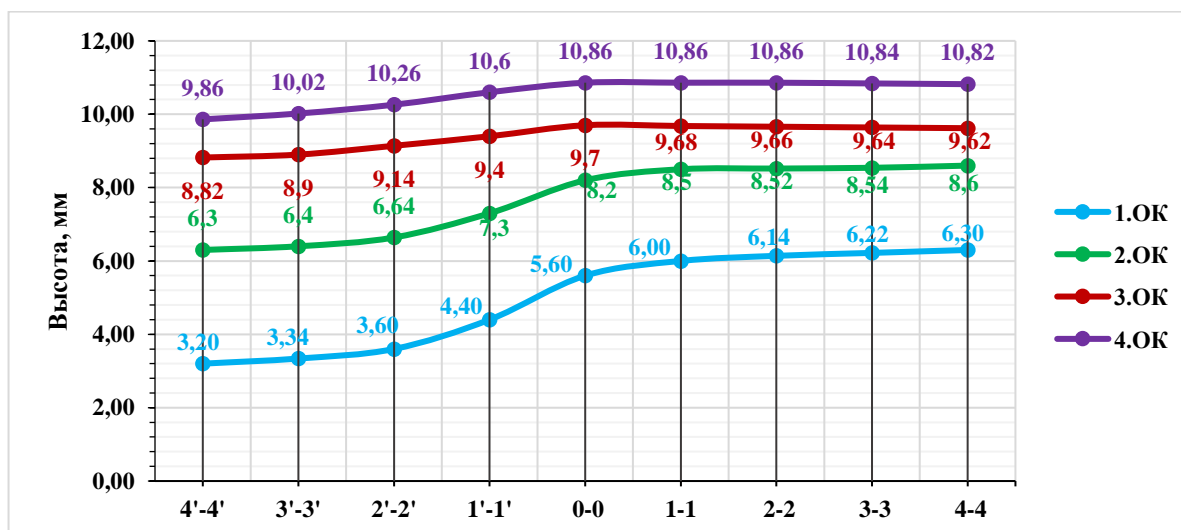
Анализ графиков на рисунке 16 показывает, что в первой клетке (1.ОК) центральный участок ТЗ изгибается в направлении, противоположном направлению сворачивания, достигая максимальной отрицательной высоты –1,32 мм. После выхода из калибра наблюдается снижение отрицательной высоты до –1,22 мм, что свидетельствует о частичном распруживании материала. Во второй клетке (2.ОК) характер деформации центрального участка после выхода из калибра аналогичен первой клетке (1.ОК), однако величина отрицательной высоты ожидаемо уменьшается.

В третьей клетке (3.ОК) после выхода ТЗ из калибра происходит качественное изменение поведения заготовки: центральный участок приобретает положительную высоту, что свидетельствует о реверсе формовки — смене направления деформации. Этот эффект усиливается в четвертой клетке (4.ОК), где центральный участок достигает максимальной положительной высоты, превышающей значения, зафиксированные в 3.ОК. При этом после выхода ТЗ из 4.ОК не наблюдается признаков распруживания, что подтверждает полный

переход к пластической деформации. Отсутствие упругого восстановления обеспечивает стабильное и контролируемое формоизменение заготовки.



а



б

а - центральная часть; б - периферийная часть

Рисунок 5.17 – Изменения высоты изгиба частей заготовки

Таким образом, последовательное прохождение ТЗ в клетях 1–4.ОК демонстрирует эволюцию деформационного процесса: от пластических деформаций с частичным распруживанием в начальных клетях до устойчивого пластического формоизменения в завершающих. Это подтверждает эффективность технологии знакопеременной формовки для достижения заданных геометрических параметров трубной заготовки.

Результаты измерений ширины ТЗ в сечении по клетям, представлены в таблице 5.5.



Таблица 5.5 – Результаты измерений ширины ТЗ в сечении по клетям

Клеть	Обозначение	Сечение								
		4'-4'	3'-3'	2'-2'	1'-1'	0-0	1-1	2-2	3-3	4-4
1.ОК	В <sub>ш</sub> , мм	159,90	159,88	159,82	159,80	159,50	159,36	159,30	159,20	159,10
2.ОК	В <sub>ш</sub> , мм	159,10	158,80	158,40	157,50	156,20	155,70	155,30	155,30	155,10
3.ОК	В <sub>ш</sub> , мм	153,00	151,60	150,20	148,80	146,50	144,40	142,50	141,00	140,20
4.ОК	В <sub>ш</sub> , мм	140,00	139,80	139,40	138,00	137,00	136,00	135,20	134,60	134,20

На графике на рисунке 5.18 показано изменение ширины заготовки в сечениях по клетям 1.ОК ÷ 4.ОК.

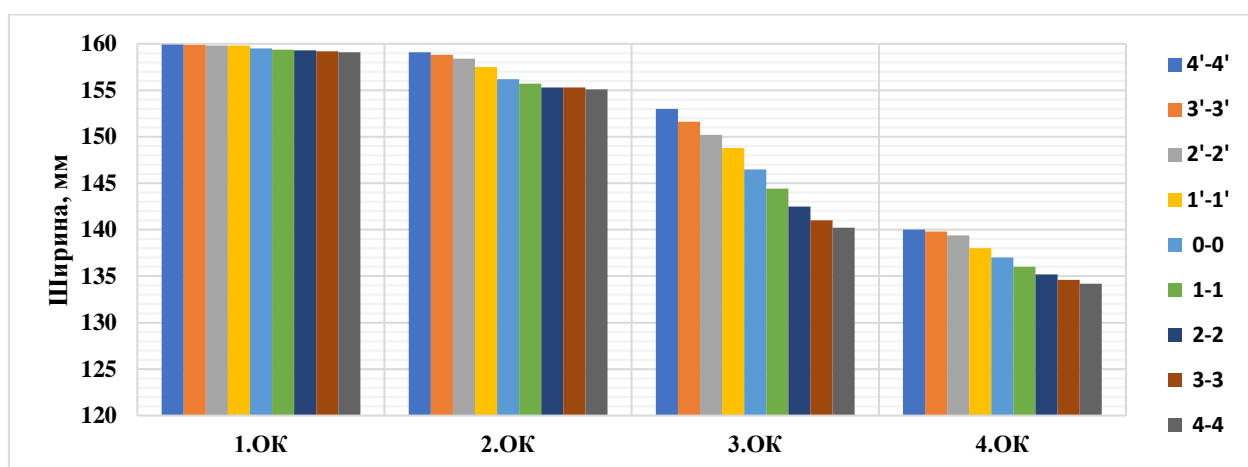
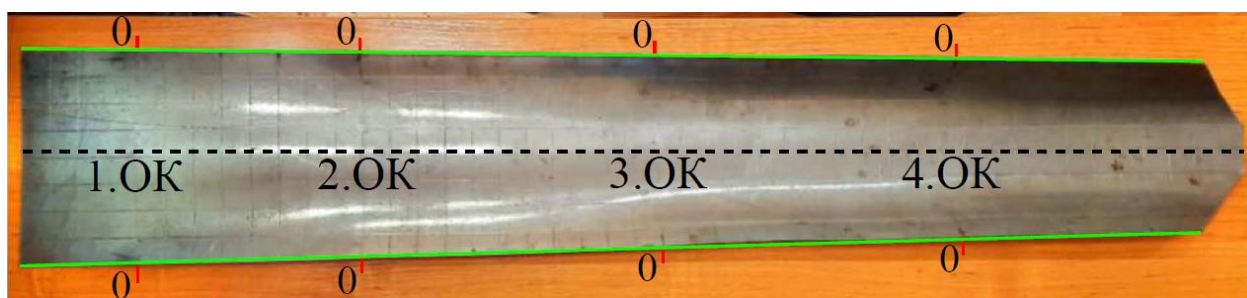


