

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский технологический
университет
«МИСиС»

На правах рукописи

ФАДЕЕВ Виктор Александрович

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОЙ ВАЛКОВОЙ
ФОРМОВКИ НА ОСНОВЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНТАКТНЫХ УСЛОВИЙ
ТРУБНОЙ ЗАГОТОВКИ С ИНСТРУМЕНТОМ

05.16.05 – Обработка металлов давлением

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: д.т.н., профессор

С.В. Самусев

Москва 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Глава 1 Обзор литературы	9
1.1 Формоизменение полосы при процессе непрерывной валковой формовки электросварных труб	9
1.2 Тянущие и кинематические условия процесса непрерывной формовки трубной заготовки	12
1.3 Контактное взаимодействие трубной заготовки с валковым инструментом	16
1.4 Методики исследования контактного взаимодействия трубной заготовки с валковым инструментом	19
1.5 Выводы по главе	25
Глава 2 Анализ геометрических параметров очагов сворачивания и деформированного состояния трубной заготовки.....	26
2.1 Очаг сворачивания для однорадиусной калибровки.....	26
2.2 Очаг сворачивания для двухрадиусной калибровки с постоянными периферийными участками	30
2.3 Очаг сворачивания для двухрадиусной калибровки с переменными периферийными участками	34
2.4 Анализ деформированного состояния и работы гйба трубной заготовки	38
2.5 Выводы по главе	47
Глава 3 Экспериментальное исследование условий контакта трубной заготовки с инструментом.....	48
3.1 Описание лабораторного формовочного стана ТЭСА 30 - 50	48
3.2 Исследование условий контакта трубной заготовки с инструментом	54
3.3 Обработка результатов измерений контактных отпечатков	58
3.4 Выводы по главе	66
Глава 4 Разработка методик определения контактных условий с применением фактора формы и определение баланса тянущих и тормозящих усилий формовки с учетом конфигураций контактных поверхностей.....	67
4.1 Аналитическое описание криволинейных границ контакта трубной заготовки с инструментом.....	67
4.2 Методика определения параметров внутренней контактной поверхности с применением фактора формы.....	68
4.3 Методика определения параметров наружной контактной поверхности с применением фактора формы.....	70

4.4	Методика определения тянущих усилий с учетом конфигурации контактных поверхностей.....	75
4.5	Выводы по главе	86
Глава 5	Распределение тянущих усилий, схемы валкового инструмента ТЭСА 30 - 50 и предлагаемый инструмент для ТЭСА 219 - 406 ООО «НТС-Лидер»	87
5.1	Распределение тянущих и тормозящих усилий на контактных поверхностях полосы с инструментом	87
5.2	Анализ распределения тянущих и тормозящих усилий и схемы валкового инструмента для ТЭСА 30 - 50.....	90
5.3	Предлагаемый технологический инструмент для формовочного стана ТЭСА 219 - 406 ООО «НТС–Лидер»	96
5.4	Выводы по главе	102
	Общие выводы.....	103
	Список литературы	105
	Приложение 1	112
	Приложение 2	113

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

Трубная промышленность является одной из ведущих отраслей металлургии. Такие отрасли, как нефтегазодобыча, нефтепереработка, машиностроение, атомная энергетика, требуют большого количества стальных труб самого широкого сортамента. Для этого применяются различные способы изготовления труб, совершенствуют и разрабатывают технологические схемы, оборудование и деформационный инструмент. Наиболее востребованным способом изготовления электросварных труб, является непрерывная формовка на трубоэлектросварочных агрегатах (ТЭСА), так как допускает производство труб в широком диапазоне диаметров (10 – 530 мм) и с различным марочным сортаментом. Широкий диапазон электросварных труб определяет наличие разнообразных технологических схем, калибровок и валкового инструмента.

При усовершенствовании действующих и разработки новых технологий непрерывного формоизменения трубной заготовки (ТЗ) в клетях формовочного стана, необходимым условием является уточнение технологических аспектов и вопросов в области теории и технологии процессов непрерывной формовки электросварных труб в линиях формовочных станов ТЭСА.

Актуальными задачами остаются исследование и разработка методик контактного взаимодействия валкового инструмента с ТЗ, определение параметров контактных поверхностей, энергосиловых параметров процесса формоизменения, а также исследование процесса формоизменения ТЗ на реальном металле, что позволит определять его более точные закономерности.

Применение новых методик расчета площадей контактных поверхностей с применением фактора формы позволит воспроизвести контур контактной поверхности по заданным крайним точкам. Методика определения тянущих усилий с учетом контактных условий и кинематических параметров позволит определять баланс между тормозящими и тянущими силами трения с целью уравнивания энергосиловых параметров по всей линии формовочного стана и улучшения качества электросварных труб.

Цель работы

Совершенствование процесса непрерывной валковой формовки на основе экспериментально-теоретического исследования условий контактного взаимодействия трубной заготовки с инструментом.

Для достижения цели работы были поставлены следующие **задачи**:

- провести теоретическое исследование геометрических и деформационных параметров очагов сворачивания в процессе формоизменения трубной заготовки в калибрах формовочного участка ТЭСА;
- провести экспериментальное исследование по определению контактных поверхностей полосы с валковым инструментом;
- разработать на основе полученных экспериментальных данных методику расчета площадей контактного взаимодействия полосы с валковым инструментом при непрерывной формовке трубной заготовки и повысить точность определяемых параметров;
- разработать методику расчета тянущих усилий при процессе формоизменения ТЗ с учетом конфигурации контактных поверхностей и кинематических параметров, и анализа тянущих усилий формоизменения трубной заготовки в калибрах формовочного стана с уравновешенными тянущими усилиями по клетям;
- с применением указанных методик предложить валковый инструмент с компоновкой инструмента из нескольких деформирующих элементов с уравновешенными тянущими усилиями по клетям с целью улучшения качества электросварных труб.

Научная новизна работы

- разработана методика прямого экспериментального определения геометрических параметров контактных поверхностей трубной заготовки с валковым инструментом по всей линии формовки непрерывных трубоэлектросварочных агрегатов;
- получены экспериментально-аналитические зависимости для расчета криволинейной границы контакта деформируемой полосы с валками;
- разработана методика расчета площадей контактных поверхностей ТЗ с валковым инструментом с применением фактора формы;
- получены аналитические зависимости для определения тянущих усилий, учитывающие контактное взаимодействие и кинематические параметры процесса формоизменения ТЗ во всех клетях формовочного стана;
- разработана методика расчета баланса тянущих и тормозящих усилий при про-

цессе непрерывной валковой формовки трубной заготовки с учетом конфигурации контактных поверхностей;

— на основе разработанных методик предложены варианты исполнения валкового и валково-роликового инструмента с компоновкой из нескольких деформирующих элементов.

Практическая значимость работы

— форма контактных поверхностей с криволинейной границей, устанавливает контактное взаимодействие между ТЗ и инструментом;

— методика расчета баланса тянущих и тормозящих усилий с учетом конфигурации контактных поверхностей позволяет уравнивать разнонаправленные усилия по ширинам контактных поверхностей;

— разработана компьютерная программа для ЭВМ позволяющая определять криволинейные границы контакта трубной заготовки с инструментом и рассчитывать площади контактных поверхностей с применением фактора формы;

— предложены варианты исполнения валкового и валково-роликового инструмента с компоновкой из нескольких деформирующих элементов;

— разработанные методики расчета контактного взаимодействия ТЗ с валковым инструментом при непрерывной валковой формовки и расчета тянущих усилий при процессе формоизменения формуемой полосы используются в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров на кафедре ОМД НИТУ «МИСиС».

Положения выносимые на защиту

— аналитические зависимости для определения криволинейных границ наружных и внутренних контактных поверхностей трубной заготовки с валковым инструментом;

— методики расчета площадей наружных и внутренних контактных поверхностей с применением фактора формы;

— определение зон опережения и зон отставания учетом с криволинейных границ контактных поверхностей;

— методика расчета баланса тянущих усилий при процессе формоизменения ТЗ с учетом конфигурации контактных поверхностей и кинематических параметров.

Методы исследования и достоверность результатов

Исследования проведены на основе теории и технологии непрерывной валковой формовки электросварных труб с применением физических экспериментов на реальном металле.

Физические экспериментальные исследования формоизменения трубной заготовки проводились в условиях научно-производственного центра кафедры Обработки металлов давлением НИТУ «МИСиС» на формовочном стане ТЭСА 30-50.

Фиксирование и регистрация экспериментальных параметров процесса формоизменения полосы осуществлялось с помощью измерительных приборов и автоматизированной системы сбора с применением программного обеспечения.

Спроектирована и изготовлена индивидуальная измерительная оснастка (шаблон-транспортиры) для замера углов контакта ТЗ по ребордам валков. При измерении геометрических параметров контактных отпечатков на трубной заготовке применялся контурный шаблон.

Обработка экспериментальных данных осуществлялась при помощи систем автоматизированного проектирования SOLIDWORKS 3D. При обработке экспериментальных данных применялись методы статистического анализа.

Текст диссертационной работы и автореферата проверен на отсутствие плагиата и подтверждения оригинального текста с помощью "Антиплагиат" (<http://antiplagiat.ru>).

Апробация работы

Результаты диссертационной работы представлены и обсуждены на конференциях: International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2020 (IC-MTME 2020); VIII региональной межвузовской научно-практической конференции "Творчество молодых - родному региону".

Результаты работы используются в учебном процессе на кафедре ОМД НИТУ «МИСиС» при подготовке бакалавров и магистров по направлениям «Металлургия» и «Технологические машины и оборудования».

Публикации

По теме диссертационной работы опубликовано 11 статей в рецензируемых научных изданиях из перечня высшей аттестационной комиссии РФ. Опубликованные статьи входят в библиографические и реферативные базы данных РИНЦ, Scopus и Web of Science. Получены два свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад

Диссертационная работа является законченной научной работой, в которой обобщены результаты исследований, полученные лично автором и в соавторстве. Личный вклад автора состоял в планировании и осуществлении экспериментальных исследований, обработке и анализе полученных данных, в разработке методик расчёта границ и площадей контактных поверхностей ТЗ с инструментом с применением фактора формы, в разработке методики расчета тянущих усилий с учетом конфигураций контактных поверхностей. Основные положения и выводы диссертационной работы сформулированы автором.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, основных результатов и выводов, изложена на 113 страницах машинописного текста, содержит 25 таблицы и 71 рисунок, снабженных подрисуночными подписями и библиографический список, содержащий из 77 наименований.

Глава 1 Обзор литературы

1.1 Формоизменение полосы при процессе непрерывной валковой формовки электросварных труб

Процесс непрерывного формоизменения полосы заключается в сворачивании в поперечном сечении от плоской полосы в начале этапа процесса до соприкосновения кромок и образовании цилиндрической профиля трубной заготовки на завершающем этапе процесса формоизменения. Для осуществления процесса непрерывной формовки электросварных труб малого и среднего диаметра из различных сталей и сплавов (углеродистых, низколегированных, коррозионностойких сталей; титановых и алюминиевых сплавов) применяют трубоэлектросварочные агрегаты (ТЭСА). В состав которого входит формовочный стан, который осуществляет особо ответственный процесс - непрерывную формовку полосы. Формовочный стан состоит из последовательно расположенных клеток с профилировочным валковым инструментом. Широкий сортамент электросварных труб обуславливает большое разнообразие компоновок деформационных клеток и калибровок валкового и валково-роликового инструмента [1-13].

В рамках одной компоновки деформационных клеток формовочного стана можно производить трубы обычного, тонкостенного и толстостенного сортамента. Это требует изменения параметров очага сворачивания трубной заготовки, а именно: распределения кривизны формовки ТЗ по длине очага сворачивания в зависимости от выбранного сортамента [11].

