

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

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

Автореферат диссертации  
на соискание учёной степени кандидата технических наук

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

Москва - 2025

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **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, напряжённно-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 провести 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, напряжённно-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 клеток 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 и тормозящих усилий 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  $\text{Ø}50 \times 1,5 \text{ мм}$  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 объем диссертации**

Диссертационная работа изложена на 124 страницах и включает введение, пять глав с выводами по каждой из них. В тексте представлены 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.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** дано обоснование актуальности темы диссертационной работы, поставлены цель и основные задачи работы, обозначена научная новизна, практическая значимость и степень достоверности работы.

**В первой главе** представлен литературный обзор, в котором освещены теоретические и экспериментальные исследования, посвященные формоизменению ТЗ при её знакопеременной формовке. Также рассмотрены особенности компоновки валкового инструмента, применяемого в данном процессе, формовочных станов непрерывных ТЭСА.

**Во второй главе** представлен анализ геометрических и деформационных параметров знакопеременной формовки для прямолинейной и ниспадающей траекторий осевого волокна ТЗ в очаге сворачивания в условиях ТЭСА 10–60 НИТУ МИСИС.

Применение знакопеременной нагрузки при формовке труб из полосы целесообразно, так как при знакопеременной нагрузке снижается упругое разворачивание (распружинивание) заготовки и обеспечивается стабильность формоизменения ТЗ.

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.

В процессе формовки и сварки заготовки в сварочной клетки профиль заготовки должен стабильно и симметрично перемещаться в зоне сварочного стана, обеспечивая минимальное распружинивание. Упругое восстановление (распружинивание) заготовки, как правило, происходит асимметрично, что изменяет условия контакта заготовки с инструментом. Это может привести к смещению кромок и дефектам сварки профиля ТЗ.

При знакопеременной формовке увеличивается количество зон «растяжения-сжатия» даже в сечении профиля одного калибра. Схема формовки с применением знакопеременного изгиба центральной части заготовки, где ширина центральной части ( $B_{\text{ц}}$ ) составляет 20–25% ширины исходной полосы  $B_{\text{л}}$ , позволяет минимизировать распружинивание и повысить устойчивость процесса непрерывной формовки.

Данная схема ( $B_{ц} = 25\% \cdot B_{л}$ ) представлена на рисунке 1.

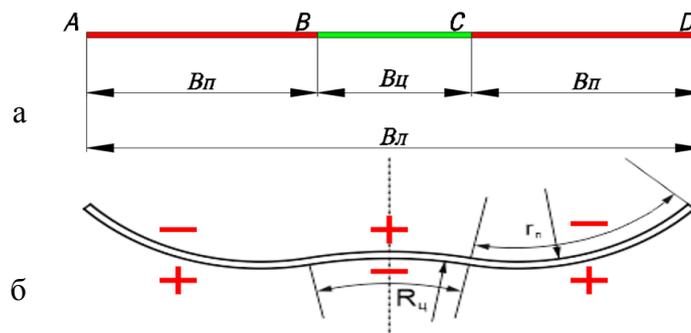
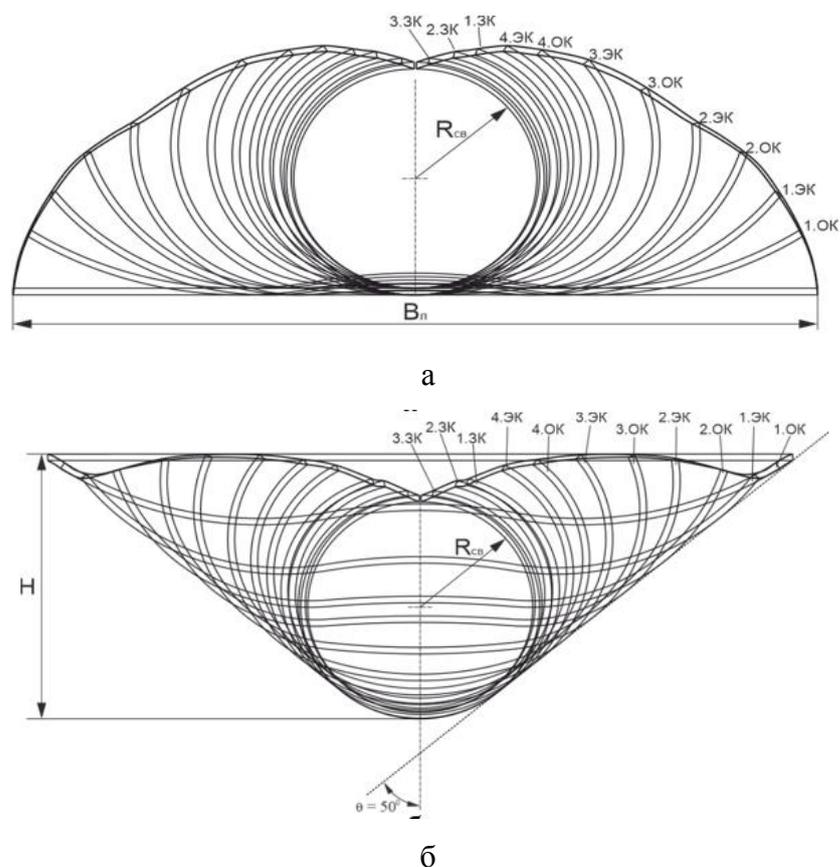


Рисунок 1 – Схема знакопеременной формовки: а - поперечное сечение исходной полосы; б - трубная заготовка со знакопеременным изгибом

Анализ знакопеременной формовки проводился в условиях ТЭСА 10–60 НИТУ МИСИС для типоразмера трубы  $\text{Ø}50 \times 1,5$  мм.

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.



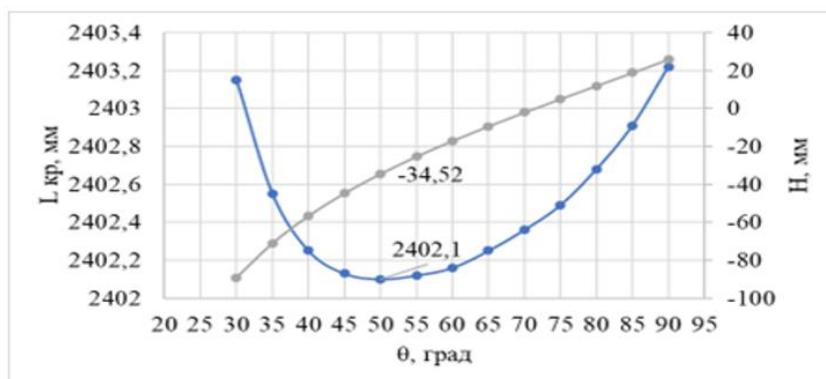
а – с прямолинейной траекторией осевого волокна;  
 б – с ниспадающей траекторией осевого волокна  
 Рисунок 2 – «Цветок» знакопеременной формовки

Расчет продольных деформаций показал, что наиболее опасным волокном по значениям продольных деформаций является кромка ТЗ.