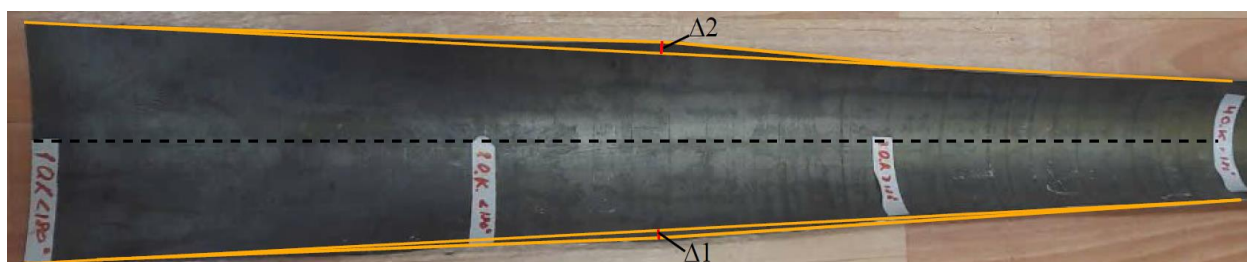
Рисунок 5.18 – График изменения ширины ТЗ по сечениям

Диаграмма изменения ширины ТЗ на рисунке 5.18 показывает, что ширина ТЗ в сечениях постепенно уменьшается, таким образом обеспечивается уменьшение ширины заготовки у после четвертой формовочной клетки, что приводит к уменьшению распушивания профиля заготовки и снижает возможность появления гофров по краям заготовки.

Для сравнения результатов формирования ТЗ по схеме знакопеременной формовки с классической формовки - однорадиусной формовки, соединили линией крайние точки вдоль ТЗ от начало очага сворачивания до конца очага сворачивания (после клетки 4.ОК) - рисунок 5.19.



а



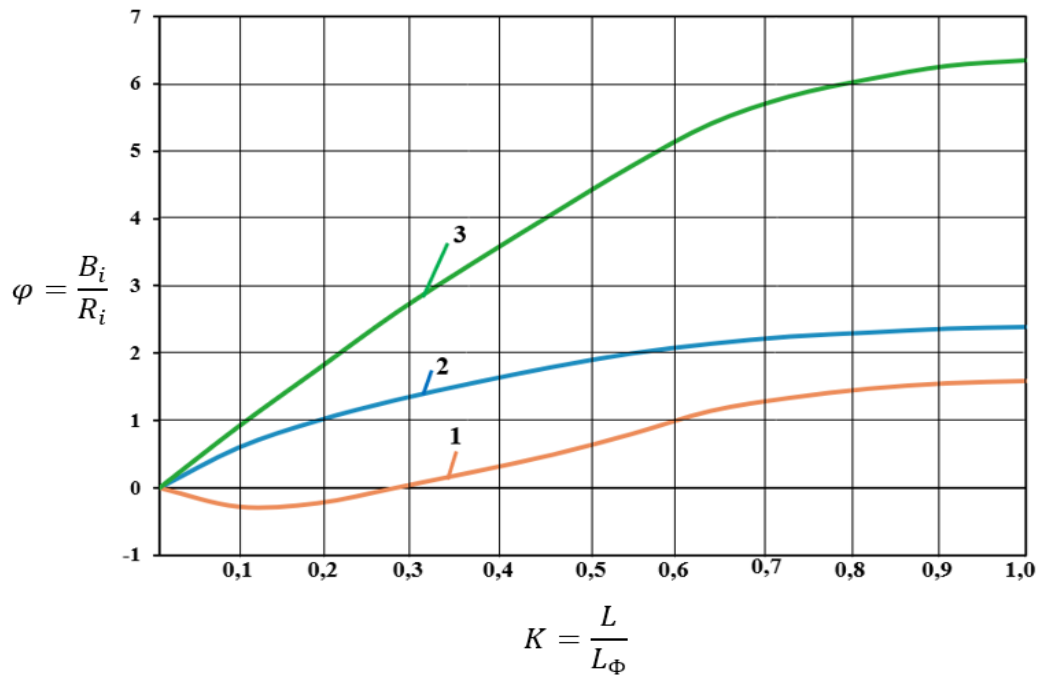
б

а – образец по схеме знакопеременной формовки; б - образец по схеме классической формовки

Рисунок 5.19 – Образцы торможенок очагов сворачивания ТЗ после знакопеременной (а) и классической (б) формовок для трубы  $\text{Ø}50 \times 1,5$  мм

Из рисунка 5.19 видно, что при формовании ТЗ по схеме однорядусного изгиба тенденция к образованию гофров на краях ТЗ больше, с диапазоном отклонения кромки  $\Delta_1 = (0 \div 5)$  и  $\Delta_2 = (0 \div 9)$  мм, а при формировании по схеме формовки со знакопеременном изгибом, кромка имеет прямолинейную линию, что снижается возможность образования гофров на кромках ТЗ [96].

Таким образом, на основании результатов теоретических расчетов и анализа экспериментальных результатов на реальных образцах материалов был построен график распределения угла сворачивания [83] - рисунок 5.20 в зависимости от углов центральной и периферийной частей заготовки, а также суммарного угла сворачивания. График на рисунке 5.20 позволяет рассчитать уголгиба ТЗ для труб малого и среднего сортамента.



1 – центральный угол ТЗ, рад; 2 – периферийный угол ТЗ, рад; 3 - суммарный угол общее ТЗ, рад

Рисунок 5.20 – График распределение углов сворачивания ТЗ со знакопеременным изгибом центральной части для производства электросварных труб малого и среднего диаметра

## 5.5 Выводы

1) В рамках подготовки к экспериментальному процессу формовки со знакопеременным изгибом на формовочном стане ТЭСА 10–60 МИСИС выполнена разработка конструкторской документации и изготовлен новый комплект валкового инструмента для сварной трубы  $\text{Ø}50 \times 1,5$  мм.

Основные этапы подготовки эксперимента в линии формовочного стана включали:

- замену старого комплекта валков на новый со знакопеременным изгибом;
- настройка формовочных клетей и выравнивание нижних валков по прямолинейной нижней образующей;
- подготовку исходной полосовой заготовки ( $160 \times 1200 \times 1,5$  мм) из стали Ст3.

2) Проведена экспериментальная формовка ТЗ по разработанной знакопеременной схеме на участке открытых клетей, в результате чего была получена сформованная трубная заготовка.

3) Результаты эксперимента подтвердили, что характерные деформационные участки (участок контакта, участок внеконтакта, участок распружинивания) в виде плавных дуг, возникающих вдоль кромок ТЗ в процессе формовки, были уменьшены по сравнению с классической формовкой. Это свидетельствует о том, что использование знакопеременной схемы формовки повышает устойчивость процесса формовки и снижает эффект распружинивания поперечного профиля заготовки. Траектория кромки ТЗ демонстрирует плавное и равномерное изменение ширины и высоты в очаге сворачивания на всём участке открытых клетей формовочного стана ТЭСА 10–60.