В настоящее время существуют несколько востребованных типов калибровок непрерывных валковых формовочных станков [12-15]. Часто используемые калибровки являются, двухрадиусная с постоянным периферийным участком, двухрадиусная с переменным периферийным участком, двухрадиусная с плоским участком и однорадиусная.

Однорадиусная калибровка наиболее простая в реализации, изготовлении инструмента и настройки. Процесс обладает значительными вариациями исполнения за счет, изменения интенсивности кривизны профиля заготовки по длине очага сворачивания. Основное преимущество однорадиусной калибровки в том, что позволяет на участке открытых калибров производить формовку на одном валковом инструменте для труб различного диаметра [12,13,17].

Профиль двухрадиусной калибровки с постоянным периферийным участком состоит из трех элементов: одного центрального участка и двух периферийных участков. Центральный участок определяется большим радиусом $R_{ц}$ и длиной, ограничивающейся центральным углом $\varphi_{ц}$. Радиус центрального участка постепенно уменьшается, а угол центрального участка увеличивается в направлении оси формовки. Периферийные участки определяются меньшим радиусом $r_{п}$ равным радиусу готовой трубы, и ограничивается длиной соответствующем периферий-

ным углом $\alpha_n = 40^\circ - 45^\circ$. Параметры периферийных участков в направлении оси формовки остаются неизменными. Особенностью этой калибровки является то, что периферийные участки, сформованные в первых горизонтальных клетях, не вступают в контакт, когда ширина центрального участка достигает 0,4-0,5 ширины трубной заготовки [12-15].

Частным случаем двухрадиусной калибровки является двухрадиусная калибровка с плоским участком. Профиль двухрадиусной калибровки с плоским участком состоит из трех элементов: одного центрального участка и двух периферийных участков. Центральный участок выполнен плоским и характеризуется как $R_n = \infty$. Периферийный участок определяется меньшим радиусом r_n равным радиусу готовой трубы, и постепенно увеличивающимся периферийным углом α_n от клетки к клетке в направлении оси формовки. Такая калибровка имеет высокую устойчивость формоизменения трубной заготовки и применяется для производства электросварных труб диаметром больше 168 мм [12,13].

Профиль двухрадиусной калибровки с переменным периферийным участком состоит из трех элементов: одного центрального участка и двух периферийных участков. Центральный участок определяется большим радиусом R_n и длиной, ограничивающейся центральным углом φ_n . Радиус центрального участка постепенно уменьшается, а угол центрального участка изменяется по заданной зависимости от изменения периферийного угла. Периферийный участок определяется меньшим радиусом r_n равным радиусу готовой трубы или близкий к нему, и постепенно увеличивающимся периферийным углом α_n от клетки к клетке в направлении оси формовки. Таким образом, меняются центральной радиус и угол, периферийный угол от клетки к клетке, постоянным остаётся радиус периферийных участков [16].

Наряду с традиционным валковым инструментом применяется валково-роликовый инструмент [18-22]. Формовочные станы, оборудованные валково-роликовым инструментом, позволяют создавать очаг формовки близкий к монотонному и формовать электросварные трубы в широком сортаменте. На участке открытых калибров профиль валков выполнен по эллиптической кривизне [18]. Формовка трубной заготовки осуществляется от периферийных участков к центру трубной заготовки. Роликовый инструмент, выполненный цилиндрической формы, в основном применяется как на участке открытых калибров [18,19]. Преимущество такого инструмента, является минимальное воздействие на трубную заготовку в процессе формовки. Так как калибр этих формовочных станов состоит из нескольких роликов с независимыми осевыми валами, это приводит к усложнению конструкции формовочных клетей и обойм и системы управления позиционирования деформационного инструмента.

В работе [23] представлены экспериментальные данные по замерам зон контакта ленты с валками на формовочном стане ТЭСА 159-529 при производстве труб диаметром 273 мм - ри-

сунок 1.1 (зоны валков, находящиеся в контакте с формующей лентой заштрихованы). Из этих данных видно, что при формовке ленты в трубную заготовку контакт с валками имеет место только на отдельных участках калибра валка.

Рассмотрение зон валков, находящихся в контакте с металлом и активно участвующих в формовке полосы в трубную заготовку, показывает, что степень использования ширины валков крайне низкая (нижних валков 3 - 30 %, верхних 14 - 64 %) и не оправдывает их габариты и значительную стоимость изготовления. На основании этого в качестве формовочного инструмента предложены формующие ролики, установленные в зонах активной формовки полосы в трубную заготовку.

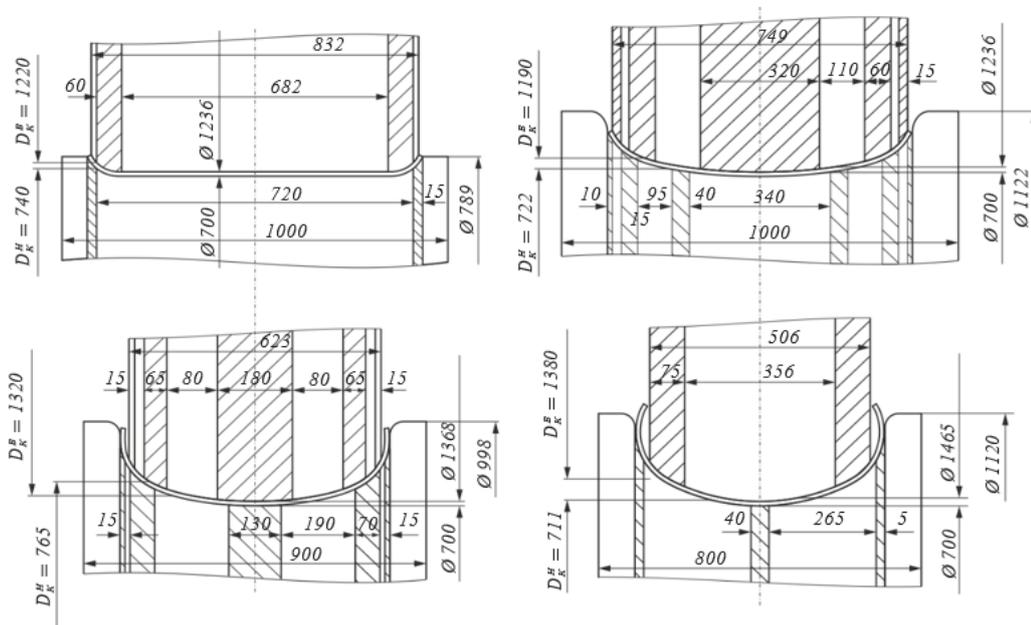


Рисунок 1.1 – Результаты замера зон контакта трубной заготовки с валками на формовочном стане трубосварочного агрегата 159 -529

На основании результатов исследования контактного взаимодействия трубной заготовки с валками полного профиля калибра на формовочном стане трубосварочного агрегата 159 -529 была предложена новая конструкция валково-роликового калибра. Предложенное технологическое решение сложно применимо на других ТЭСА, так как исследования проводились для конкретного типоразмера трубы.

1.2 Тянущие и кинематические условия процесса непрерывной формовки трубной заготовки

В работе [23] условия процесса формоизменения трубной заготовки задают таким образом, чтобы в приводных клетях создавались тянущие усилия, достаточные для формовки и продвижения трубной заготовки по всему формовочному участку.

$$\sum T_{\text{тян}} - \sum T_{\text{тор}} - \sum P_{\Gamma} - \sum \Delta T = 0, \quad (1.1)$$

где $T_{\text{тян}}$ – тянущая сила трения, действующая на ленту от приводного вала и направленная по ходу формовки;

$T_{\text{тор}}$ – тормозящая сила трения, действующая на ленту от приводного вала;

P_{Γ} – горизонтальное усилие, необходимое для деформации ленты в приводных и не приводных валах;

ΔT – тормозящая сила трения не приводного вала (сопротивление в опорах валков не учитывается).

Вертикальные составляющие P_0 , P_3 , P_k полного давления трубной заготовки на валковый инструмент соответственно в приводных клетях формовочного с открытым и закрытым калибром, а также в клетях калибровочного стана рассчитывали следующим образом [23]:

$$P_0 f L_0 = (1 + \beta) P_{\Gamma,0}, \quad (1.2)$$

$$P_3 f L_3 = (1 + \beta) P_{\Gamma,3}, \quad (1.3)$$

$$P_k f L_k = \left(1 + \frac{\sigma_s}{E}\right) P_{\Gamma,k}, \quad (1.4)$$

$$L_{0,3,k} = \frac{F_{1В}}{S_В} + \frac{F_{1Н}}{S_Н} - \left(\frac{F_{2В}}{S_В} + \frac{F_{2Н}}{S_Н}\right), \quad (1.5)$$

где f – коэффициент трения между лентой и валками, принимаемый равным для всех клеток;

$(1 + \beta)$ и $\left(1 + \frac{\sigma_s}{E} 100\right)$ – коэффициенты, учитывающие увеличение усилия формовки за счет пружинения заготовки за выходом сечения калибра;

$P_{\Gamma,0}$, $P_{\Gamma,3}$ и $P_{\Gamma,k}$ – горизонтальные усилия, необходимые для деформации заготовки соответственно в клетях с открытым калибром и закрытым калибром, а также в клетях калибровочного стана;

$F_{1В}$ и $F_{1Н}$ – контактные поверхности, на которых распределены тянущие силы трения, соответственно для верхнего и нижнего валков;

$F_{2В}$ и $F_{2Н}$ – контактные поверхности, на которых распределены тормозящие силы трения, соответственно для верхнего и нижнего валков;

S_B и S_H – проекции контактных поверхностей на горизонтальную плоскость, соответственно для верхнего и нижнего валков.

В процессе формоизменения трубной заготовки важное значение имеет определение кинематических параметров непрерывной валковой формовки, которые влияют на качество готовых труб [25-28].

В работах [25,26] представлен анализ схемы скоростных условий формовки трубной заготовки в валковом калибре - рисунок 1.2. Линейные скорости валка в различных точках неодинаковы и могут быть определены из следующих соотношений:

для верхнего валка

$$v_B = \omega_B \cdot R_{XB}; \quad (1.6)$$

для нижнего валка

$$v_H = \omega_H \cdot R_{XH}, \quad (1.7)$$

где v_B, v_H – линейные скорости на поверхности верхнего и нижнего валков;

ω_B, ω_H – угловые скорости верхнего и нижнего валков;

R_{XB}, R_{XH} – переменные радиусы верхнего и нижнего валков.

Линейная скорость перемещения трубной заготовки постоянна. На поверхности валков имеются точки в поперечном сечении, в которых окружные скорости валка и трубной заготовки одинаковы, т. е.

$$v_{ТЗ} = \omega_B \cdot R_{К.В} = \omega_H \cdot R_{К.Н}, \quad (1.8)$$

где - $R_{К.В}, R_{К.Н}$ – катающие радиусы верхнего и нижнего валков.