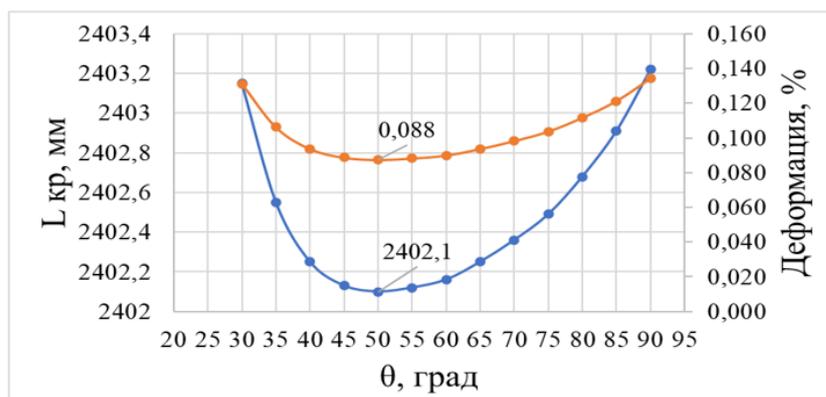
Для первого варианта установлено, что на участке между 3 ОК и 4 ОК клетями значения деформаций выходят за пределы допустимых (превышают на 0,05%).

Для второго варианта наиболее оптимальным является вариант формовки с углом касательной  $\theta = 50^\circ$  и высотой подъема  $H = -34,52$  мм, так как он обеспечивает наименьшую продольную деформацию, равную 0,088%.

Графики зависимости длины кромки ТЗ от угла касательной ( $\theta$ ) для трубы  $\text{Ø}50 \times 1,5$  мм, с осями высоты подъема ТЗ и продольной деформации кромки, приведены на рисунке 3.



а



б

Рисунок 3 – Графики зависимости длины кромки ТЗ от угла касательной ( $\theta$ ) для трубы  $\text{Ø}50 \times 1,5$  мм с дополнительными осями: а - высоты подъема ( $H$ );

б – продольная деформация кромки

**В третьей главе** представлены экспериментальные исследования знакопеременной формовки (размер заготовок:  $160 \times 300 \times 1,5$  мм, материал: сталь Ст3) на участке открытых клетей формовочного стана ТЭСА 10–60 НИТУ МИСИС и зависимость между амплитудой знакопеременной формовки (знакопеременная деформация) и остаточной кривизной профиля ТЗ после упругого восстановления.

Применение знакопеременной нагрузки при формовке труб из полосы целесообразно, так как при знакопеременной нагрузке снижается упругое разворачивание заготовки за счёт эффекта Баушингера и обеспечивается стабильность формоизменения ТЗ.

Природа механизма проявления эффекта Баушингера остаётся неоднозначной в объяснении из-за сложного взаимодействия совокупности факторов. На микроуровне это перераспределение дислокаций и текстурные изменения, на макроуровне - неоднородность деформации и остаточные напряжения.

Таким образом, с точки зрения изменения геометрических параметров ТЗ, исследование одного из следствий эффекта Баушингера - снижения упругого восстановления (распружинивания) после знакопеременной формовки - при различных режимах формовки позволит в полной мере оценить влияние режимов знакопеременной формовки на величину распружинивания.

Эксперимент проводили на опытном ТЭСА 10–60 в НИТУ МИСИС с использованием однорадиусной калибровки валкового инструмента. В рамках эксперимента ставилась задача зафиксировать геометрические параметры сформованных образцов и определить величину кривизны поперечного сечения заготовки в зависимости от радиуса валкового инструмента.

Исследования по классической (однорадиусной) формовке выполнялись на образцах 1.Т (формовка в первой клетке) и 2.Т (формовка в первой и во второй клетках). Эксперименты по знакопеременной формовке проводились на образцах 1.З/П (формовка в первой клетке) и 2.З/П (формовка в первой и во второй клетках).

Радиусы и углы калибров в первых двух клетках формовочного стана имеют следующие параметры: в первой клетке установлены калибры с радиусом  $R_1=140$  мм, углом  $\varphi_1=30^\circ$ , во второй клетке - калибры с радиусом  $R_2=70$  мм, углом  $\varphi_2=74^\circ$ .

Схемы маршрутов эксперимента по формоизменению трубных заготовок в процессах классической (однорядусной) и знакопеременной формовок в условиях ТЭСА 10–60 представлены на рисунке 4.

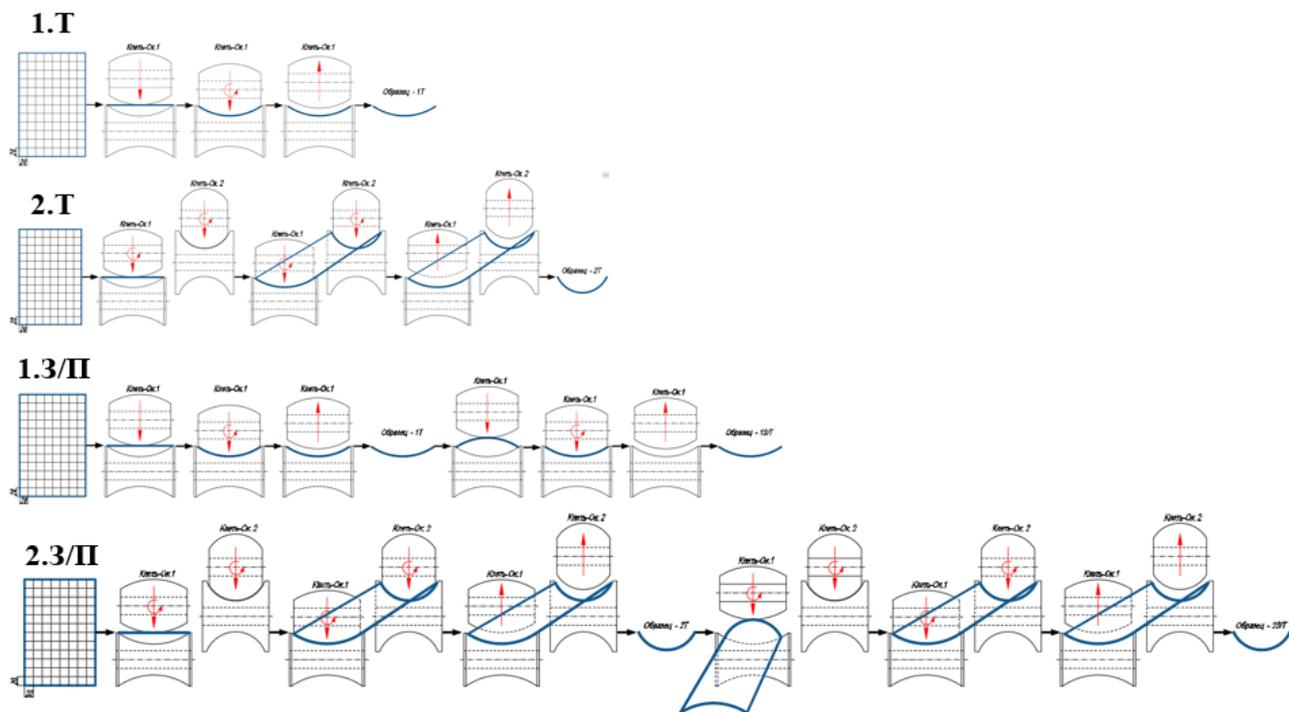


Рисунок 4 – Схемы маршрутов эксперимента по формоизменению трубных заготовок в процессах классической (однорядусной) (образцы 1.Т и 2.Т) и знакопеременной (образцы 1.3/П и 2.3/П) формовок в условиях ТЭСА 10–60

После формовки по каждому из маршрутов образцы были обработаны в девяти сечениях. Все образцы имеют характерные зоны формоизменения при непрерывной формовке: 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), которые показаны на рисунке 5.