4) В результате проведённого комплексного исследования, включающего анализ влияния амплитуды знакопеременной формовки на остаточную кривизну профиля заготовки, разработку методики расчёта геометрических параметров процесса формовки, а также экспериментальную проверку знакопеременной формовки с новым комплектом валкового инструмента, были установлены кривые распределение углов сворачивания ТЗ со знакопеременным изгибом центральной части для производства электросварных труб малого и среднего сортамента.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1) В условиях опытного ТЭСА 10–60 НИТУ МИСИС для трубы  $\text{Ø}50 \times 1,5$  мм определены значения радиусов и углов формовки для рабочих сечений калибров знакопеременной формовки. Расчет продольных деформаций по фиксированным волокнам ТЗ по очагу деформаций показал, что значения продольных деформаций не превышают допустимые значения для данного типа размера трубы.

В результате анализа геометрических схем с ниспадающим осевым волокном ТЗ установлено, что оптимальная схема формовки, обеспечивающая минимальное растяжение кромок (0,088%), достигается при угле касательной  $\theta = 50^\circ$  и высоте подъема кромки  $H = -34,52$  мм. Данные параметры способствуют снижению деформации растяжения кромок ТЗ, что подтверждает устойчивость процесса формоизменения заготовки в клетях формовочного стана, минимизируя риск возникновения дефектов и обеспечивая стабильность формовки.

2) Экспериментально установлена зависимость между амплитудой знакопеременной формовки (в диапазоне от отрицательной до положительной кривизны) и степенью снижения распружинивания трубных заготовок. Увеличение амплитуды деформации, например, при переходе от формовки в одном калибре ( $R=140$  мм) к формовке в двух калибрах ( $R=140 \rightarrow 71$  мм), приводит к увеличению остаточной кривизны образцов после упругого восстановления: распружинивания снижается с 12,06–16,29% до 2,33–6,72%. Таким образом контроль распружинивания ТЗ достигается за счёт регулирования амплитуды знакопеременного изгиба ТЗ в клетях формовочного стана.

3) Разработана методика расчета геометрических параметров профиля ТЗ для знакопеременной формовки, на основе анализа распределения кривизны ТЗ, которая позволяет рассчитать радиусы, углы, ширины и высоты как для отдельных участков профиля (центральная и периферийные), так и для полного сечения заготовки по всем клетям формовочного стана ТЭСА. По разработанной методике рассчитаны геометрические параметры для знакопеременной формовки для трубы  $\text{Ø}50 \times 1,5$  мм. Проанализировано деформированное состояние ТЗ по всему очагу сворачивания.

4) Разработана методика расчёта геометрических параметров валкового инструмента для непрерывной знакопеременной формовки, позволяющая определять все необходимые геометрические параметры для открытых клеток полного и неполного контакта, закрытых клеток и эджерных клеток формовочного стана ТЭСА. По разработанной методике рассчитаны геометрические параметры комплекта валкового инструмента для трубы  $\text{Ø}50 \times 1,5$  мм для экспериментальной установки ТЭСА 10–60.

5) Для трубы  $\text{Ø}50 \times 1,5$  мм и компоновки формовочного стана ТЭСА 10–60 выполнены расчёты энергосиловых характеристик процесса непрерывной знакопеременной формовки. Результаты анализа показали, что усилие сопротивления перемещения полосы оказывает незначительное снижение на тянущие усилия через калибры, требуемые для деформирования ТЗ. При этом в каждой приводной клетке тянущие усилия существенно превышают силы сопротивления перемещения полосы, что свидетельствует о стабильности и управляемости процесса формовки.

б) Проведена экспериментальная знакопеременная формовка трубы  $\text{Ø}50 \times 1,5$  мм на экспериментальном ТЭСА 10–60 НИТУ МИСИС.

Результаты эксперимента подтвердили, что характерные деформационные участки (участок контакта, участок внеконтакта, участок распруживания) в виде плавных дуг, возникающих вдоль кромок ТЗ в процессе формовки, были уменьшены по сравнению с классической формовкой. Это свидетельствует о том, что использование знакопеременной схемы формовки повышает устойчивость процесса формоизменения ТЗ и снижает эффект распруживания поперечного профиля заготовки. Траектория кромки ТЗ демонстрирует плавное и равномерное изменение ширины и высоты в очаге сворачивания на всём участке открытых клеток формовочного стана опытного ТЭСА 10–60.

Анализ формоизменения центрального участка ТЗ, где реализуется знакопеременная формовка, показывает, что последовательное прохождение ТЗ через участок открытых клеток демонстрирует эволюцию деформационного процесса: от пластической деформации с частичным распруживанием в начальных клетках до устойчивого пластического формоизменения в завершающих. Это подтверждает эффективность применения технологии знакопеременной формовки для достижения требуемых геометрических параметров трубной заготовки.

7) В результате проведённого комплексного исследования, включающего анализ влияния амплитуды знакопеременной формовки на остаточную кривизну профиля ТЗ, разработку методики расчёта геометрических параметров процесса формовки, а также экспериментальную проверку знакопеременной формовки с новым комплектом валкового инструмента, были установлены зависимости распределения радиусов сворачивания ТЗ при знакопеременной формовке для производства электросварных труб малого и среднего диаметра.

## Список литературы

- [1] “Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям,” в *ИТС 27–2023 Производство изделий дальнейшего передела черных металлов*, Москва, 2023, p. 527.
- [2] А. В. Серебряков и Д. А. Павлов, “Технология производства сварных труб,” Уральский федеральный университет, 2020, ch. 5, pp. 61–71.
- [3] В. М. Друян, Ю. Г. Крупман, Л. С. Ляховецкий, И. Грубер, и Ф. Кёвеш, “Производство стальных труб,” Москва: Металлургия, 1989, ch. 4, pp. 182–196.
- [4] И. Н. Потапов, А. П. Коликов, и В. М. Друян, “Теория трубного производства,” Москва: Металлургия, 1991, ch. 9, pp. 357–414.
- [5] В. А. Фадеев, “Совершенствование процесса непрерывной валковой формовки на основе исследования контактных условий трубной заготовки с инструментом,” Диссертация, Национальный исследовательский технологический университет, Москва, 2021.
- [6] D. A. Mkrtychian and O. O. Baryshnikova, “Innovation Method of Production of Extremely-Thin-walled Welded Tubes on the Tube-electric Welding Machine TESA 10-20,” 2020. Doi: 10.18178/IJMERR.9.12.1584-1590.
- [7] A. G. Kolesnikov, D. S. Cherepanov, A. V Chekulaev, and M. O. Mironova, “Analysis of Drive Mechanisms for the Working Stand in Periodic Cold-Rolled Pipe Mills,” *Metallurgist*, vol. 61, pp. 1102–1107, 2018.
- [8] O. V Sokolova and A. A. Moiseev, “Precise Shaping of Thin-Walled Electrowelded Pipe,” *Steel in Translation*, vol. 48, no. 5, pp. 320–322, 2018, Doi: 10.3103/S0967091218050108.
- [9] S. V Samusev, A. V Kondrushin, and V. A. Fadeev, “Deformation during Continuous Forming of Longitudinal Welded Pipes,” *Springer*, 2022, Doi: 10.3103/S0967091222010211.
- [10] A. P. Kolikov, D. Y. Zvonarev, S. O. Ti, and T. Y. Sidorova, “Optimization of the Processes of Forming and Welding of Large-Diameter Pipes with the Help of Mathematic Simulation,” *Metallurgist*, vol. 64, no. 1–2, pp. 153–168, May 2020, Doi: 10.1007/S11015-020-00981-2.
- [11] V. Shinkin, “Calculation of technological parameters of O-forming press for manufacture of large-diameter steel pipes,” *rudmet.net*, 2017, Accessed: Dec. 03, 2024. [Online]. Available: [https://rudmet.net/media/articles/Article\\_CIS\\_vol.13\\_17\\_pp.33-37\\_1.pdf](https://rudmet.net/media/articles/Article_CIS_vol.13_17_pp.33-37_1.pdf)
- [12] A. S. Ushakov and L. A. Kondratov, “On the Production of Steel Pipes,” *Steel in Translation*, vol. 50, no. 10, pp. 713–725, 2020, Doi: 10.3103/S0967091220100125.