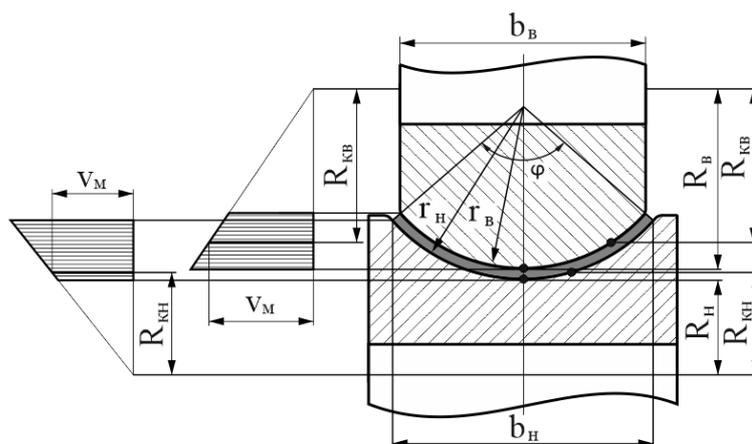


Рисунок 1.2 – Схема скоростных условий формовки трубной заготовки в валковом калибре

В работе [22] на поверхности соприкосновения трубной заготовки с валком выделяют участки F'_B и F''_B где скорость валка больше скорости трубной заготовки и участки F'_H и F''_H , где скорость валка меньше скорости трубной заготовки. Катающий диаметр возможно определить из равенства моментов трения на участках F'_B и F''_B для верхнего валка, F'_H и F''_H - для нижнего валка, т. е.

$$M_{\text{тр}}^{F'} = M_{\text{тр}}^{F''}, \quad (1.9)$$

или

$$M_{\text{тр}}^{F''} = M_{\text{тр}}^F = M_{\text{тр}}^{F'}, \quad (1.10)$$

тогда

$$M_{\text{тр}}^F = 2 \cdot M_{\text{тр}}^{F'}. \quad (1.11)$$

Элементарная сила трения, отнесенная к единице периметра калибра:

$$dT = fpdF = fpm_x dx \quad (1.12)$$

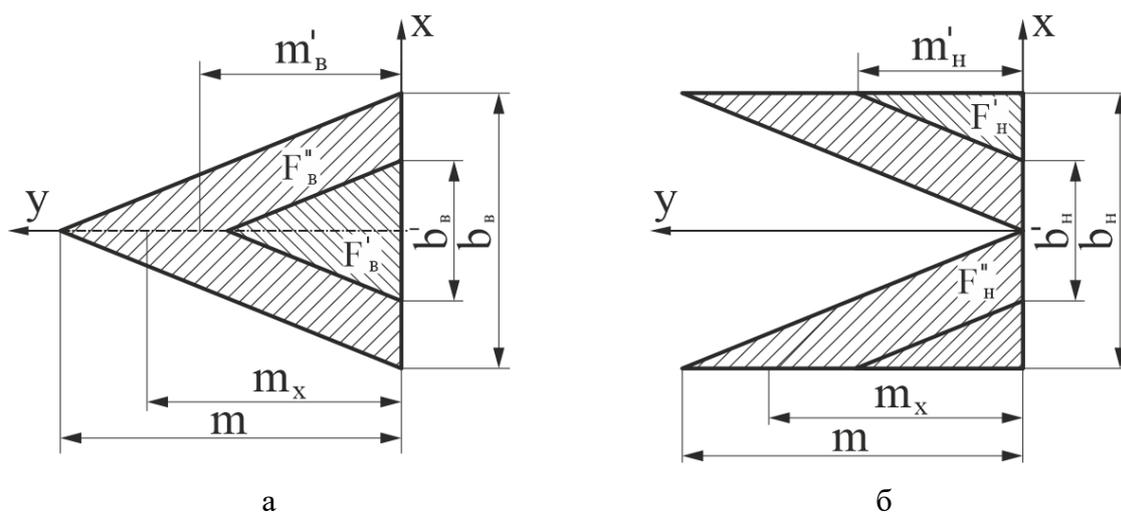
где m_x – переменная длина поверхности соприкосновения

$$m_x = m - \frac{2m}{b_d} x. \quad (1.13)$$

Соответственно элементарный момент трения

$$dM_{\text{тр}} = fpm_x R_x dx. \quad (1.14)$$

Расположение участков с различным направлением сил трения представлен на рисунке 1.3



а – для верхнего валка; б – для нижнего валка

Рисунок 1.3 – Расположение участков с различным направлением сил трения

В статьях [27,28] рассмотрено определения кинематических параметров с учетом взаимодействия трубной заготовки с формовочными валками. На контактных поверхностях на трубную заготовку со стороны валков действуют силы нормального давления, направленные перпендикулярно к поверхности валков, и силы трения, направленные по касательной к поверхности валков в плоскости их вращения – рисунок 1.4.

В работе [27] элементарные силы, прилагаемые к трубной заготовке со стороны нижнего (верхнего) формовочного валка, устанавливают в виде трех равнодействующих сил: равнодействующей - P_1 , сил удельного давления - p_1 на контактной площадке - S_1 и равнодействующих - T_1' и T_1'' сил трения - t_1 , соответственно в зонах опережения - S_1' и с отставания - S_1'' . Со стороны верхнего валка на формируемый металл действуют аналогичные силы P_2 , T_2' и T_2'' .

Таким образом, в установившемся процессе силы взаимно уравновешиваются:

$$T_{1y}'' + T_{2y}'' - T_{1y}' - T_{1y}' - (P_{1y} + P_{2y}) = 0. \quad (1.15)$$

Контактные поверхности – рисунок 1.4 ограничиваются пространственными замкнутыми фигурами abc - для нижнего формовочного валка и deg - для верхнего формовочного валка. Линии ac и eg ограничивающие контактные поверхности на входе трубной заготовки в калибр описываются следующими зависимостями:

$$\phi = k\alpha, \quad (1.16)$$

$$\psi = \psi_0, \quad (1.17)$$

где k – коэффициент пропорциональности;

ψ – постоянный угол охвата верхнего валка трубной заготовкой.

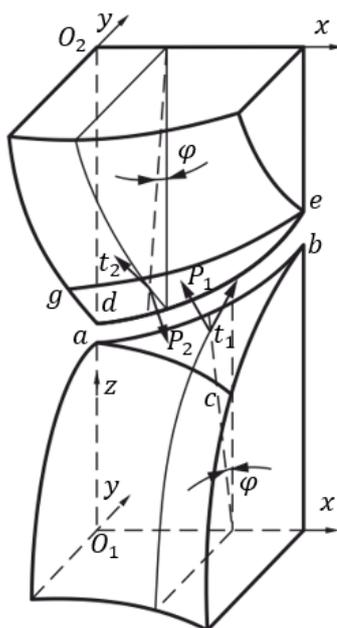


Рисунок 1.4 – Элементарные силы, действующие на трубную заготовку со сторон валков и границы контактных поверхностей

В работах [29] тянущие усилия для верхних и нижних валков для однорядных калибровок определяются, исходя из соотношения зон опережения и отставания контактного взаимодействия трубной заготовки с валками.

$$T_i = (f \cdot P_i^{\phi}/2) \cdot (1 - 8(b_{\text{от}}/b_i)^3), \quad (1.18)$$

где T_i – тянущее усилие, Н;

f – коэффициент трения, ($f = 0,08 \dots 0,12$);

b_i – длина дуги контакта, мм;

$b_{\text{от}}$ – длина дуги заготовки в зоне отставания, мм.

В работе [30] тянущие усилия для верхних и нижних валков для многорядных калибровок определяли, исходя из соотношения тянущих и тормозящих зон по формуле:

$$T_i = (f \cdot P_i^{\phi}/2) \cdot (1 - 8(F_{\text{от}}/F_i)^3), \quad (1.19)$$

где: T_i – тянущее усилие, Н;

f – коэффициент трения, ($f = 0,08 \dots 0,12$);

F_i – общая площадь контакта, мм²;

$F_{\text{от}}$ – площадь контакта заготовки в зоне отставания, мм².

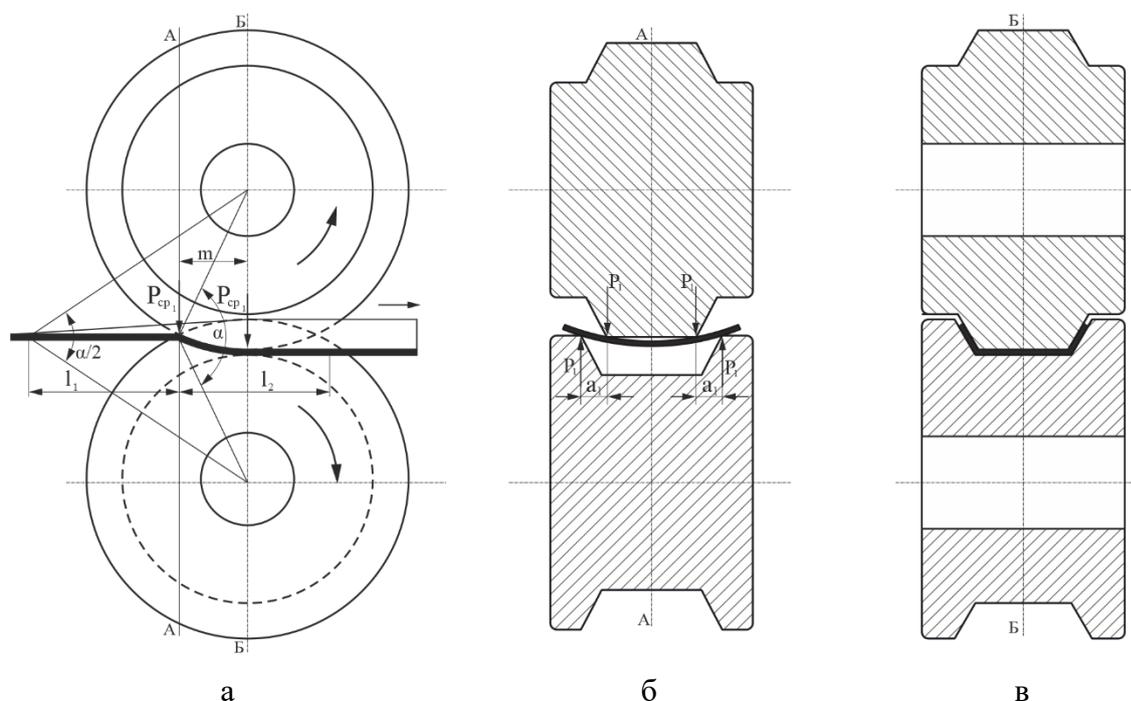
К недостаткам данных работ можно отнести, что в качестве основных методик применяют расчет формы и площади контактной поверхности, основанные на замене криволинейной (нелинейной) контактной границы хордами. Данное определение границ и площади контактной поверхности приводит к определенным погрешностям.

1.3 Контактное взаимодействие трубной заготовки с валковым инструментом

Одним из первых методов определения контактного взаимодействия полосовой заготовки с валковым инструментом и расчета усилий формовки – рисунок 1.5 предложил Г. Меккельт.

Метод расчета заключается в том, что усилие необходимое длягиба полосовой заготовки направлено к точке начального контакта полосы с верхними валком и создает изгибающий момент на участке полосовой заготовки протяженностью l_1 . Участок очага деформации l_1 определяется из геометрических параметров валкового инструмента. Началом участка l_1 является точка, где центральный угол соединяется с осями нижнего и верхнего валков, равен $\alpha/2$. Конец участка l_1 , является точка, где полоса контактирует с верхним валком, которая находится на пересечение диаметров валков. Участок контакта полосы с валковым инструментом начинается от точки пересечения диаметров валки на вход в калибр до осевой плоскости калибра.

Для определения участка l_1 по методике применяют соотношение диаметров валков калибра, при условии, что диаметры верхнего и нижнего являются одинаковыми. При расчете различных калибровок валкового инструмента это условие не подходит, так как размеры габаритных диаметров не одинаковы, что влияет на длину очага деформации.