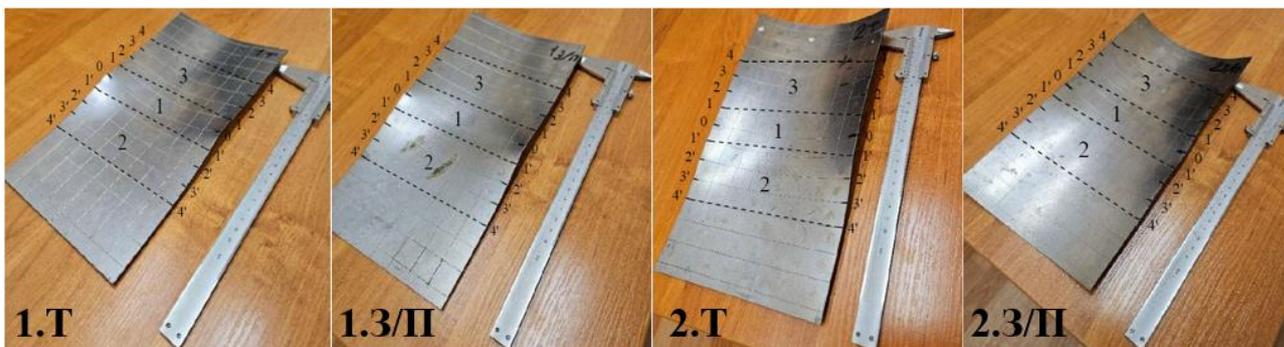


Рисунок 5 – Сформованные образцы: 1 – контактная зона деформации; 2 – внеконтактная зона деформации; 3 – зона распружинивания

Далее проводились измерения ширины (В) и высоты (h) полученных образцов в заданных сечениях. Затем рассчитывались радиусы кривизны (R) и величина, обратная радиусу (1/R), сформованных образцов, а также рассчитывалось распределение упругой и пластической зон по толщине заготовки.

На рисунке 6 показано распределение упругой и пластической деформаций по толщине образца.

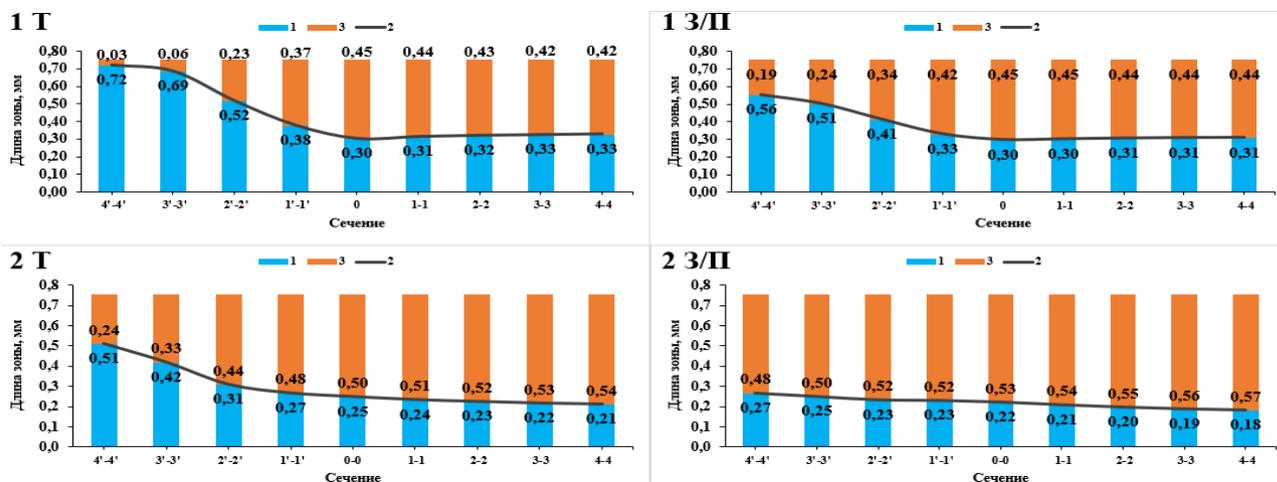
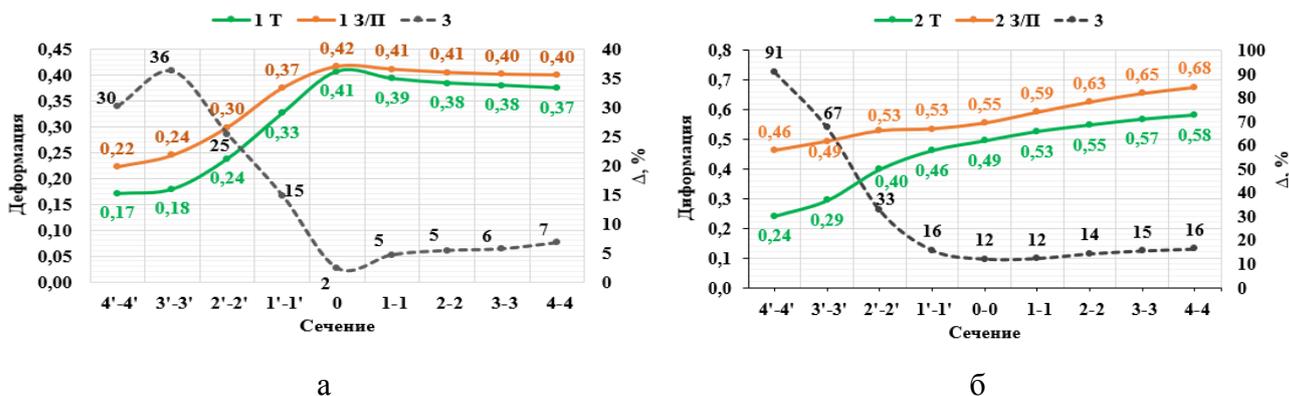


Рисунок 6 – Распределение упругой (1) и пластической (3) зон на половине толщины образца; граница между зонами (2): 1.Т, 1.3/П, 2.Т и 2.3/П

Из графиков на рисунке 6 видно, что в образце 1.Т упругая деформация в сечениях (4'-4'÷3'-3') составляет 91,82 % толщины, снижаясь до 50,58 % в сечениях (2'-2'÷1'-1'), что увеличивает распруживание после выхода из калибра. У образца 1.3/П в тех же сечениях (4'-4'÷3'-3') упругая зона меньше на 22,37 % (74,11 % толщины). На выходе из калибра ее упругая составляющая ниже, чем у 1.Т, на 2,77–8,05 %, а среднее значение по длине заготовки меньше на 8,60 %.