- [13] A. P. Kolikov, A. S. Leletko, D. B. Matveev, S. A. Kulyutin, and S. V. Kadil'nikov, "Residual stress in welded pipe," *Steel in Translation*, vol. 44, no. 11, pp. 808–812, 2014, Doi: 10.3103/S0967091214110096.
- [14] А. С. Килов и Р. Ш. Мансуров, "Производство заготовок. трубы," в *Книга 4*, Оренбург, 2007, pp. 27–34.
- [15] M. A. Tovmasyan, S. V Samsuev, T. Yu. Sidorova, and V. T. Nguyen, "Study of Changes in the Shape of a Pipe Blank Taking into Account the Peculiarities of Contact Interaction with a Deforming Tool during JCOE Molding in the TESA 1420 Line," *Steel in Translation*, vol. 53, no. 11, pp. 938–944, 2023, Doi: 10.3103/S0967091223110323.
- [16] M. M. Kasaei, H. M. Naeini, R. A. Tafti, and M. S. Tehrani, "Prediction of maximum initial strip width in the cage roll forming process of ERW pipes using edge buckling criterion," *J Mater Process Technol*, vol. 214, no. 2, pp. 190–199, 2014, Doi: 10.1016/j.jmatprotec.2013.08.012.
- [17] В. Н. Данченко, А. П. Коликов, Б. А. Романцев, и С. В. Самусев, "Технология трубного производства," Moscow: Pipe Production Technology, 2002, p. 640.
- [18] А. А. Богатов *et al.*, "Электросварные холодно деформированные труб," Москва: Металлургия, 1991, ch. 2, pp. 17–39.
- [19] Г. И. Гуляев и С. Л. Войцеленок, "Качество электросварных труб," Москва: Металлургия, 1978.
- [20] А. П. Коликов и Б. А. Романцев, "Теория обработки металлов давлением," в *Учебник*, Москва: МИСис, 2015, pp. 362–387.
- [21] И. Н. Потапов, А. П. Коликов, В. Н. Данченко, В. В. Фролочкин, А. Н. Зеленцов, и В. В. Горбунов, "Технология производства труб," Москва: Металлургия, 1994, ch. 14–16, pp. 355–436.
- [22] К. ИТЦ, "Схема производства труб - ИТЦ." [Online]. Available: <https://www.ecmarketing.ru/wiki/1045/>
- [23] В. А. Авдеев, В. М. Друян, и Б. И. Кудрин, "Участки производства сварных труб." [Online]. Available: <http://engineeringssystem.ru/proektirovanie-metallurgicheskikh-zavodov/uchastki-proizvodstva-svarnih-trub.php>
- [24] В. Юсупов, А. Колобов, К. Акопян, М. Селезнев, и М. Соминин, "Совершенствование технологии производства электросварных прямошовных труб (Сообщение 2)," *Сталь*, 2015.
- [25] K. Nakajima, W. Mizutani, S. Sasahira, M. Shiraishi, and K. Onda, "Development of New Vertical Roll Forming Process for ERW Pipe," 1980.



- [26] V. Yusupov, A. Kolobov, K. Akopyan, M. Seleznev, and M. Sominin, "Improving the production of electrowelded straight-seam pipe. Part 2," *Steel in Translation*, vol. 45, no. 12, pp. 975–977, Dec. 2015, Doi: 10.3103/S0967091215120165.
- [27] W. J. Chung, M. H. Lee, I. M. Park, B. M. Kim, and J. K. Kim, "Roll for roll forming and method therefore," US 2004/0216502 A1, 2004
- [28] J. Cheng, J. Cao, J. Zhao, J. Liu, R. Zhao, and S. Liu, "The flower pattern and rolls design for ERW pipes with the different specification in the flexible roll forming process," *Thin-Walled Structures*, vol. 154, Sep. 2020, Doi: 10.1016/j.tws.2020.106809.
- [29] L. Qiu, S. Zhang, Z. Wang, X. Hu, and X. Liu, "A robust optimization design method for sheet metal roll forming and its application in roll forming circular cross-section pipe," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 103, no. 105, pp. 2903–2916, Aug. 2019, Doi: 10.1007/s00170-019-03773-4.
- [30] В. В. Стружанов и Н. В. Бурмашева, "Теория Упругости: Основные Положения Учебное Пособие," Екатеринбург Издательство Уральского университета, 2019.
- [31] Z. W. Han, C. Liu, W. P. Lu, L. Q. Ren, and J. Tong, "Experimental investigation and theoretical analysis of roll forming of electrical resistance welded pipes," *J Mater Process Technol*, vol. 145, no. 3, pp. 311–316, 2004, Doi: 10.1016/j.jmatprotec.2003.07.010.
- [32] J. Jiang, D. Li, Y. Peng, and J. Li, "Research on strip deformation in the cage roll-forming process of ERW round pipes," *J Mater Process Technol*, vol. 209, no. 10, pp. 4850–4856, Jun. 2009, Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.01.011>.
- [33] J. Cao, X. Wang, K. Ruan, J. Cheng, Z. Wei, and R. Zhao, "Numerical simulation research on UDF flexible roll forming of multi-specification thin-walled circular tubes," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 127, pp. 4503–4517, Jan. 2023, Doi: 10.21203/rs.3.rs-2425277/v1.
- [34] Y. Matveev and Ya. L. Mvatkin, "Kalibrovka instrumenta trubnykh stanov [Pipe mills tool alignment]," Moscow: Metallurgiya, 1970, p. 480.
- [35] В. А. Рымов, П. И. Полухин, и И. Н. Потапов, "Совершенствование производства сварных труб," Vol. 312, Москва: Металлургия, 1983, p. 286.
- [36] Н. Дмитрий, С. Ольга, и Л. Антон, "Обеспечение устойчивости кромок трубной заготовки при непрерывной валковой формовке," *CADMASTER*, Vol. 3, pp. 34–37, 2016.
- [37] Wang, "Method for roll forming steel pipes, and equipment for same," US 6,212,925 B1, 2001
- [38] H. Kenji, K. Yasuo, and S. Daigo, "Forming method and forming stand for welded pipes," 5,704,243, 1996