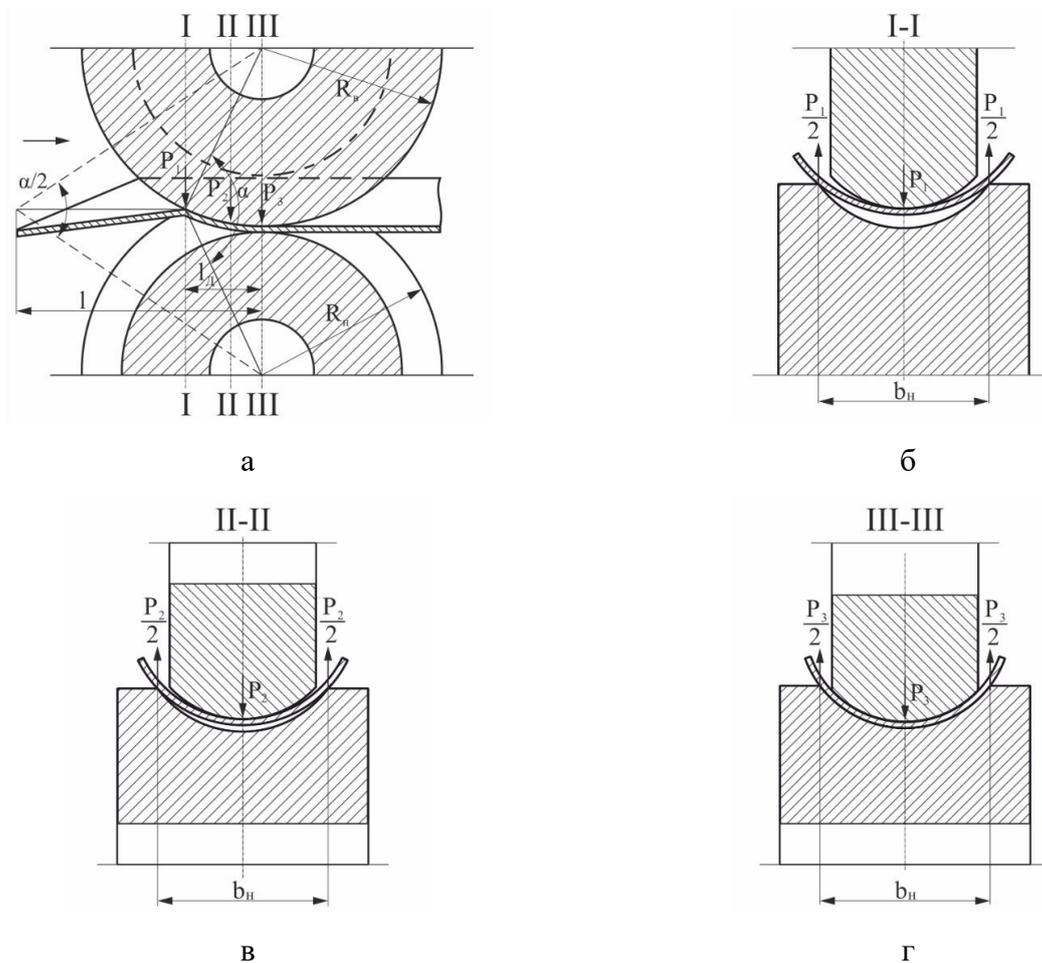


а – вид сбоку; б – фронтальный вид в сечении А-А; в – фронтальный вид в сечении Б-Б

Рисунок 1.5 – Схема определения контактного взаимодействия полосовой заготовки с валковым инструментом

В работе [31], Матвеев Ю.М. предложил схему определения очага деформации и усилия в калибре, как пластический изгиб криволинейного бруса бесконечной длины, что соответствует процессу формовки трубной заготовки – рисунок 1.6. Изгиб трубной заготовки производится последовательно (непрерывно отдельными участками) в калибре образуемом двумя профилировочными валками. Деформация трубной заготовки, находящаяся в контакте с формовочными валками, рассматривается в трех сечениях (I-I; II-II; III-III). В сечении I-I деформация трубной заготовки (ТЗ) начинается, когда ТЗ одновременно соприкасается в двух крайних точках на ребрах нижнего валка и в одной точке по оси с верхним валком. Трубная заготовка, продвигаясь между валками, постепенно деформируется в сечении II-II. Далее трубная заготовка деформируется и в осевой плоскости калибра в сечении III-III полностью заполняет калибр между валками, и принимает форму калибра. Схема очага деформации трубной заготовки может относиться к любому открытому формовочному калибру ТЭСА, так как деформация между привод-

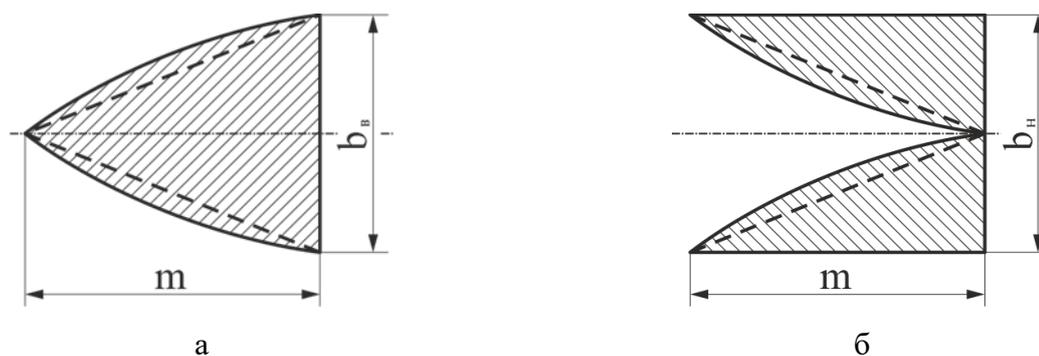
ными горизонтальными клетями стана в начальном поперечном сечении очага деформации будет соответствовать очагу деформации в поперечном сечении предыдущего калибра.



а – вид сбоку; б – начальный контакт ТЗ с валками в сечении I-I; в – сечение II-II; г – ТЗ принимает форму калибра в сечении III-III

Рисунок 1.6 – Схема очага деформации при изгибе трубной заготовки в формовочном калибре

В работе [27] горизонтальные проекции соприкосновения трубной заготовки с деформационным инструментом определяются по схеме представленной на рисунке 1.7.



а – для верхнего вала; б – для нижнего вала

Рисунок 1.7 – Горизонтальная проекция контактной поверхности трубной заготовки

В данном случае границы проекций контактной поверхности на горизонтальной плоскости принималась в виде прямой линии. Следовательно, площади контактной поверхности трубной заготовки с валами на горизонтальной плоскости рассчитывалась:

- с верхним валком

$$F_{\text{в}} = \frac{m \cdot b_{\text{в}}}{2}, \quad (1.20)$$

- с нижним валком

$$F_{\text{н}} = \frac{m \cdot b_{\text{н}}}{2}, \quad (1.21)$$

где m – длина контакта трубной заготовки по дну с верхним валком и по реборде с нижним валком;

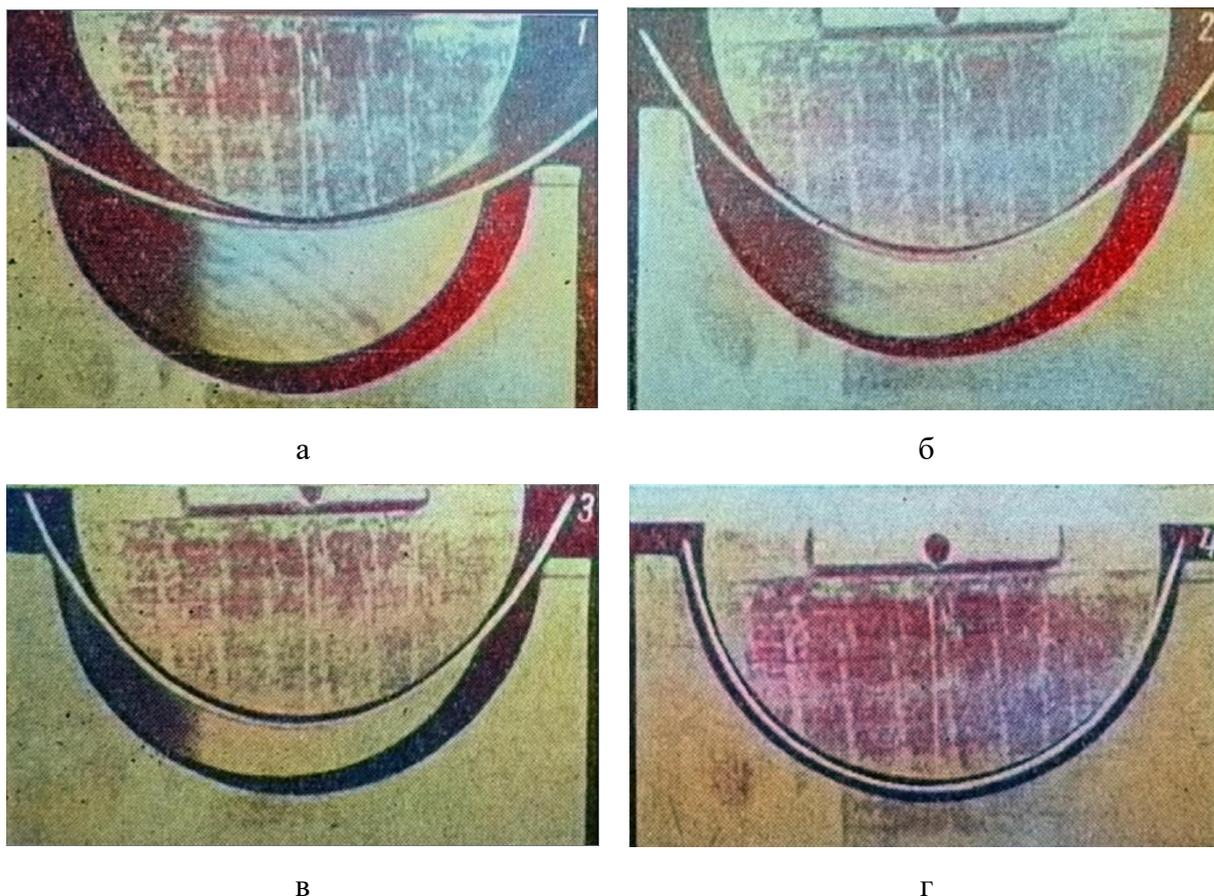
$b_{\text{в}}$ – ширина контакта с верхним валком;

$b_{\text{н}}$ – ширина контакта с нижним валком.

1.4 Методики исследования контактного взаимодействия трубной заготовки с валковым инструментом

В работе [12] представлено контактное взаимодействие поперечного изгиба полосы с деформирующим инструментом. Формоизменение полосы при гибки в штампах представлено на рисунке 1.8. Для представления процесса гибки полосы изображено четыре стадии формоизменения. На первой стадии – рисунок 8а происходит контакт полосы с верхним штампом в осевой его части, контакт полосы с нижним штампом происходит по его краям. Далее зафиксировано две стадии перемещения вниз верхнего штампа рисунок 8б, рисунок 8в, где происходит увеличение контакта полосы с верхним штампом, а контакт полосы по краям с нижним валком остается почти неизменным, уменьшается зазор между верхним и нижним штампами. На последней четвертой стадии изгиба полоса - рисунок 8г принимает окончательную форму, соот-

ветствующую профилям штампов, где происходит полный контакт полосы с верхним и нижним штампами. В работе предполагалось, схема формоизменения полосы в штампах и в формовочных валках аналогична. Это предположение соответствует началу формоизменения непрерывной формовки в неустановившемся процессе. В результате этого исследования основана методика определения формоизменения трубной заготовки в валковом калибре, и предложена методика определения параметров контактного и внеконтактного участков очага деформации. Методика [12] не позволяет в полном объеме определить параметры контактного взаимодействия.