В образце 2.Т упругая деформация в сечениях (4'-4'÷3'-3') составляет 68,33–56,14 % толщины, а в сечениях (0-0÷4-4) – 33,38–28,39 %. У образца 2.3/П во всех сечениях упругая зона ниже половины толщины (35,79–24,42 %). Средняя упругая зона по толщине у образца 2.Т – 39,34 %, у образца 2.3/П – 29,46 %, что на 9,88 % меньше.

Распределение поперечной деформации по сечениям и разность деформаций по сечениям ТЗ, представленные на рисунке 7, показывает преимущество знакопеременной формовки (рисунок 7б) по сравнению с классической однорадиусной формовкой (рисунок 7а). Установлено, что величина поперечной деформации для образцов 1.3/П и 2.3/П превышает значения, характерные для образцов 1.Т и 2.Т. Это свидетельствует об интенсивном развитии поперечной пластической деформации при циклическом знакопеременном воздействии.



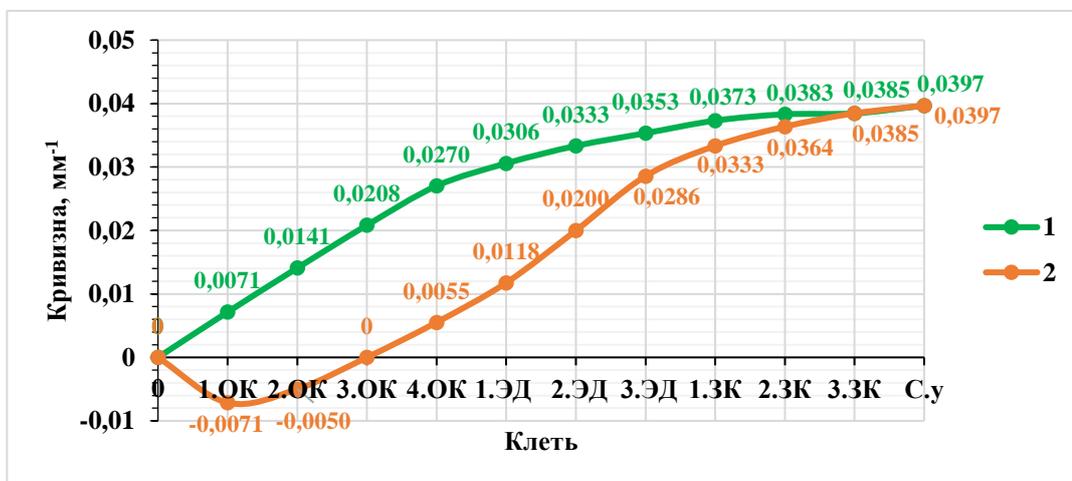
а – образцы 1.Т и 1.3/П; б – образцы 2.Т и 2.3/П

Рисунок 7 – Распределение поперечной деформации по сечениям и разность деформаций

Зависимость между амплитудой знакопеременной формовки и остаточной кривизной профиля ТЗ после упругого восстановления, показывает что 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: распружинивание 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.

**В четвёртой главе** представлены методики расчёта формоизменения ТЗ и профилирования валкового инструмента непрерывных ТЭСА для производства труб малого и среднего диаметра, а также расчёта энергосиловых характеристик процесса непрерывной знакопеременной формовки.

Основой расчёта геометрических параметров ТЗ при знакопеременной формовке для трубы  $\varnothing 50 \times 1,5$  мм является график распределения кривизны ТЗ (рисунок 8).



1 – периферийный участок; 2 – центральный участок

Рисунок 8 – Распределение кривизны ТЗ со знакопеременным изгибом по клетям формовочного стана ТЭСА 10–60 для трубы  $\varnothing 50 \times 1,5$  мм

Характерные типы профилей заготовки, формирующие очаг деформации по длине сворачивания ТЗ и «цветок» формовки представлены на рисунке 9.

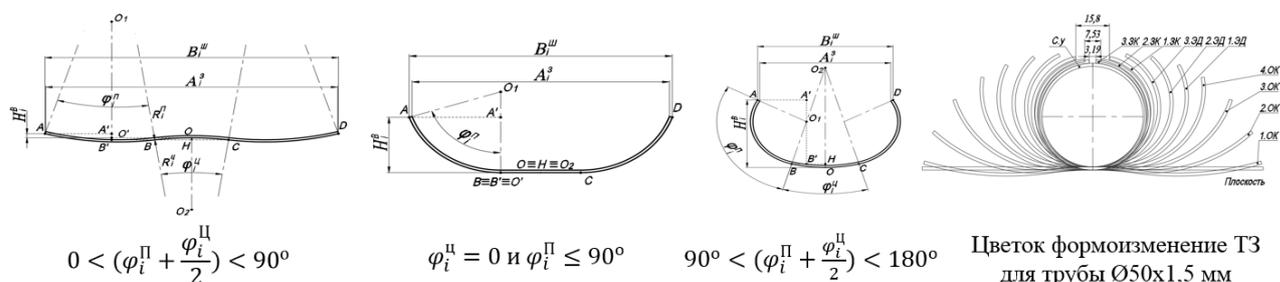


Рисунок 9 – Характерные типы профилей заготовки по длине очага сворачивания ТЗ и «цветок» формовки

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  $B_i^{III}$ , высота  $H_i^B$  и зазор  $A_i^3$ , мм), применяемой для знакопеременной формовки, рассчитываются по следующим формулам в зависимости от типа профиля заготовки:

Для клеток 1.ОК и 2.ОК с диапазоном углов профиля ТЗ  $0 < (\varphi_i^{II} + \frac{\varphi_i^{II}}{2}) < 90^\circ$ :

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

Для клетки 3.ОК с диапазоном углов профиля ТЗ  $\varphi_i^{II} = 0$  и  $\varphi_i^{II} \leq 90^\circ$

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

Для клетки 4.ОК с диапазоном углов профиля ТЗ с  $90^\circ < (\varphi_i^{II} + \frac{\varphi_i^{II}}{2}) < 180^\circ$ :

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

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

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

Основные геометрические параметры верхних и нижних валков, показанные на примере первой открытой клетки (1.ОК) (рисунок 10).

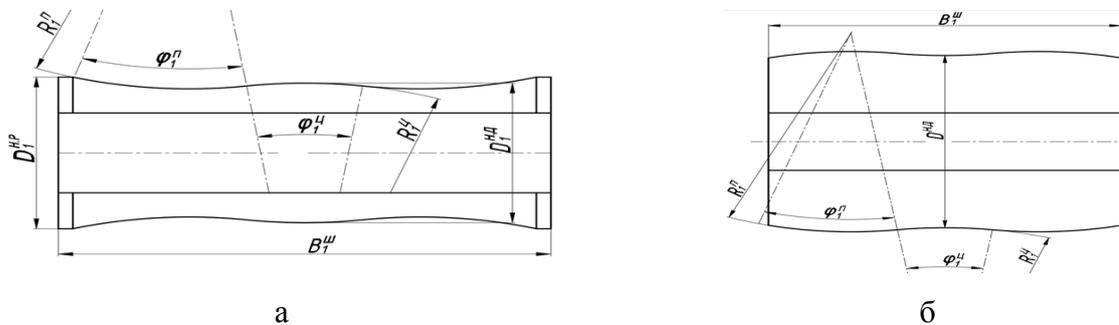


Рисунок 10 – Нижний (а) и верхний (б) валки 1.ОК с геометрическими параметрами для знакопеременной формовки

Геометрические параметры валкового инструмента рассчитываются по следующей методике.