- [39] A. Inokuma, J. Yin, and T. Akai, "Forming method and forming device," 2015
- [40] M. Tanimoto *et al.*, "Outline of New Forming Equipment for Hikari 24" ERW Mill," *NIPPON STEEL TECHNICAL REPORT*, vol. 90, 2004.
- [41] R. Kuramoto, A. Okamoto, and T. Tomino, "Forming roll, forming process and its apparatus in the ppe mill 30 foreign application priority data," 4,770,019, 1986
- [42] M. Farzin, M. Salmani Tehrani, and E. Shameli, "Determination of buckling limit of strain in cold roll forming by the finite element analysis," *J Mater Process Technol*, vol. 125, no. 126, pp. 626–632, 2002, Doi: 10.1016/S0924-0136(02)00357-6.
- [43] M. S. Tehrani, P. Hartley, H. M. Naeini, and H. Khademizadeh, "Localised edge buckling in cold roll-forming of symmetric channel section," *Thin-Walled Structures*, vol. 44, no. 2, pp. 184–196, 2006, Doi: 10.1016/j.tws.2006.01.008.
- [44] M. M. Kasaei, H. M. Naeini, M. S. Tehrani, and R. A. Tafti, "Numerical and experimental investigation of strip deformation in cage roll forming process for pipes with low ratio of thickness/diameter," in *AIP Conference Proceedings*, 2010, pp. 593–598. Doi: 10.1063/1.3552512.
- [45] С. В. Самусев и В. А. Фадеев, "Исследование процесса непрерывной формовки труб заготовки в различных компоновках формовочного стана ТЭСА," *Производство проката*, Vol. № 5. С, pp. 3–8, 2019, Doi: 10.31044/1684-257X-0-2019-5-3-8.
- [46] D. N. Novokshonov, O. V Sokolova, and A. E. Lepestov, "Improving the deformation of tube billet in continuous roll forming," *Springer*, vol. 49, pp. 345–349, 2019, Doi: 10.3103/S0967091219050103.
- [47] S. V Samusev and **V. T. Nguyen**, "Study of the Process of Continuous Forming of Welded Pipes in the TESA Line Using Coiling Schemes with Alternating Bending of the Pipe Billet," *Steel in Translation*, vol. 54, no. 9, pp. 885–889, 2024, Doi: 10.3103/S0967091224701663.
- [48] S. Hajiahmadi, H. M. Naeini, H. Talebi-Ghadikolaee, R. Safdarian, and A. Zeinolabedin-Beygi, "Effect of anisotropy on spring-back of pre-punched profiles in cold roll forming process: an experimental and numerical investigation," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 129, no. 9–10, pp. 3965–3978, 2023, Doi: 10.1007/s00170-023-12516-5.
- [49] BF Sun and YH Jin - Zhongguo Shi You Daxue Xuebao, "Simulation analysis of shaping process of high frequency longitudinal electric resistance welded pipe," *Journal of China*, vol. 4, pp. 123–126, 2010.

- [50] J. R. Cho, S. J. Moon, Y. H. Moon, and S. S. Kang, "Finite element investigation on spring-back characteristics in sheet metal U-bending process," *J Mater Process Technol*, vol. 141, no. 1, pp. 109–116, 2003, Doi: 10.1016/S0924-0136(03)00163-8.
- [51] G. Nefussi, L. Proslier, and P. Gilormini, "A simulation of cold-roll forming for elastoplastic materials," *Int J Mech Sci*, vol. 40, no. 1, pp. 15–25, 1998, Doi: 10.1016/s0020-7403(97)00027-1.
- [52] M. Samuel, "Experimental and numerical prediction of springback and side wall curl in U-bendings of anisotropic sheet metals," *J Mater Process Technol*, vol. 105, no. 3, pp. 382–393, 2000, Doi: 10.1016/S0924-0136(00)00587-2.
- [53] V. A. Rymov, P. I. Polykhin, and Potapov, "Improvement of Welded Pipe Production," Moscow: Metallurgiya, 1983, p. 307.
- [54] Tatjana. V Brovman, "Sheet Bending Deformation in Production of Thin-Walled Pipes," *World Journal of Mechanics*, vol. 04, no. 12, pp. 363–370, 2014, Doi: 10.4236/wjm.2014.412035.
- [55] S. V Samusev, **V. T. Nguyen**, and T. Yu. Sidorova, "Parameters for Continuous Molding of a Pipe Billet with an Alternating Bending and Curvilinear Trajectory of Axial Grain," *Metallurgist*, vol. 67, no. 1–2, pp. 148–153, 2023, Doi: 10.1007/s11015-023-01500-9.
- [56] S. V Samusev, G. P. Zhigulev, V. A. Fadeev, and K. S. Manakhov, "Shaping of pipe blanks on specialized bending equipment," *Steel in Translation*, vol. 46, no. 3, pp. 169–172, Mar. 2016, Doi: 10.3103/S0967091216030128.
- [57] A. V Kozhevnikov and V. S. Yusupov, "Methodology of Designing Cold Rolling Technology Preventing Vibrations on Rolling Mills," *Steel in Translation*, vol. 51, no. 5, pp. 330–334, May 2021, Doi: 10.3103/S0967091221050065.
- [58] V. Shinkin, "Preliminary straightening of steel strip," *Chernye Metally*, vol. No 5, pp. 34–40, 2018.
- [59] S. V Samusev, V. A. Fadeev, and T. Y. Sidorova, "Development of Effective Roll-Pass Designs for Production of Longitudinally Welded Pipes of Small and Medium Diameters," *Metallurgist*, vol. 64, no. 7–8, pp. 658–664, Nov. 2020, Doi: 10.1007/s11015-020-01042-4.
- [60] W. Zhang, G. Zhao, Z. Zhai, C. Zhao, and Q. Fu, "Calculation method of spatial configuration of tube billet in roll forming process of a high strength steel drive shaft tube," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 97, no. 9–12, pp. 3339–3358, Aug. 2018, Doi: 10.1007/s00170-018-2209-1.
- [61] S. V. Samusev and V. A. Fadeev, "Continuous shaping of welded straight-seam pipe in the open stands of a pipe-welding system," *Springer*, 2019, Doi: 10.3103/S0967091219070118.

[62] S. V. Samusev, T. Yu. Sidorova, and **V. T. Nguyen**, “Analysis of skelp deformation zones for the down trajectory of electrically welded pipes forming,” *Web of Conferences*, 2023, Doi: 10.1051/e3sconf/202340211024.

[63] S. V Samusev, A. S. Aleshchenko, and V. A. Fadeev, “Simulation of the process of continuous forming of straight-seam welded pipes on the basis of ‘Tesa 10-50 trainer,’” *Izvestiya Ferrous Metallurgy*, vol. 61, no. 5, pp. 378–384, 2018, Doi: 10.17073/0368-0797-2018-5-378-384.

[64] “ИТС 27–2017. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Производство изделий дальнейшего передела черных металлов’ (утв. Приказом Росстандарта от 15.12.2017 N 2837),” 2017.