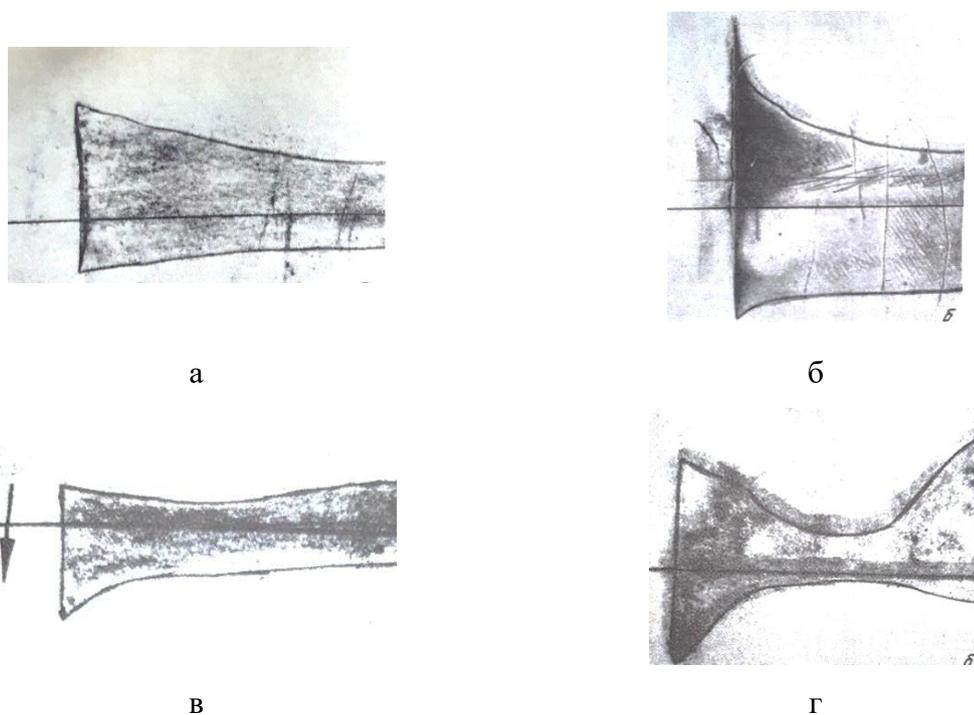
а – первая стадия; б – вторая стадия; в – третья стадия; г – четвертая стадия

Рисунок 1.8 – Стадии формоизменения полосы при ее гибке в штампах

В работе [32] представлена экспериментальная методика определения контактных площадей, которая позволяет измерять площадь контакта не только входного участка, но и выходного участка. Под входным участком понимается контакт трубной заготовки с валковым инструментом от первой точки соприкосновения до пересечения с плоскостью, проведенной через оси валков, а под выходными от плоскости, проведенной через оси валков до последней точки соприкосновения.

Методика [32] заключалась в следующем: на полосу наклеивают белую бумагу, на поверхность валков наносят слой графита и полосу продвигают в валки, на которых отмечается положение трубной заготовки относительно плоскости входного сечения калибра. После подъема верхнего валка по отпечаткам измеряется площадь контакта. Таким образом, на отпечатке остается только линия, ограничивающая контакт полосы во входном сечении.

Данную методику по определению контактных отпечатков применяли на экспериментальном стане 10-60 Урал НИТИ при формовке штрипса размером 105x1 мм в двух клетях с открытым калибром, радиусы валков соответственно 72,5 и 37 мм. Эксперименты проводили на валках с рабочим слоем из полиуретана марки СКУ-7Л и на металлических валках. Результаты определения контактных отпечатков представлены на рисунке 1.9.



а – с нижним металлическим валком; б – с нижним полиуретановым валком; в – с верхним металлическим валком; г – с верхним полиуретановым валком

Рисунок 1.9 – Отпечатки контактных площадей ТЗ с валками

Таким образом, данная методика позволяет экспериментально получать отпечатки контакта ТЗ с инструментом, определить границы отпечатка как входного, так и выходного участка. Недостатком данной методики заключается в том, что контакт ТЗ с инструментом происходил через графит и бумагу, что могло повлиять на точность результатов.

В работе [33] исследование контактного взаимодействия и фиксирования контактных площадей валкового инструмента с трубной заготовкой проводили в валковых калибрах в усло-

вия трубоэлектросварочного агрегата. Методика фиксирования контактных отпечатков заключалась в нанесении графитового порошка на валки, подкладки бумаги между валками и трубной заготовкой, сведении валков. Схема фиксирования контактных отпечатков представлена на рисунке 1.10.

Действия по фиксированию контактных отпечатков заключался в следующем порядке. В процессе формовки трубной заготовки на трубоэлектросварочном агрегате производили остановку полосы и валкового инструмента в формовочном стане. Далее с помощью регулировочных винтов поднимали верхний валок – 1. Трубная заготовка – 3 освобождалась, между верхним валком и трубной заготовкой, между нижним валком и трубной заготовкой подкладывали копировальную и белую бумагу – 2. Затем опускали верхний валок до положения соответствующего калибра формовки. Происходил контакт валкового инструмента через копировальную бумагу и белую карточку с трубной заготовкой. Графит копировальной бумаги отпечатывалась на белой карточке в соответствии с контактом. Далее разводили валки и на белой бумаге фиксировались контактные отпечатки трубной заготовки с нижним – 5 и верхним – 6 валками.

Погрешностью фиксирования контактных отпечатков по методики [33], является, то, что разводили и сводили валки, тем самым происходило изменение геометрии очага формоизменения ТЗ в результате освобождения трубной заготовки от контакта с валками.

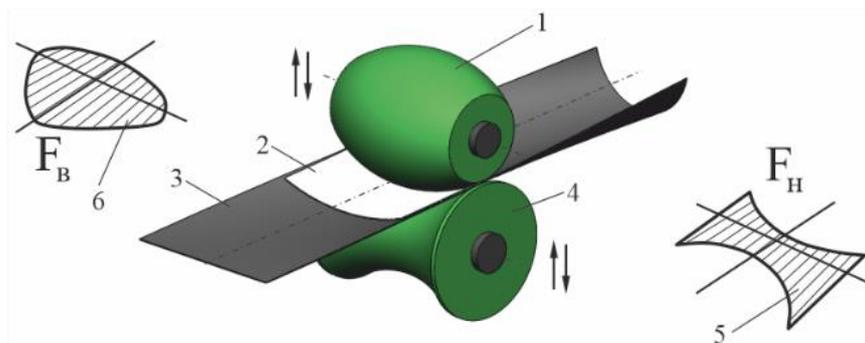


Рисунок 1.10 – Фиксирование контактных отпечатков в валковом калибре: 1 – верхний валок; 2 – копировальная бумага; 3 – трубная заготовка; 4 – нижний валок; 5 – контактный отпечаток с нижним валком; 6 – контактный отпечаток с верхним валком

В работах [33,34] предложена методика расчета контактных отпечатков, которые определяются следующими параметрами: $L_{дв}$ - длина контакта по дну с верхним валком; $S_{в}$ - площадь контакта с верхним валком; $L_{рн}$ - длина контакта по реборде с нижним валком; $S_{н}$ - площадь контакта с нижним валком; $S_{в. опер.}$ - площадь контакта опережения с верхним валком; $S_{в. отст.}$ - площадь контакта отставания с верхним валком; $S_{н. опер.}$ - площадь контакта опережения с нижним валком; $S_{н. отст.}$ - площадь контакта отставания с нижним валком.

Схема к определению параметров контактных отпечатков представлена на рисунке – 1.11.

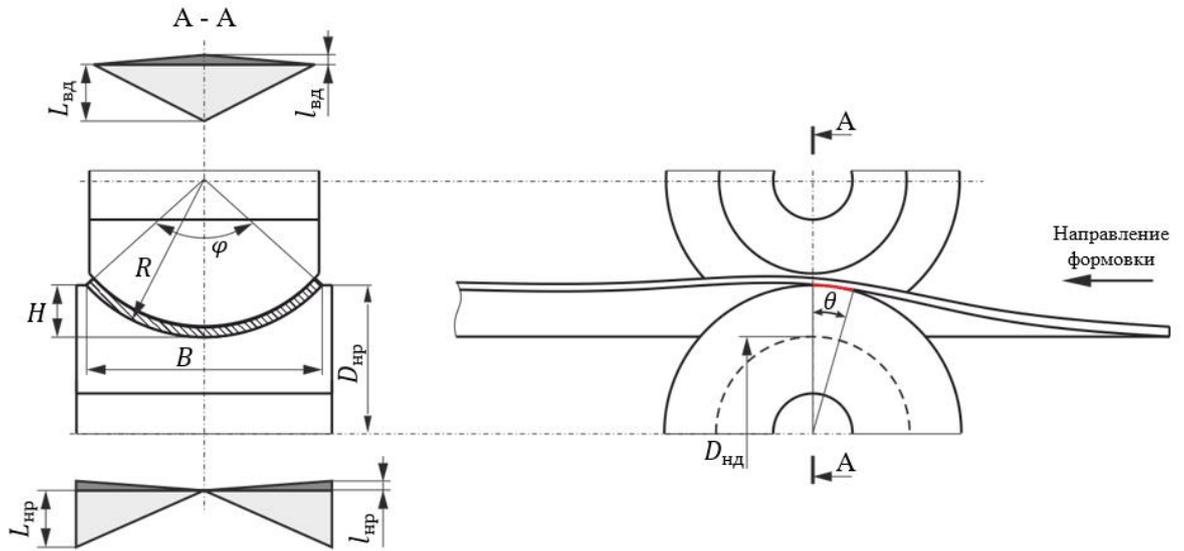


Рисунок 1.11 – Схема к определению параметров контактных отпечатков

Радиус первого валка в сечении кромки заготовки, мм

$$R_k = \frac{D_{нд}}{2} + R_H \left(1 - \cos \frac{B}{2 \cdot R_H} \right), \quad (1.22)$$

где $D_{нд}$ – диаметр нижнего валка по дну, мм;

R_k – радиус формовки нижнего валка, мм;

B – ширина заготовки, находящейся в контакте с валком, мм.

Высота профиля, мм

$$H = R_H \left(1 - \cos \frac{B}{2 \cdot R_H} \right), \quad (1.23)$$

Длина контакта кромки с валком, мм

$$L_{нд} = R_H \cdot \arccos \left(\frac{\frac{D_{нд}}{2} + H}{R_H} \right), \quad (1.24)$$

Длина контакта кромки с валком с учетом 10% распушинивания, мм

$$l_{нд} = 0,1 \cdot L_{нд}. \quad (1.25)$$

В работе [35] для исследования формоизменения стальной полосы в V-профиля из стальной полосы DP 780 использовался промышленный профилегибочный стан состоящая из трех клеток. Расстояние между клетями составляло 305 мм. Зазор между валками задавался равным толщине материала с помощью щупов. При формовке полосы установлено три зоны -

рисунок 1.12: zone 1 – входная зона, в которой полоса приобретает вогнутую кривизну вверх по мере приближения полосы к контакту с валком; zone 2 – контактная зона, в которой полоса приобретает вогнутую кривизну вниз когда полоса проходит по валку, zone 3 – выходная зона, в которой полоса распружинивается.

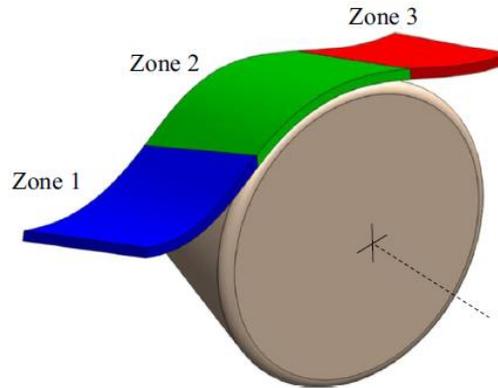


Рисунок 1.12 – Схема формоизменения полосы: zone 1 – входная зона; zone 2 – контактная зона;
zone 3 – выходная зона

1.5 Выводы по главе

Проведенный анализ отечественной и иностранной научной литературы, показывает, что в электросварочном производстве применяется большое количество различных схем формовки и типы валкового инструмента от традиционного до многовалкового и роликового.

Продолжается тенденция перехода от традиционного двухвалкового деформирующего инструмента, к многовалковому и роликовому инструменту, которые в отличие от традиционного инструмента позволяет применять один комплект для широкого размерного сортамента труб. Однако, отсутствует методики расчета по результатам которых возможно обоснованно перейти к многовалковому и валково-роликовому инструменту.