### Расчет геометрических параметров открытых клеток.

#### Геометрические параметры нижних валков.

Диаметр нижнего валка по дну валка определяется, исходя из максимального диаметра трубы, выпускаемой на данном стане ( $D_{\text{MaxT}} = 60$  мм):

$$D_i^{\text{H.Д}} = (1,0 \div 1,5) \cdot D_{\text{MaxT}} , \quad (4)$$

Диаметр нижнего валка по реборде, мм:

$$D_i^{\text{H.Р}} = D_i^{\text{H.Д}} + 2 \cdot H_i^{\text{B}} , \quad (5)$$

Ширина нижнего валка рассчитывают исходя из ширины полосы ТЗ в калибре, мм:

$$B_i^{\text{H}} = B_i^{\text{III}} + (7 \div 15), \quad (6)$$

### Геометрические параметры верхних валков.

Диаметр верхнего валка по дну калибра определяется исходя из диаметра по реборде нижнего валка, мм:

$$D_i^{B,D} = (1,5 \div 2,5) \cdot D_i^{H,P}, \quad (7)$$

Ширина верхнего валка, мм:

$$B_i^B = B_i^H \cdot (40 \div 95\%), \quad (8)$$

### Расчёт геометрических параметров эджерных валков.

Диаметр эджерного валка по нижней реборде, мм:

$$D_i^{H,\text{Э}} = 2 \cdot D_{\text{MaxT}}, \quad (9)$$

Диаметр эджерного валка по верхней реборде, мм:

$$D_i^{H,\text{Э}} = 2 \cdot R_i^{B,\text{Э}} = R_i^{H,\text{Э}} - R_i^{H,\text{П}} \cdot \sin\left(\varphi_i^{\text{П}} + \frac{\varphi_i^{\text{Ц}}}{2}\right) - (R_i^{H,\text{Ц}} - R_i^{H,\text{П}}) \cdot \sin\left(\frac{\varphi_i^{\text{Ц}}}{2}\right) - l_i^{\text{Э}}, \quad (10)$$

где  $l_i^{\text{Э}} = 25\% \cdot BC$ , мм;

Высота эджерного валка, мм:

$$H_i^{\text{Э}} = R_i^{H,\text{П}} \cdot \left( \cos\left(\frac{\varphi_i^{\text{Ц}}}{2}\right) - \cos\left(\varphi_i^{\text{П}} + \frac{\varphi_i^{\text{Ц}}}{2}\right) \right) + \sqrt{R_i^{H,\text{Ц}^2} - l_i^{\text{Э}^2}} - R_i^{H,\text{Ц}} \cdot \cos\left(\frac{\varphi_i^{\text{Ц}}}{2}\right), \quad (11)$$

### Расчет геометрических параметров закрытых клеток.

#### Геометрические параметры нижних валков.

Диаметр по дну нижнего валка, мм;

$$D_i^{H,D,3K} = D_i^{H,D}, \quad (12)$$

Диаметр по реборде нижнего валка, мм;

$$D_i^{H,P,3K} = 2 \cdot D_{\text{MaxT}}, \quad (13)$$

Ширина нижнего валка, мм;

$$B_i^{H,3K} = 2 \cdot D_{\text{MaxT}} + (5 \div 10), \quad (14)$$

#### Геометрические параметры верхних валков.

Диаметр по дну верхнего валка, мм;

$$D_i^{B,D,3K} = D_i^{H,P,3K} - D_T + 2 \cdot \Delta_1, \quad (15)$$

Диаметр по реборде верхнего валка, мм;

$$D_i^{B,P,3K} = D_i^{H,P,3K}, \quad (16)$$

Ширина верхнего валка, мм;

$$B_i^{B,3K} = B_i^{H,3K}, \quad (17)$$

Ширина разрезной шайбы, мм;

$$B_i^{B.T.3K} = (0,75 \div 1) \cdot A_i^3, \quad (18)$$

Расчёт энергосиловых параметров процесса знакопеременной формовки 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 11) 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).

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

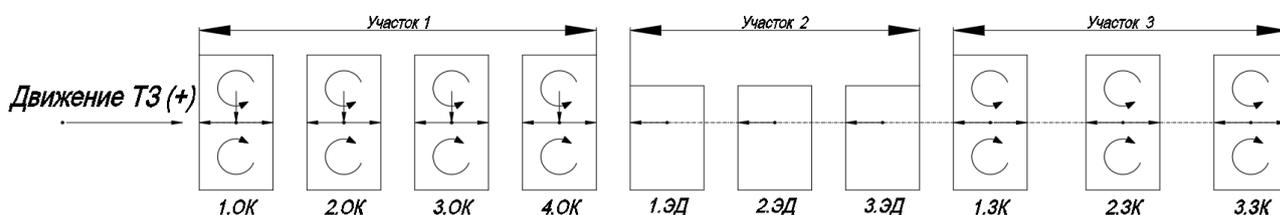


Рисунок 11 – Компоновка опытного ТЭСА 10–60 с распределением тянущих (Т) и тормозящих (Р) усилий в каждой клетке в процессе формовки

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 расчёта 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.

### Расчет энергосиловых параметров процесса знакопеременной формовки.

#### Расчет усилий на участке №1 формовочного стана.

Определение усредненного радиуса в открытых клетях с применением знакопеременной формовки, мм:

$$R_i^{Cp} = \frac{2 \cdot (R_i^{\Pi} \cdot AB) + (R_i^{\text{II}} \cdot BC)}{2 \cdot AB + BC}, \quad (19)$$

Определение усилий сопротивления (тормозящие усилия) перемещению полосы в открытых клетях, Н:

$$P_i^{\Gamma.0} = 0,266 \cdot \sigma_i^{\Pi} \cdot S_T^2 \cdot \alpha_i, \quad (20)$$

где  $\sigma_i^{\Pi}$  - напряжение на внешней поверхности заготовки, МПа;  $\alpha_i$  - угол подгибки, рад.

Расчёт активной (тянущего усилия) составляющей протягивания полосы через калибр во всех клетях формовочного стана ТЭСА, Н:

$$T_i = K_{\text{Конт.}} \cdot \frac{\sigma_i^{\Pi}}{\sqrt{3}} \cdot F_i, \quad (21)$$

где  $K_{\text{Конт.}} = (0,01 \div 0,03)$ ;  $F_i = V_{\text{Л.}} \cdot l_{\text{Конт.}i}$ , мм<sup>2</sup>; и  $l_{\text{Конт.}} = (4 \div 8)$ , мм;

Разность тянущих и тормозящих усилий, Н:

$$\Delta_{i \text{ Участок}}^{\text{Тянущий}} = \sum_i T_i - \sum_i P_i^{\Gamma.0}, \quad (22)$$

Если активная составляющая усилия протягивания полосы через калибры (1.ОК, 2.ОК, 3.ОК, 4.ОК) превышает усилие сопротивления её перемещению в текущем калибре, то заготовка продвигается в следующую клетку с заданным усилием.