[65] С. В. Самусев и В. А. Фадеев, “Конструкция трубоэлектросварочного агрегата 30–50 и определение кинематических и силовых параметров процесса формовки прямошовных сварных труб,” *Механическое оборудование металлургических заводов*, Vol. 1, №. 12, pp. 3–4, 2019.

[66] “Сборник докладов Международного научно-технического конгресса ‘ОМД 2014. Фундаментальные проблемы. Инновационные материалы и технологии,” Москва: МИСис, 2014, p. 514.

[67] S. V. Samusev, T. Yu. Sidorova, and **V. T. Nguyen**, “Modern Methods Analysis of Longitudinally Welded Pipes Production in the Continuous Forming Mill TESA10-50 (Pipe Electrical Welding Unit) of the Different Types,” *Springer*, 2023, Doi: 10.3103/S0967091223110281.

[68] С. В. Самусев, “Повышение эффективности производства сварных труб на основе развития теории непрерывного формоизменения и создания способов и устройств компактных станов ТЭСА,” 2000.

[69] Ж. Б.Д., З. Л.И., О. Я.У., и Ч. А.П., *Производство труб электросваркой методом сопротивления / Под ред. А. П. Чекмарева*. Металлургиздат, 1953.

[70] G. Masing, “Zur Heyn’schen Theorie der Verfestigung der Metalle durch verborgen elastische Spannungen,” *Wissenschaftliche Veröffentlichungen aus dem Siemens-Konzern*, pp. 231–239, 1923, Doi: 10.1007/978-3-642-99663-4\_17.

[71] J Baushinger - zivilingenieur, “Ueber die Veränderung der Elasticitätsgrenze und des Elasticitätsmoduls verschuedener Metalle,” *Zivilingenieur.*, vol. 27, pp. 289–348, 1881.

[72] J Bauschinger, “Ueber die Veränderung der elasticitätsgrenge und der festigkeit des eisens und stahls durch strecken und quetschn, durch erwarmen und abkühlen und durch oftmal wiederholte beanspruchung,” *Mittheilungen aus dem Mechanisch-Technischen Laboborium der Koniglichen Technischen Hochschule in Munchen.*, vol. 13, pp. 1–115, 1886.

[73] R. R. Adigamov, V. A. Andreev, S. O. Rogachev, E. S. Fedotov, G. E. Khadeev, and V. S. Yusupov, “Bauschinger effect during alternating deformation,” *Izvestiya Ferrous Metallurgy*, vol. 65, no. 7, pp. 455–466, 2022, Doi: 10.17073/0368-0797-2022-7-455-466.

[74] В. А. Харитонов и Е. О. Малолеткова, “Влияние эффекта Баушингера на прочностные характеристики высокопрочных труб,” *Обработка сплошных и слоистых материалов*, Vol. 36, №. 1, pp. 28–33, 2010.

[75] ПА Линчевский, СВ Новожилов, и МБ Кудряков, “Совершенствование технологии обработки металлов резанием и пластическим деформированием с учетом использования эффекта Баушингера,” *Труды Одесского политехнического университета*, Vol. 2, pp. 73–76, 2008.

[76] X. Hu, C. Wei, H. Margolin, and S. Nourbakhsh, “The Bauschinger effect and the stresses in a strained single crystal,” *Scripta Metallurgica et Materiala*, vol. 27, no. 7, pp. 865–870, 1992, Doi: 10.1016/0956-716X(92)90407-6.

[77] R. King, R. W. Cahn, and B. Chalmers, “Mechanical behaviour of crystal boundaries in metals [7],” *Nature*, vol. 161, no. 4096, p. 682, 1948, Doi: 10.1038/161682a0.

[78] A Abel and H Muir, “The Bauschinger effect and discontinuous yielding,” *Philosophical Magazine*, vol. 26, pp. 489–504, 1972.

[79] СВ Грачев, ИД Казяева, и ДА Пумпянский, “Кинетика термической устойчивости эффекта Баушингера в холоднодеформированной стали,” *Физика металлов и металловедение*, Vol. 2, №. Т.97, pp. 104–107, 2004.

[80] БМ Ровинский и ВЛ Синайский, “О природе эффекта Баушингера,” *Известия АН СССР. Metallurgia и топливо*, vol. 6, pp. 137–141, 1959.

[81] L. M. Brown, “Orowan’s explanation of the Bauschinger effect,” *Scripta Metallurgica*, vol. 11, no. 2, pp. 127–131, 1977, Doi: 10.1016/0036-9748(77)90291-5.

[82] С. В. Самусев и V. А. Фадеев, “Физическое моделирование процесса непрерывной формовки сварных прямошовных труб на участке открытых валковых калибров ТЭСА,” *Металлургия*, Vol. 62, №. 7, pp. 531–538, 2019, Doi: 10.17073/0368-0797-2019-7-531-538.

[83] С. В. Самусев, А. Н. Фортунатов, и Н. В. Холодова, “Расчёт технологических параметров процессов в непрерывных ТЭСА и прочностные расчёты оборудования. Часть 1: сборник задач,” Выкса: Холодова Выксунский Филиал «НИТУ «МИСиС», 2016, p. 141.

[84] С. В. Самусев, В. А. Фадеев, А. Н. Фортунатов, и **В. Т. Нгуен**, “Расчет и анализ технических параметров процесса непрерывной формовки прямошовных труб в схемах

ТЭСА с применением знакопеременногогиба заготовки,” Выкса: Выксунский Филиал «НИТУ «МИСиС», 2023, р. 182.

[85] С. В. Самусев и А. Н. Фортунатов, “Расчёт и анализ технических параметров процесса непрерывной формовки сварных труб в линии ТЭСА,” Выкса: Выксунский Филиал «НИТУ «МИСиС», 2022, р. 160.

[86] С. В. Самусев, А. Н. Фортунатов, и А. И. Макарова, “Расчёт технологических параметров и оборудования для различных компоновок непрерывных ТЭСА,” Выкса: Выксунский Филиал «НИТУ «МИСиС», 2009.

[87] С. В. Самусев и А. Н. Фортунатов, “Методы расчёта напряженно-деформированного состояния при производстве сварных труб в линии ТЭСА: сборник задач/,” Выкса: Выксунский Филиал «НИТУ «МИСиС», 2008, р. 130.

[88] С. В. Самусев, А. Н. Фортунатов, Н. А. Фролова, и Н. Г. Пашков, “Методы расчёта калибровок инструмента и энергосиловых параметров процесса производства сварных труб в линии прессов и ТЭСА,” Выкса: Выксунский Филиал «НИТУ «МИСиС», 2006.

[89] С. В. Самусев, В. А. Фадеев, А. С. Будников, Т. Ю. Сидорова, и **В. Т. Нгуен**, “Расчет геометрических параметров трубной заготовки со знакопеременным изгибом в непрерывных ТЭСА,” RU2022680270, 2022

[90] R. V Golovkin and E. M. Krichevskii, “Proizvodstvo pryamoshovnykh trub na nepre-ryvnykh truboelektrosvarochnykh stanakh: uchebnoe posobie (Production of Straight-Seam Pipes on Continuous Electrically Welded Pipes: Manual),” Moscow: Metallurgiya, 1969.

[91] M. M. Kasaei and H. M. Naeini, “Comparison of strip deformation between the con- tour roll forming (CORF) process and cage roll forming (CARF) process of HFW pipes,” *3rd International Conference on Manufacturing Engineering*, no. June 2012.