В существующих методиках применяют расчет контактной поверхности, основанный на замене криволинейной (нелинейной) контактной границы двумя хордами. Применения такого способа вычисления может приводить к определенным погрешностям при определении границ и площади контактной поверхности и, соответственно к неточностям определения энергосиловых параметров процесса формоизменения полосы. Таким образом, определение контактных поверхностей является важной задачей для расчета энергосиловых параметров и возникает необходимость определения контактных площадей путем экспериментальных исследований.

Глава 2 Анализ геометрических параметров очагов сворачивания и деформированного состояния трубной заготовки

2.1 Очаг сворачивания для однорадиусной калибровки

В настоящее время в непрерывных валковых формовочных станках применяют большое количество типов калибровок и их возможные комбинации [4-7,12-17]. Часто используемые калибровки являются, однорадиусная, двухрадиусная с постоянным периферийным участком, двухрадиусная с переменным периферийным участком.

Расчет и анализ геометрических параметров очагов сворачивания проводили по профилям трубной заготовки в сечениях деформационных клетей для электросварной трубы типоразмера $D_T \times S_T = 50 \times 1,5$ мм класса прочности К52 в условия лабораторного ТЭСА 30-50. Для компоновки, состоящей из четырех открытых и трех закрытых клетей выбраны три типа калибровок: однорадиусная, двухрадиусная с постоянными периферийными участками и двухрадиусная с переменными периферийными участками.

Ширина исходной трубной заготовки [36]:

$$B_{ТЗ} = \pi \cdot D_T \cdot [1 + (\Delta_{\Phi} \times n_3 + \Delta_{СВ} + \Delta_K \times n_K)], \quad (2.1)$$

где D_T – диаметр готовой трубы, мм;

n_3 – количество формовочных клетей закрытого типа, шт.;

n_K – количество калибровочных клетей, шт.;

Δ_{Φ} – допуск на формовку в закрытых калибрах принимаем в пределах одного 0,05-1 % от периметра;

$\Delta_{СВ}$ – допуск на уменьшение периметра в сварочном узле принимаем в пределах 0,07 – 1,5 % от периметра трубы;

Δ_K – допуск на редуцирование в калибровочных клетях принимаем в пределах одного 0,05-1 % от периметра.

Изменение периметра трубной заготовки для трубы типоразмера $D_T \times S_T = 50 \times 1,5$ мм в клетях формовочного стана, представлено на рисунке 2.1. Для однорадиусной калибровки, двухрадиусной калибровки с постоянными периферийными участками и двухрадиусной калибровки с переменными периферийными участками изменение периметра трубной заготовки идентичны.

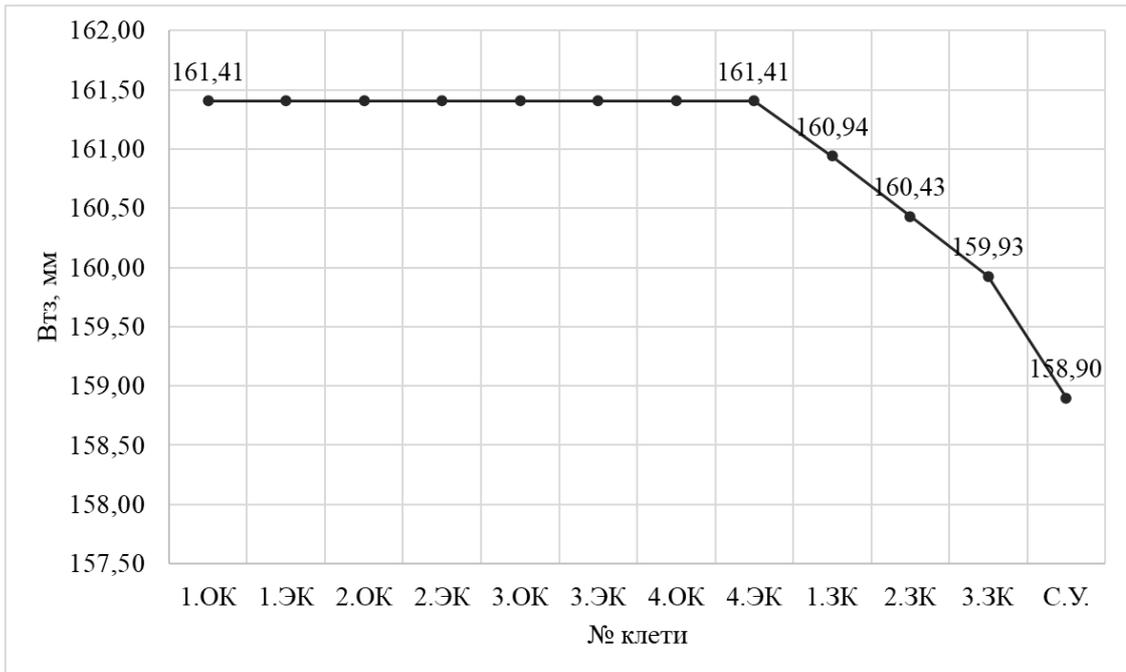


Рисунок 2.1 – Изменение периметра трубной заготовки для трубы типоразмера $D_T \times S_T = 50 \times 1,5$ мм в клетях формовочного стана

Примечание: 1.ОК – первый открытый калибр; 1.ЭК – первый эджерный калибр; 2.ОК – второй открытый калибр; 2.ЭК – второй эджерный калибр; 3.ОК – третий открытый калибр; 3.ЭК – третий эджерный калибр; 4.ОК – четвертый открытый калибр; 4.ЭК – четвертый эджерный калибр; 1.ЗК – первый закрытый калибр; 2.ЗК – второй закрытый калибр; 3.ЗК – третий закрытый калибр; С.У. – сварочный узел.

При определении радиусов формовки ТЗ с однорадиусной калибровкой использовали график распределения углов подгибки трубной заготовки [1-5,37] – рисунок 2.2.

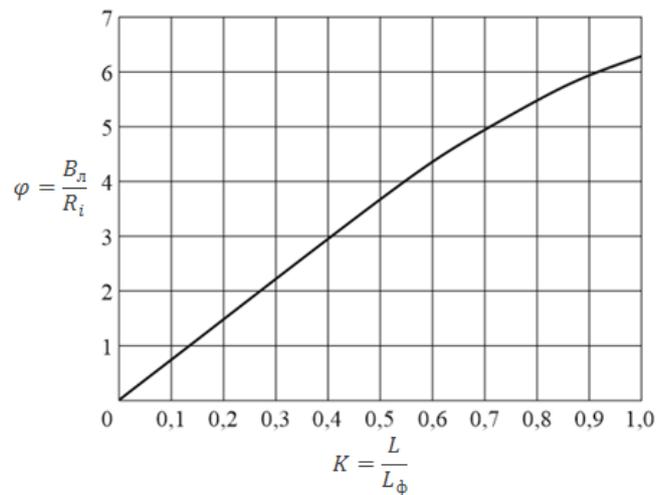


Рисунок 2.2 – Распределение углов подгибки трубной заготовки для однорадиусной калибровки

Углы сворачивания трубной заготовки по очагу сворачиванию для трубы типоразмера $D_T \times S_T = 50 \times 1,5$ мм представлены на рисунке 2.3.

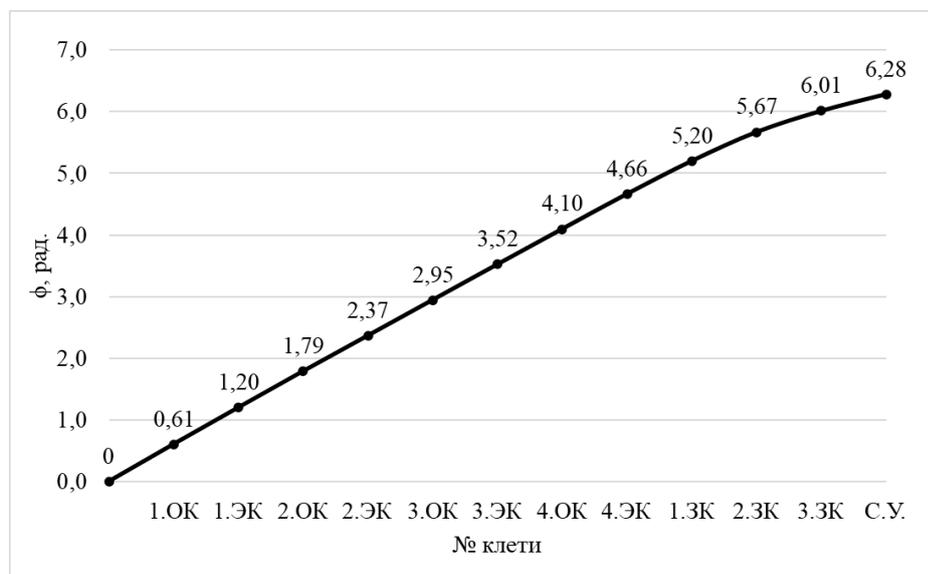


Рисунок 2.3 – Углы сворачивания трубной заготовки по клетям формовочного стана для трубы типоразмера $D_T \times S_T = 50 \times 1,5$ мм с однорадиусной калибровкой

После определения периметров и углов подгибки трубной заготовки в клетях стана, определяем радиусы формовки:

$$R_i = \frac{B_{ТЗi}}{\varphi_i}. \quad (2.2)$$

В таблице 2.1 представлены основные параметры профиля ТЗ для трубы типоразмера $D_T \times S_T = 50 \times 1,5$ мм с однорадиусной калибровкой.

Таблица 2.1 – Основные параметры профиля ТЗ для трубы типоразмера $D_T \times S_T = 50 \times 1,5$ мм с однорадиусной калибровкой

Клеть	1.ОК	2.ОК	3.ОК	4.ОК	1.3К	2.3К	3.3К	С.У.
$B_{ТЗ}$, мм	161,41	161,41	161,41	161,41	160,94	160,43	159,93	158,90
φ , град.	34,68	102,50	168,76	234,72	297,94	324,81	344,48	360,00
φ , рад.	0,61	1,79	2,95	4,10	5,20	5,67	6,01	6,28
R_H , мм	264,61	90,17	54,72	39,37	30,95	28,29	26,61	25,30
R_B , мм	263,11	88,67	53,22	37,87	29,45	26,79	25,11	23,80

Схема сворачивания («цветок» формовки) – рисунок 2.3 формовочного стана с однорядной калибровкой для трубы типоразмера $D_T \times S_T = 50 \times 1,5$ мм, представлена на рисунке 2.4.