### Расчет усилий на участке №2 формовочного стана.

На втором участке эджерные клетки (1.ЭД; 2.ЭД; 3.ЭД) не приводные, поэтому сопротивление перемещению полосы обусловлено частью, создаваемой вертикальным усилием, Н;

$$P_i^{\text{С.Э}} = 0,1 \cdot P_i^{\text{Э}}, \quad (23)$$

где  $P_i^{\text{Э}}$  - вертикальное усилие, Н;

$$P_i^{\text{Э}} = \frac{1,1 \cdot \sigma_i^{\Pi} \cdot S_T^2 \cdot L_{i-1,i}}{1,5 \cdot H_i^{\text{Э}}}, \quad (24)$$

где  $L_{i-1,i}$  – расстояние между двумя клетями, мм;  $H_i^{\text{Э}}$  - высота эджерного валка, мм.

### Расчет усилий на участке №3 формовочного стана.

Определения тянущих усилий в закрытых клетях (1.ЗК; 2.ЗК; 3.ЗК) с учетом обжатия ТЗ по периметру, Н;

$$P_i^{\text{Тя.ЗК}} = 0,1 \cdot P_i^{\text{В.ЗК}}, \quad (25)$$

где  $P_i^{\text{В.ЗК}}$  - вертикальное усилие, Н;

$$P_i^{\text{В.ЗК}} = \frac{1,1 \cdot \sigma_i^{\Pi} \cdot S_T^2 \cdot L_{i-1,i}}{1,5 \cdot H_i^{\text{Э}}} + \sigma_{\tau} \cdot V_{\text{Л.}} \cdot n, \quad (26)$$

где  $\sigma_i^{\Pi} \cdot V_{\text{Л.}} \cdot n$  - добавка от трения по периметру заготовки, где  $n$  – поправочный коэффициент (1,5 ÷ 3).

Усилие сопротивления, Н;

$$P_i^{C.3K} = 0,266 \cdot \sigma_i^{\Pi} \cdot S_T^2 \cdot \alpha_i \cdot m + \sigma_i^{\Pi} \cdot B_{Л} \cdot S_T \cdot \varepsilon, \quad (27)$$

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:

$$\sum P_{3 \text{ Участок}}^{\text{Сопротивление}} = \sum_{i=1}^3 |P_i^{C.Э}| + \sum_{i=1}^3 |P_i^{C.3K}|, \quad (28)$$

Сумма тянущего усилия на третьем участке, Н:

$$\sum P_{3 \text{ Участок}}^{\text{Тянущий}} = \sum_{i=1}^3 P_i^{\text{Тя.3К}}, \quad (29)$$

Разность тянущих и тормозящих усилий на третьем участке, Н:

$$\Delta_{3 \text{ Участок}} = \sum P_{3 \text{ Участок}}^{\text{Тянущий}} - \sum P_{3 \text{ Участок}}^{\text{Сопротивление}}, \quad (30)$$

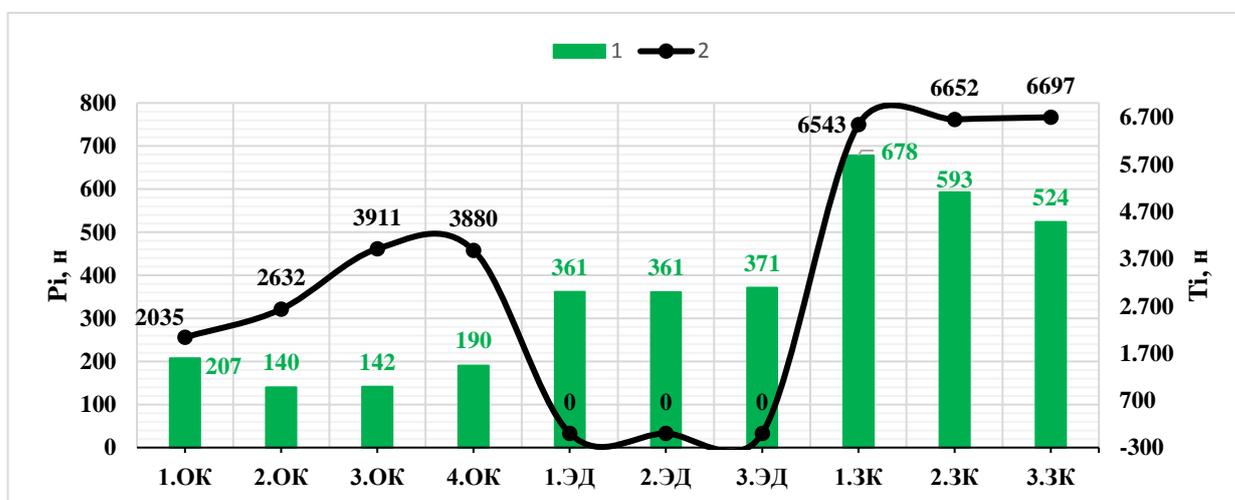
Расчёт суммарного тянущего усилия формовочного стана ТЭСА, Н:

$$T_{\text{Формовочного стана}} = \sum T_i + \sum P_{3 \text{ Участок}}^{\text{Тянущий}}. \quad (31)$$

По представленной методике были рассчитаны энергосиловые параметры непрерывной знакопеременной формовки для трубы Ø50x1,5 мм.

Исходные данные: диаметр трубы Ø50 мм; стенка трубы 1,5 мм; геометрические параметры валкового инструмента, межклетевое расстояние 330 мм; материал: сталь Ст3;  $\sigma_T = 255$  МПа.

График распределения тянущих усилий и усилий сопротивления по всем клетям формовочного стана ТЭСА 10–60 для трубы Ø50x1,5 мм, представлен на рисунке 12.



1 – тормозящие усилия (Pi); 2 – тянущие усилия (Ti)

Рисунок 12 – Распределения тянущих усилий и усилий сопротивлений по клетям формовочного стана ТЭСА 10–60 для трубы Ø50x1,5 мм

Результаты расчёта энергосиловых параметров показали, что усилие сопротивления перемещению ТЗ приводит к незначительному снижению тянущих усилий в калибрах, необходимых для деформирования заготовки. При этом в каждой приводной клети тянущие усилия существенно превышают силы сопротивления перемещению ТЗ, что свидетельствует о стабильности и управляемости процесса формовки.

**В пятой главе** представлена экспериментальная формовка на опытном ТЭСА 10–60 НИТУ МИСИС.

На рисунке 13 представлены валки со знакопеременным центральным участком, а также схема настройки калибра формовочной клети.



а – новые валки; б – процесс настройки ТЭСА 10–60; в – схема настройки клети

Рисунок 13 – Подготовка к эксперименту знакопеременной формовки для трубы  $\text{Ø}50 \times 1,5$  мм

Эксперимент проводили на образце из стали Ст3 размером  $1250 \times 160 \times 1,5$  мм с нанесенной координатной сеткой с размером ячейки  $20 \times 20$  мм – рисунок 14.