[92] B. Wen and Roy. J. Pick, “Modelling of skelp edge instabilities in the roll forming of ERW pipe,” *Journal of Materials Processing Tech.*, vol. 41, no. 4, pp. 425–446, 1994, Doi: 10.1016/0924-0136(94)90006-X.

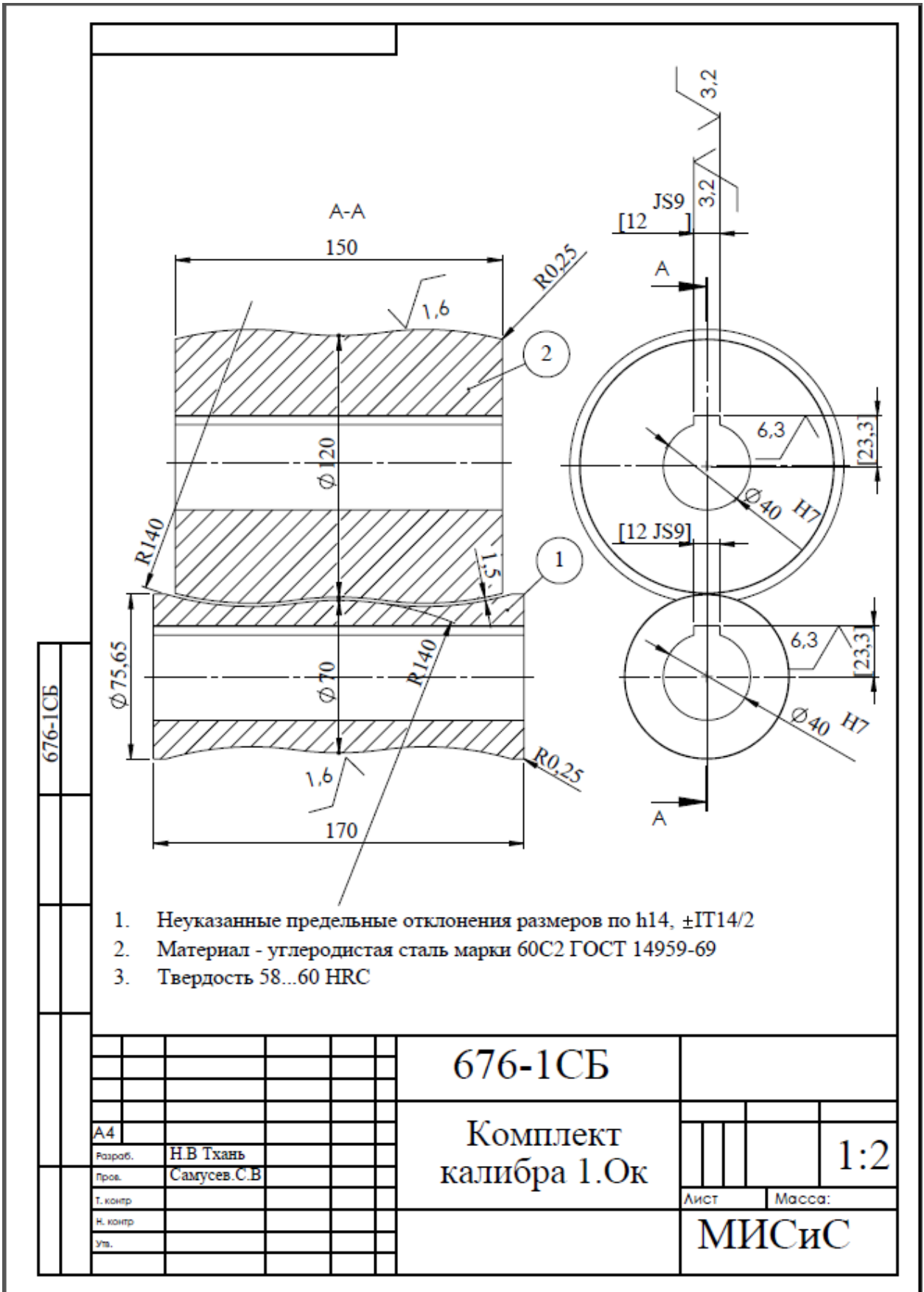
[93] V. S. Yusupov, A. V Kolobov, K. E. Akopyan, M. S. Seleznev, and M. A. Sominin, “Improving the production of electrowelded straight-seam pipe. Part 1,” *Steel in Translation*, vol. 45, no. 8, pp. 598–604, 2015, Doi: 10.3103/S0967091215080185.

[94] T. R. Walker and R. J. Pick, “Approximation of the axial strains developed during the roll forming of ERW pipe,” *Elsevier*, 1990, Doi: 10.1016/0924-0136(90)90140-P.

[95] К. С. Шибанов, “Творчество молодых — родному региону,” в *Сборник матери- алов X региональной межвузовской научно-практической конференции*, Выкса, 2023.

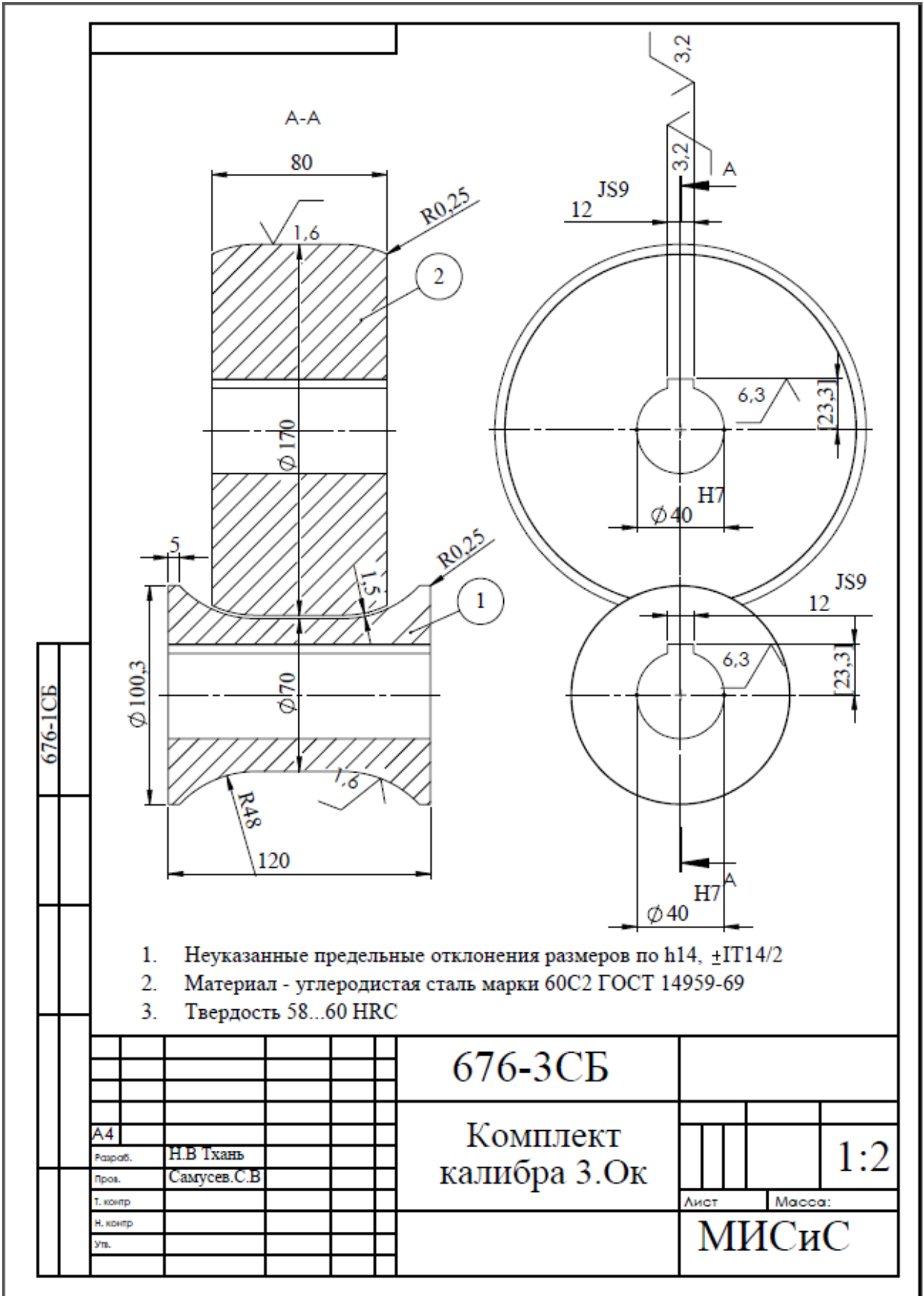
[96] Р. М. Абдуллин, “Пояснительная записка к выпускной квалификационной работе,” 2017, pp. 46–57.