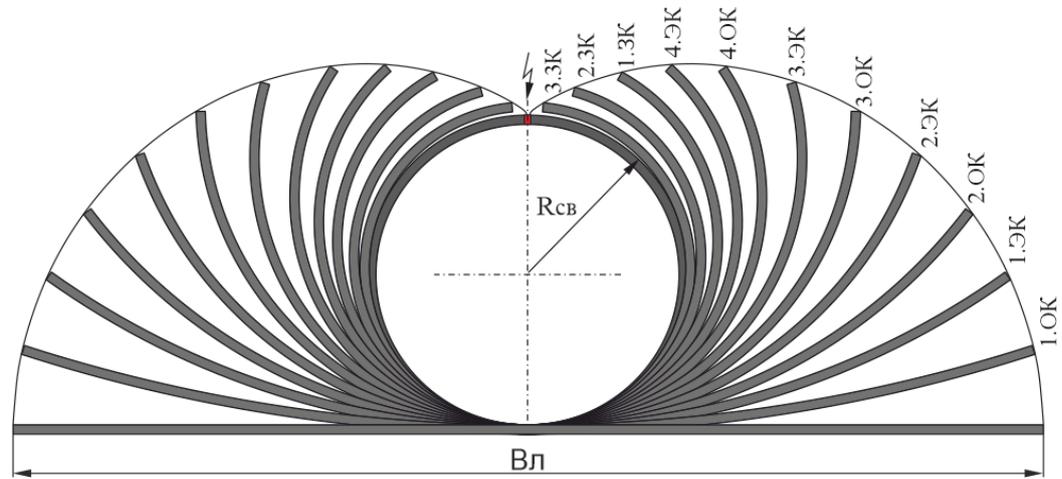
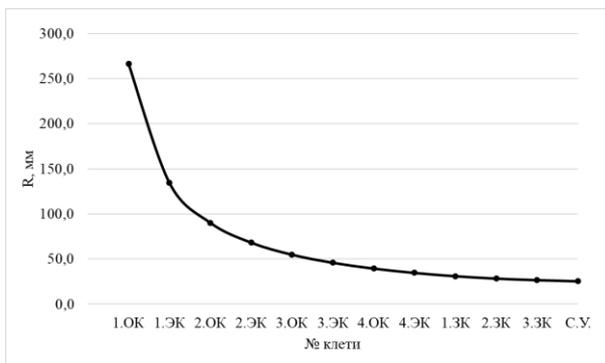
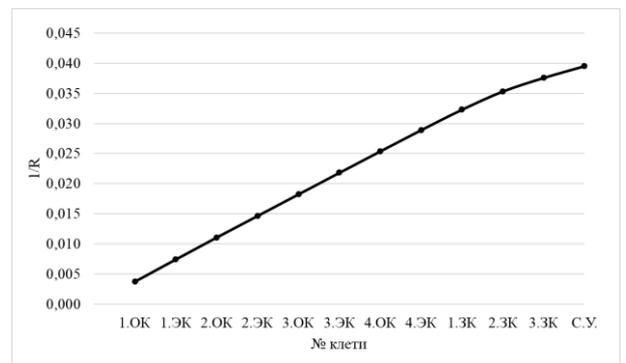


Рисунок 2.4 – Схема сворачивания трубной заготовки для трубы типоразмера $D_T \times S_T = 50 \times 1,5$ мм с однорядной калибровкой

График распределения радиусов формовки трубной заготовки и график кривизны профиля калибров при формовке трубы типоразмера $D_T \times S_T = 50 \times 1,5$ мм в клетях формовочного стана ТЭСА 30-50, состоящий из четырех открытых, трех закрытых и четырех эджерных клеток представлены на рисунке 2.5 Эти графики дают зависимость принципиального изменения радиусовгиба и кривизн для всех выделенных участков. Основным фактором, исключающим возможность образования гофр, является плавное изменение кривой кривизны участков калибра.



а

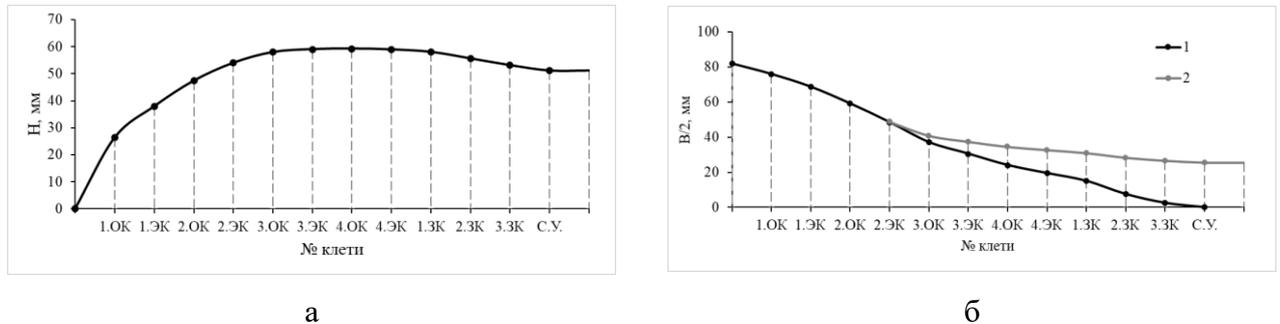


б

а – радиусы формовки ТЗ; б – кривизны ТЗ

Рисунок 2.5 – Графики распределения радиусов формовки и кривизн трубной заготовки с однорядной калибровкой по клетям формовочного стана

На рисунке 2.6 показаны графики высот и ширин профиля трубной заготовки по клетям в формовочного стана для однорядной калибровки, которые дают возможность оценить изменение высот и ширин по всему очагу сворачиванию и представить максимальные габариты трубной заготовки по высоте от дна ТЗ до кромки ТЗ и по ширине на участке с полным охватом от кромки до кромки - 1, а на участке с не полным охватом по крайним точкам профиля ТЗ - 2.



а – высота ТЗ; б – ширина ТЗ

Рисунок 2.6 – Графики распределения высот и ширин трубной заготовки с однорядной калибровкой по клетям формовочного стана

2.2 Очаг сворачивания для двухрядной калибровки с постоянными периферийными участками

При определении радиусов формовки ТЗ с двухрядной калибровкой с постоянными периферийными участками использовали график распределения углов подгибки центральной части - 1 трубной заготовки – рисунок 2.7. Углы периферийных участков выбирали в диапазоне 40 - 45 градусов. Таки образом кривая -2 которая получается суммой центрального и двух периферийных углов является общей подгибкой трубной заготовки в формовочной клети.

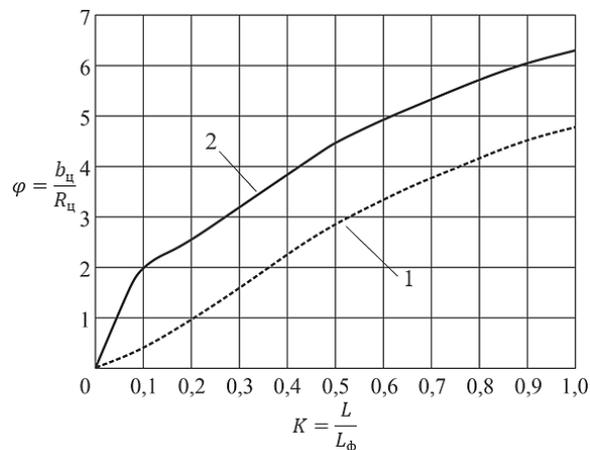


Рисунок 2.7 – Распределение углов центральной части трубной заготовки для двухрядной калибровки с постоянными периферийными участками равными 0,79 рад

Углы сворачивания центральной – 1, периферийных – 2 частей трубной заготовки и общей подгибки ТЗ – 3 по очагу сворачиванию для трубы типоразмера $D_T \times S_T = 50 \times 1,5$ мм с двухрадиусной калибровкой с постоянными периферийными участками равными $0,79$ рад, представлены на рисунке 2.8.

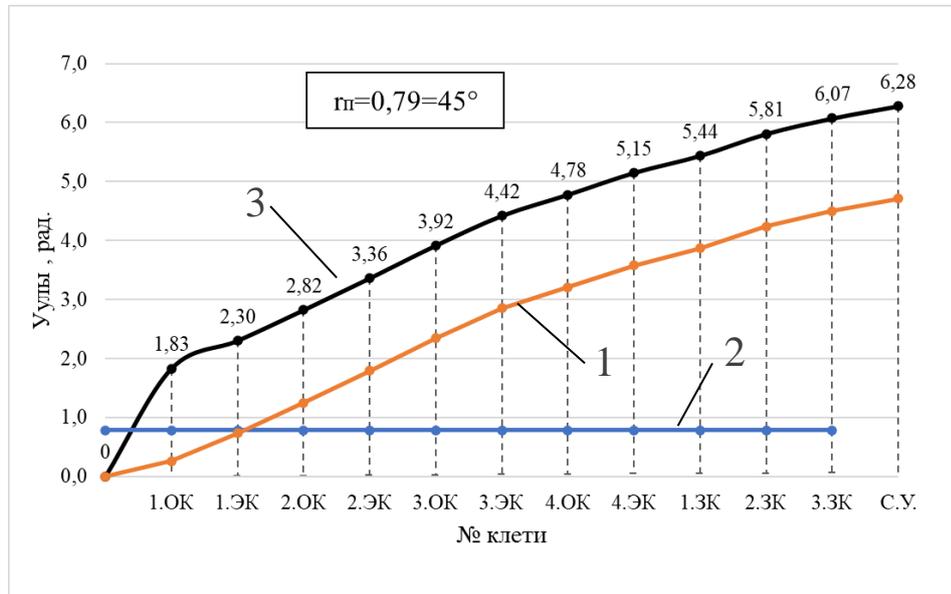


Рисунок 2.8 – Углы сворачивания центральной – 1, периферийных – 2 частей трубной заготовки и общей подгибки ТЗ – 3 для трубы типоразмера $D_T \times S_T = 50 \times 1,5$ мм с двухрадиусной калибровкой с постоянными периферийными участками

Радиусы формовки элементов профиля двухрадиусной калибровки рассчитывали следующим образом:

для центрального участка:

$$R_{ци} = \frac{b_{ци}}{\varphi_{ци}}, \quad (2.3)$$

для периферийного участка:

$$r_{п} = \frac{b_{п}}{\alpha_{п}}. \quad (2.4)$$

В таблице 2.2 представлены основные параметры профиля ТЗ и его элементов для трубы типоразмера $D_T \times S_T = 50 \times 1,5$ мм с двухрадиусной калибровкой с постоянными периферийными участками.

Таблица 2.2 – Параметры профиля ТЗ и его элементов для трубы типоразмера $D_T \times S_T = 50 \times 1,5$ мм с двухрадиусной калибровкой с постоянными периферийными участками

Клеть	1.ОК	2.ОК	3.ОК	4.ОК	1.3К	2.3К	3.3К	С.У.
$b_{ц}$, мм	121,44	121,44	121,44	121,44	120,97	120,46	119,96	118,93
$b_{п}$, мм	39,97	39,97	39,97	39,97	39,97	39,97	39,97	39,97
$B_{ТЗ}$, мм	161,41	161,41	161,41	161,41	160,94	160,43	159,93	158,9
φ , рад.	0,78	1,25	2,35	3,21	3,87	4,24	4,5	4,7
α , рад.	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79
$\varphi + 2\alpha$, рад.	2,36	2,83	3,93	4,79	5,45	5,82	6,08	6,28
$R_{цн}$, мм	155,34	97,15	51,67	37,83	31,26	28,41	26,66	25,30
$R_{цв}$, мм	153,84	95,65	50,17	36,33	29,76	26,91	25,16	23,80
$r_{п}$, мм	25,3	25,3	25,3	25,3	25,3	25,3	25,3	25,3
$r_{в}$, мм	23,8	23,8	23,8	23,8	23,8	23,8	23,8	23,8

Схема сворачивания («цветок» формовки) формовочного стана с двухрадиусной калибровкой с постоянными периферийными участками для трубы типоразмера $D_T \times S_T = 50 \times 1,5$ мм, представлена на рисунке 2.9.