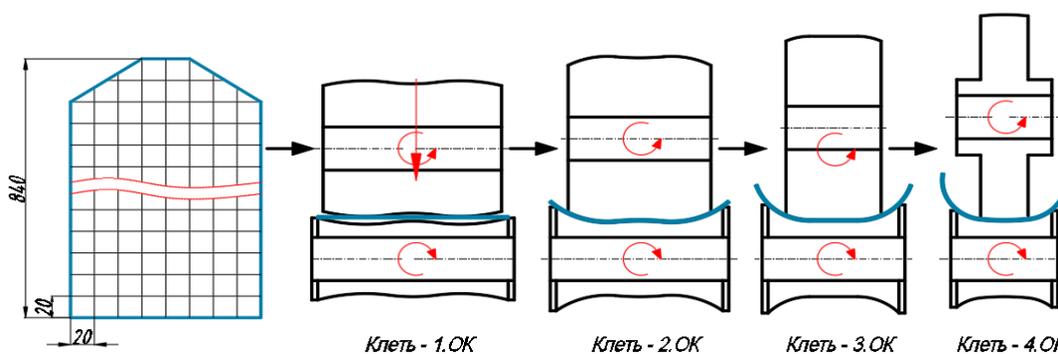


Рисунок 14 – Образец исходного штрипса (а) и схема эксперимента (б)

Схема обработки торможки очага сворачивания ТЗ для трубы  $\text{Ø}50 \times 1,5$  мм представлена на рисунке 15. Геометрические параметры измеряли по 9 сечениям (в калибре, 4 до и 4 после) по каждой клетке (1.ОК-4.ОК).



Рисунок 15 – Схема обработки торможки очага сворачивания ТЗ для трубы  $\text{Ø}50 \times 1,5$  мм

Замеряемые геометрические параметры на торможке очага сворачивания: ширина, высота центрального и периферийного участка -  $B_i^{\text{II}}$ ;  $B_i^{\text{I}}$ ;  $H_i^{\text{II}}$ ;  $H_i^{\text{I}}$ , полная ширина ТЗ -  $B_i^{\text{III}}$ .

Характер формоизменения ТЗ при знакопеременной формовке наглядно отображается в распределении высоты изгиба центральной части ТЗ (рисунок 16).

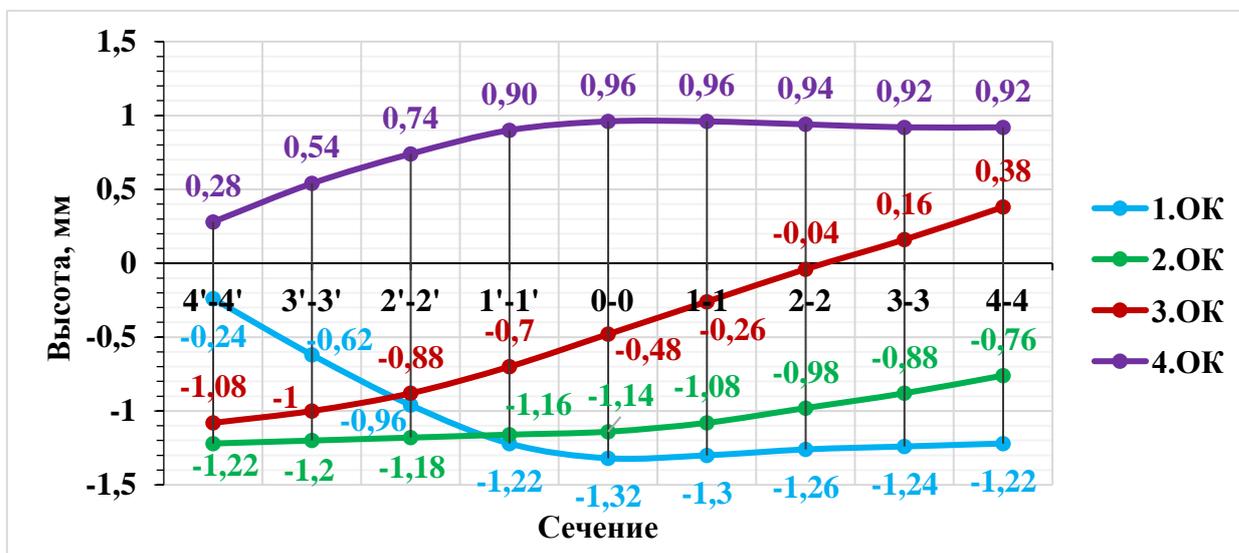


Рисунок 16 – Графики изменения высоты центрального участка ТЗ для трубы  $\text{Ø}50 \times 1,5$  мм

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 распружинивании 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 клетки (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 клетки (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 распружинивания, что подтверждает полный переход к пластической деформации. Отсутствие упругого восстановления обеспечивает стабильное и контролируемое формоизменение заготовки.

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

График распределения ширины заготовки по длине трубной заготовки по открытым формовочным клетям (1.ОК, 2.ОК, 3.ОК, 4.ОК), представленный на рисунке 17, показывает, что ширина заготовки изменяется равномерно. Это обеспечивает формирование устойчивой прямолинейной траектории формоизменения кромки ТЗ при переходе от клетки к клетке в продольном направлении формовочного стана.

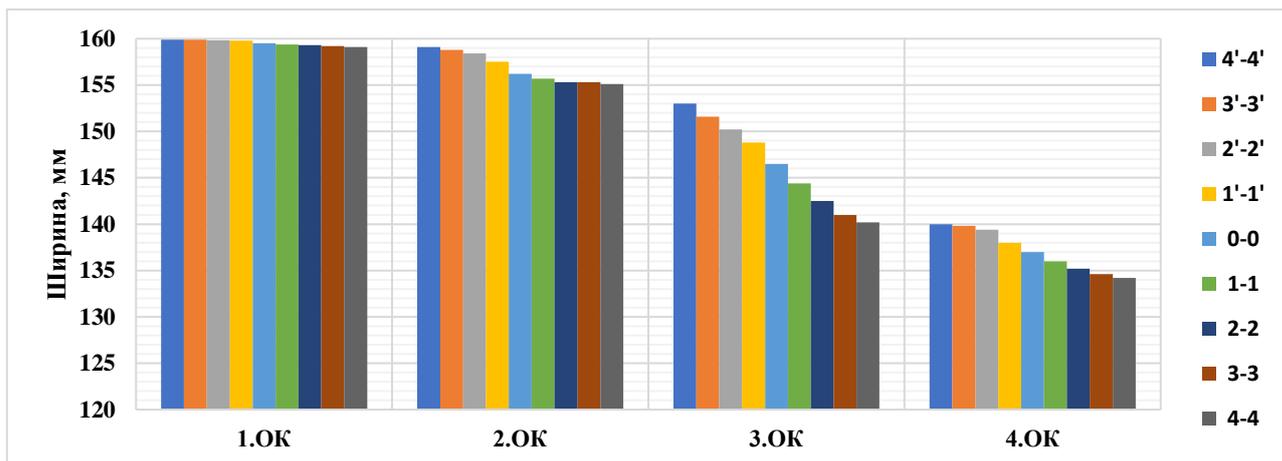
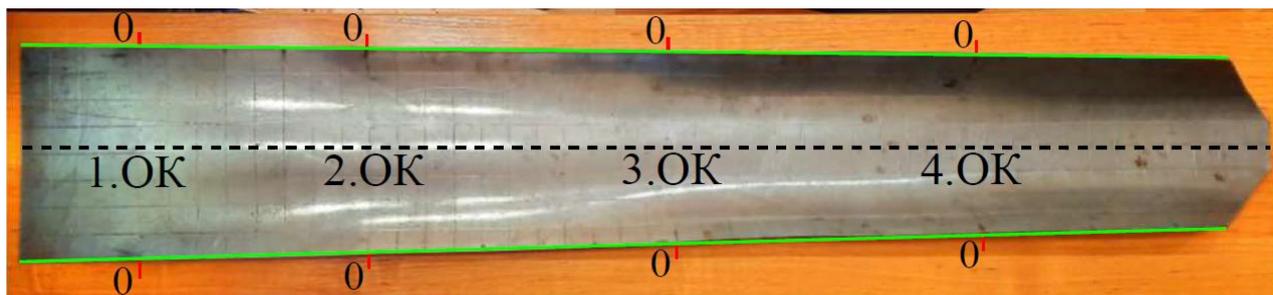