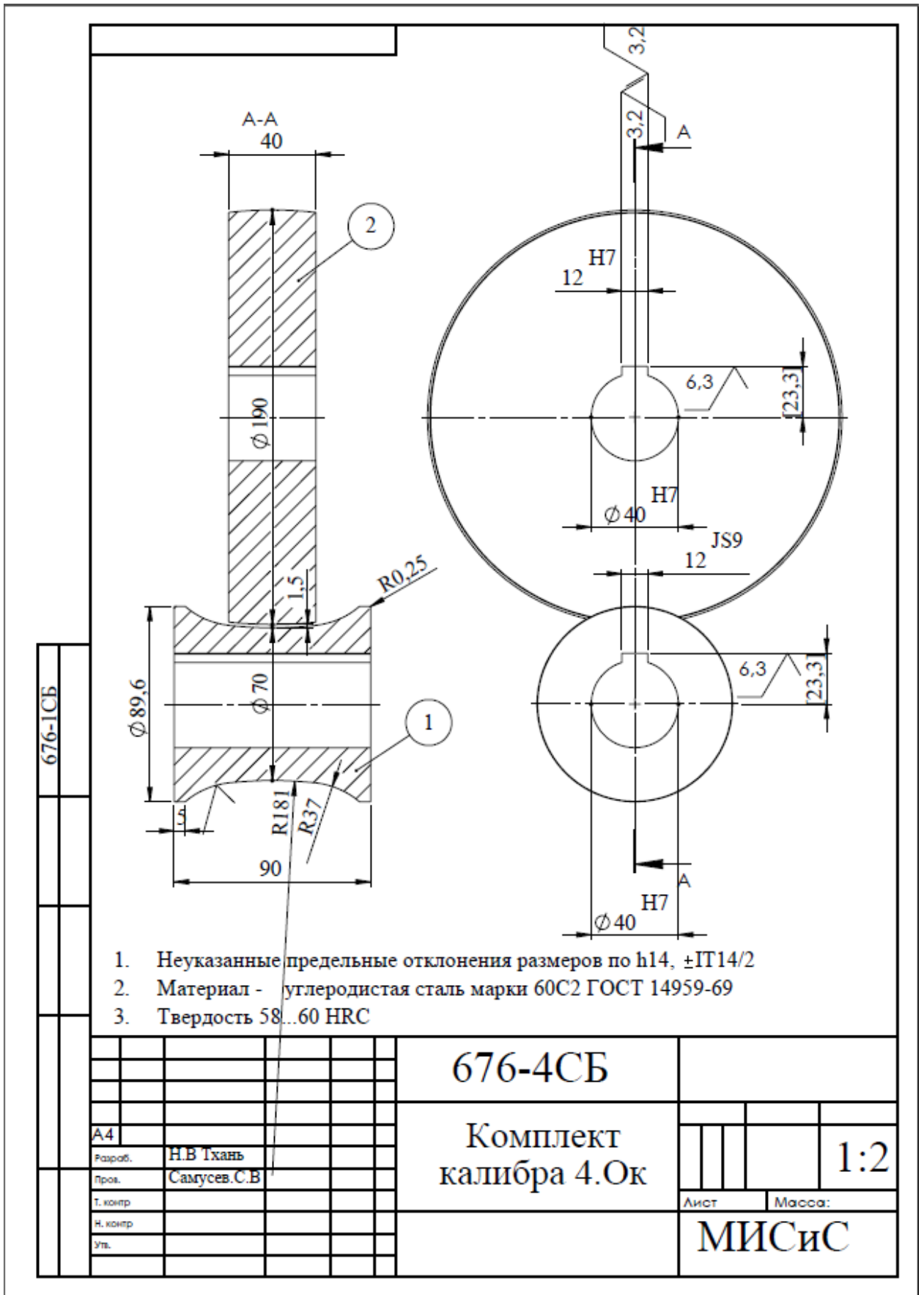
Приложение А











## Приложение В

Директор института

Экотехнологий и инжиниринга

НИТУ МИСИС

А.Я. Травянов

«...»...2025 г.

### Акт

Об использовании в учебном процессе материалов диссертации аспиранта кафедры Обработки металлов давлением Нгуена Вана Тхэна на тему «Исследование и разработка методик расчета процесса знакопеременной формовки и профилирования валкового инструмента непрерывных ТЭСА для производства труб малого и среднего диаметра»

Настоящий акт подтверждает, что на кафедре ОМД при подготовке бакалавров по направлению 15.03.02 «Технологические машины и оборудование» и 22.03.02 «Металлургия» (программа «Технологии материалов»), а также магистров по направлению 22.04.02 «Металлургия» (программа «Деформационная обработка металлов и сплавов») используются результаты теоретических и экспериментальных исследований, выполненных в рамках диссертационной работы Нгуен В.Т., Также применяется учебное пособие «Расчет и анализ технических параметров процесса непрерывной формовки прямошовных труб в схемах ТЭСА с применением знакопеременногогиба заготовки» (авторы: Самусев С.В., Фадеев В.А., Фортунатов А.Н., Нгуен В.Т.)

Указанные материалы используются при чтении лекций, проведении практических и лабораторных занятий по курсам «Технологии производства сплошных и полых изделий», «Теория и технология деформационной обработки металлов и сплавов», «Технологические процессы пластической обработки металлов и сплавов», при выполнении КНИР и выпускных квалификационных работ студентов бакалавриата и магистратуры.

Заведующий кафедрой

Обработки металлов давлением

А. С. Алешенко

Учёный секретарь кафедры

Обработки металлов давлением

Т. Ю. Сидорова

Научный руководитель

В. А. Фадеев