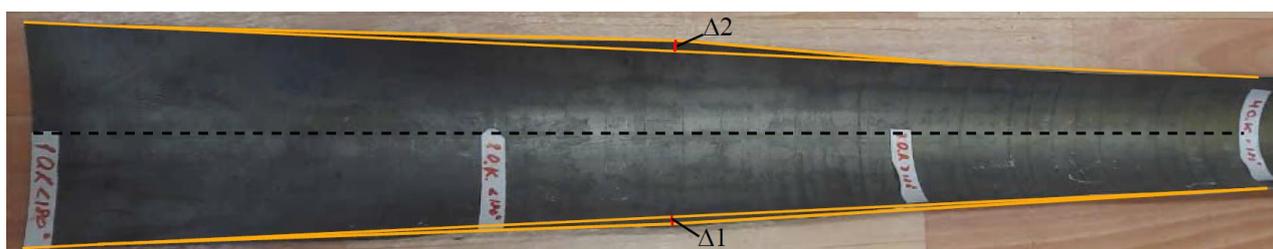
Рисунок 17 – График распределения ширины по длине ТЗ для трубы  $\text{Ø}50 \times 1,5$  мм

На рисунке 18 представлены образцы торможенок очагов сворачивания ТЗ (вид сверху) после классической и знакопеременной формовок. ТЗ после знакопеременной формовки имеет прямолинейную траекторию кромки, а ТЗ после однонаправленной классической формовки характеризуется отклонением кромки от прямолинейной траектории с диапазоном  $\Delta_1 = (0 \div 5)$  мм и  $\Delta_2 = (0 \div 9)$  мм.

Таким образом, при знакопеременной формовке снижается риск образования гофр на кромках заготовки и повышается стабильность процесса формовки.



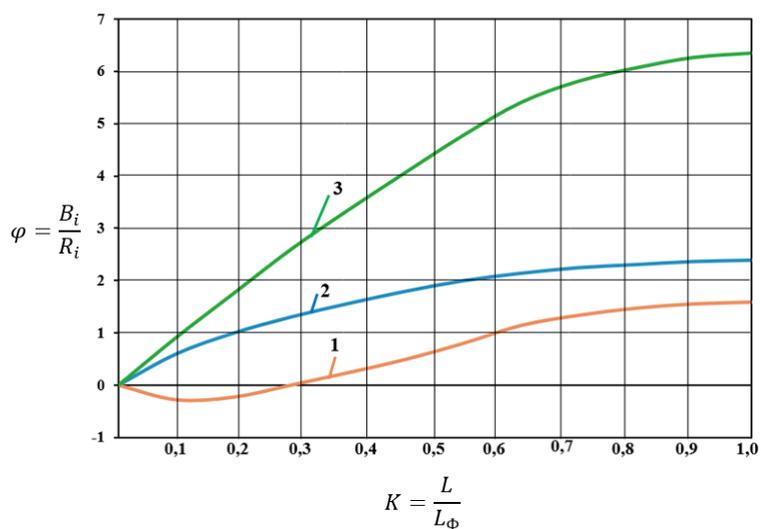
а



б

Рисунок 18 – Образцы торможенок очагов сворачивания ТЗ после знакопеременной (а) и классической (б) формовок для трубы  $\varnothing 50 \times 1,5$  мм

На рисунке 19 представлены графики распределения углов сворачивания ТЗ, построенные на основе теоретических расчетов и анализа экспериментальных данных, отображающие значения для центральной и периферийной частей заготовки, а также суммарный угол для всего профиля.



1 – центральный угол, рад; 2 – периферийный угол, рад;  
3 – суммарный угол, рад

Рисунок 19 – Распределение углов сворачивания ТЗ для труб малого и среднего диаметра со знакопеременной формовки

В результате проведённого комплексного исследования, были установлены зависимости распределение радиусов сворачивания ТЗ при знакопеременной формовки (рисунок 19) для производства электросварных труб малого и среднего диаметра. Данный график, возможно, использовать при расчете углов сворачивания ТЗ для труб малого и среднего диаметров.

## 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 подъёма 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: распружинивание 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 клетях 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.

6. 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 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 формоизменения ТЗ 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 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 распружиниванием 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 распределение радиусов сворачивания ТЗ при знакопеременной формовке для производства электросварных труб малого и среднего диаметра.

### Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

1. Самусев С. В., **Нгуен В.Т.** Исследование процесса непрерывной формовки сварных труб в линии ТЭСА с применением схем сворачивания со знакопеременным изгибом трубной заготовки // Технология металлов. 2023. №2. С.43–48 (*перечень ВАК*).
2. M. A. Tovmasyan, S. V. Samusev, T. Yu. Sidorova, **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. 2023, vol/53. С.938–944 (*перечень ВАК*).
3. Самусев С. В., **Нгуен В.Т.**, Сидорова Т. Ю. Параметры непрерывной формовки трубной заготовки со знакопеременным изгибом и криволинейной траекторией осевого волокна // Черная металлургия // Металлург. 2023, №2. С.34–37 (*перечень SCOPUS*).
4. S. V. Samusev, T. Yu. Sidorova, **V. T. Nguyen**. Analysis of skelp deformation zones for the down trajectory of electrically welded pipes forming // E3S Web of Conferences 402, 11024 2023. 6 с. (*перечень SCOPUS*).
5. S. V. Samusev, T. Yu. Sidorova, **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 of Configurations // Steel in Translation, 2023, Vol. 53, С.1001–1004 (*перечень SCOPUS*).
6. Самусев С. В., Фадеев В. А., Будников А. С., Сидорова Т. Ю., **Нгуен В. Т.** Свид. 2022680270 Российская Федерация. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Расчет геометрических параметров трубной заготовки со знакопеременным изгибом в непрерывных ТЭСА // Оpubл. 28.10.2022
7. Самусев С. В., Фадеев В. А., Фортунатов А. Н., **Нгуен В. Т.** Расчет и анализ технических параметров процесса непрерывной формовки прямошовных труб в схемах ТЭСА с применением знакопеременногогиба заготовки // Сборник задач, Выксунский Филиал «НИТУ «МИСИС» 2023–123с.