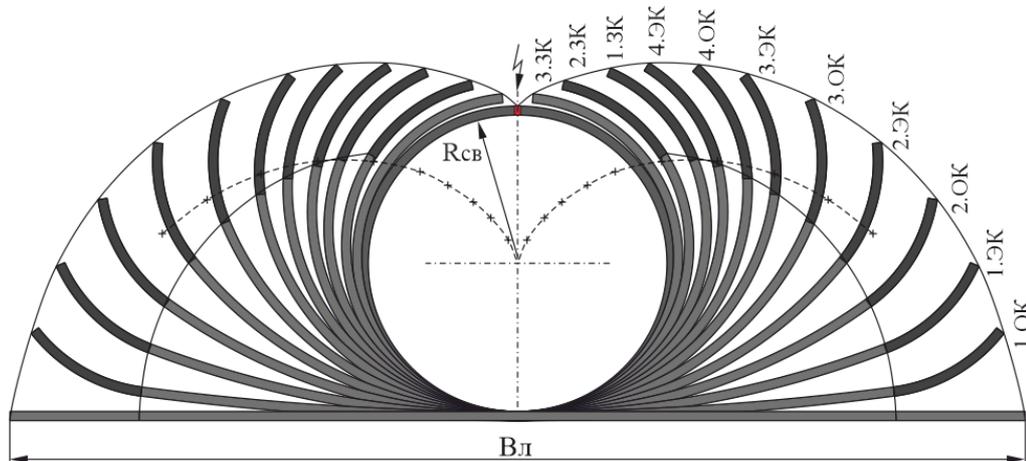
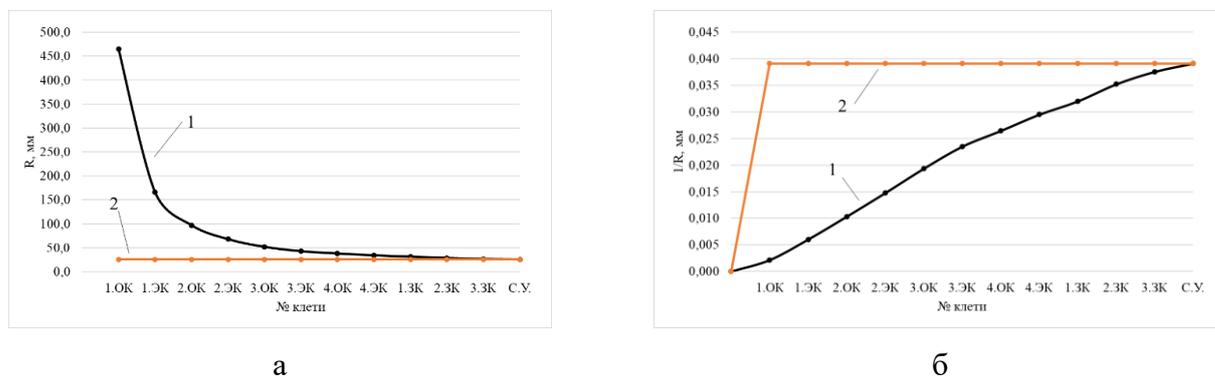


Рисунок 2.9 – Схема сворачивания трубной заготовки для трубы типоразмера $D_T \times S_T = 50 \times 1,5$ мм с двухрадиусной калибровкой с постоянными периферийными участками

График распределения радиусов формовки трубной заготовки и график кривизны по элементам профиля калибров при формовке трубы типоразмера $D_T \times S_T = 50 \times 1,5$ мм состоящий из центрального участка и двух периферийных участков представлены на рисунке 2.10. Эти графики дают зависимость принципиального изменения радиусовгиба по центральному и периферийному участку и кривизн по элементам. Основным фактором, исключая возможным

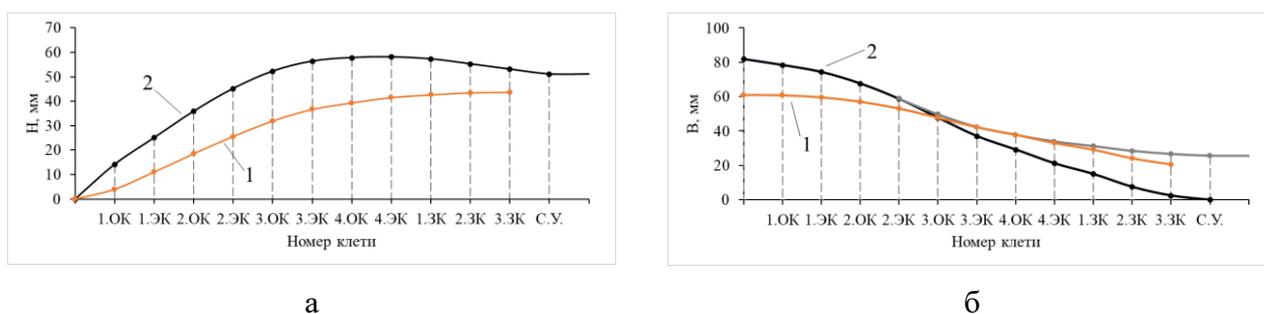
ность образования гофр, является плавное изменение кривой кривизны центрального участка профиля ТЗ.



а – радиусы формовки ТЗ; б – кривизны ТЗ

Рисунок 2.10 – Графики распределения радиусов формовки и кривизн трубной заготовки центрального - 1 и периферийных - 2 участков для двухрадиусной калибровки с постоянными периферийными участками

На рисунке 2.11 показаны графики высот и ширин профиля трубной заготовки по клетям формовочного стана для двухрадиусной калибровки с постоянными периферийными участками, которые дают возможность оценить изменение высот и ширин центральных - 1 и периферийных - 2 участков профиля по всему очагу сворачиванию и представить максимальные габариты трубной заготовки.



а – высоты участков ТЗ; б – ширины участков ТЗ

Рисунок 2.11 – Графики высот и ширин центральных - 1 и периферийных - 2 участков профиля трубной заготовки по клетям формовочного стана для двухрадиусной калибровки с постоянными периферийными участками

2.3 Очаг сворачивания для двухрадиусной калибровки с переменными периферийными участками

При определении радиусов формовки ТЗ с двухрадиусной калибровкой с переменными периферийными участками использовали график распределения углов подгибки центральной части – 1 и периферийной части - 2 трубной заготовки – рисунок 2.12. Углы периферийных участков выбирали в диапазоне 40 - 45 градусов. Таким образом, кривая – 3, является общей подгибкой трубной заготовки в формовочной клетке, которая получается сложением центрального и двух периферийных углов. Вертикальная пунктирная линия является крайней границей, где профиль калибра строится по трем участкам, для целесообразно вести формовку с профилем состоящего из одного радиуса.

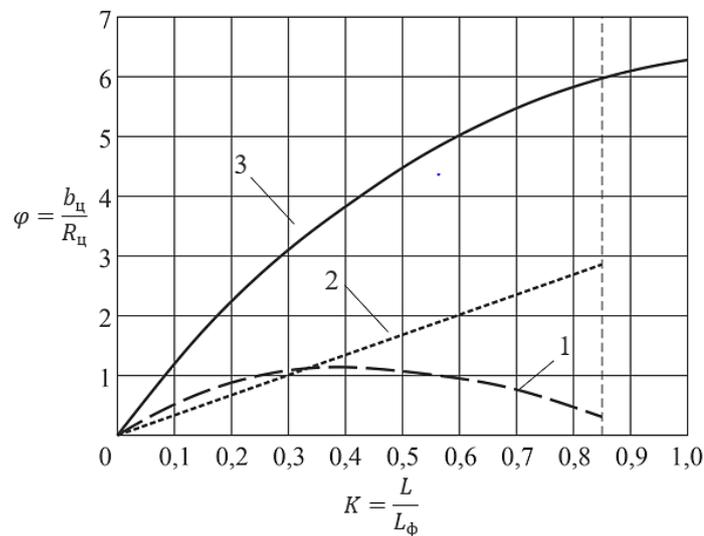


Рисунок 2.12 – Распределение углов центральной и периферийных частей трубной заготовки для двухрадиусной калибровки с переменными периферийными участками

Углы сворачивания центральной – 1, периферийных – 2 частей трубной заготовки и общей подгибки ТЗ – 3 по очагу сворачиванию для трубы типоразмера $D_T \times S_T = 50 \times 1,5$ мм с двухрадиусной калибровкой с переменными периферийными участками представлены на рисунке 2.13.

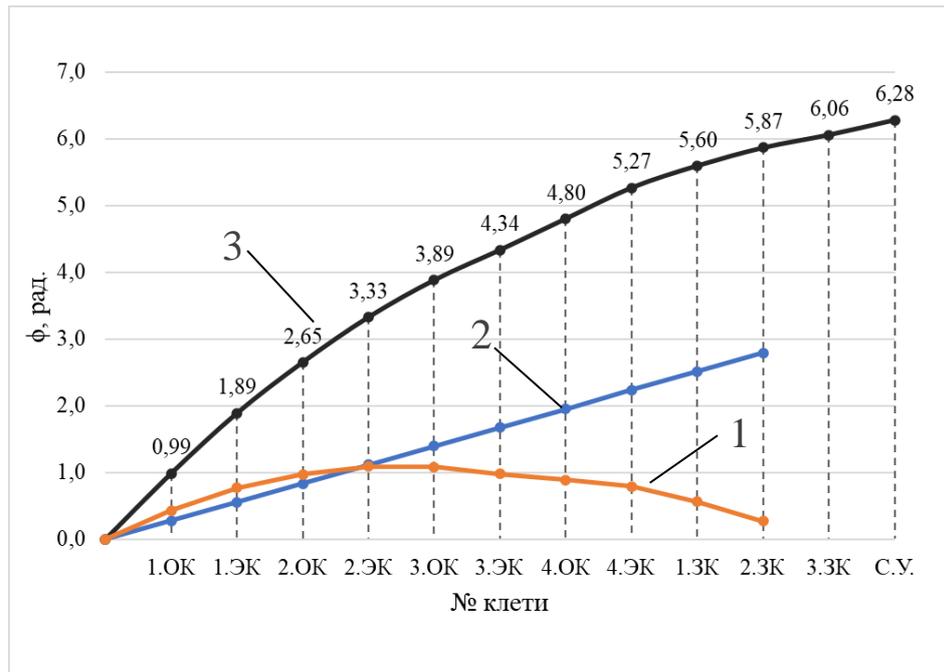


Рисунок 2.13 – Углы сворачивания центральной – 1, периферийных – 2 частей трубной заготовки и общей подгибки ТЗ – 3 по очагу сворачиванию для трубы типоразмера $D_T \times S_T = 50 \times 1,5$ мм с двухрадиусной калибровкой с переменными периферийными

Радиусы формовки элементов профиля двухрадиусной калибровки рассчитывали следующим образом:

для центрального участка:

$$R_{\text{ци}} = \frac{b_{\text{ци}}}{\varphi_{\text{ци}}}, \quad (2.5)$$

для периферийного участка:

$$r_{\text{п}} = \frac{b_{\text{п}}}{\alpha_{\text{п}}}. \quad (2.6)$$

В таблице 2.3 представлены основные параметры профиля ТЗ и его элементов для трубы типоразмера $D_T \times S_T = 50 \times 1,5$ мм с двухрадиусной калибровкой с переменными периферийными участками.

Таблица 2.3 – Параметры профиля ГЗ и его элементов для трубы типоразмера $D_T \times S_T = 50 \times 1,5$ мм с двухрадиусной калибровкой с переменными периферийными участками

Клеть	1.ОК	2.ОК	3.ОК	4.ОК	1.ЗК	2.ЗК	3.ЗК	С.У.
$b_{ц}, \text{ мм}$	146,53	116,77	87,01	57,25	27,02	11,63	159,93	158,90
$b_{п}, \text{ мм}$	14,88	44,64	74,40	104,16	133,92	148,80	-	-
$B_{ГЗ}, \text{ мм}$	161,41	161,41	161,41	161,41	160,94	160,43	159,93	158,90
$\varphi, \text{ рад.}$	0,43	0,98	1,09	0,89	0,56	0,28	6,06	6,28
$\alpha, \text{ рад.}$	0,28	0,84	1,40	1,96	2,52	2,80	-	-
$\varphi + 2 \cdot \alpha, \text{ рад.}$	0,99	2,65	3,89	4,80	5,60	5,87	6,02	6,28
$R_{цв}, \text{ мм}$	340,89	119,61	79,89	64,32	47,82	42,10	26,61	25,30
$r_{п}, \text{ мм}$	26,61	26,61	26,61	26,61	26,61	26,61	-	-

Схема сворачивания («цветок» калибровки) формовочного стана с двухрадиусной калибровкой с переменными периферийными участками для трубы типоразмера $D_T \times S_T = 50 \times 1,5$ мм, представлена на рисунке 2.14.

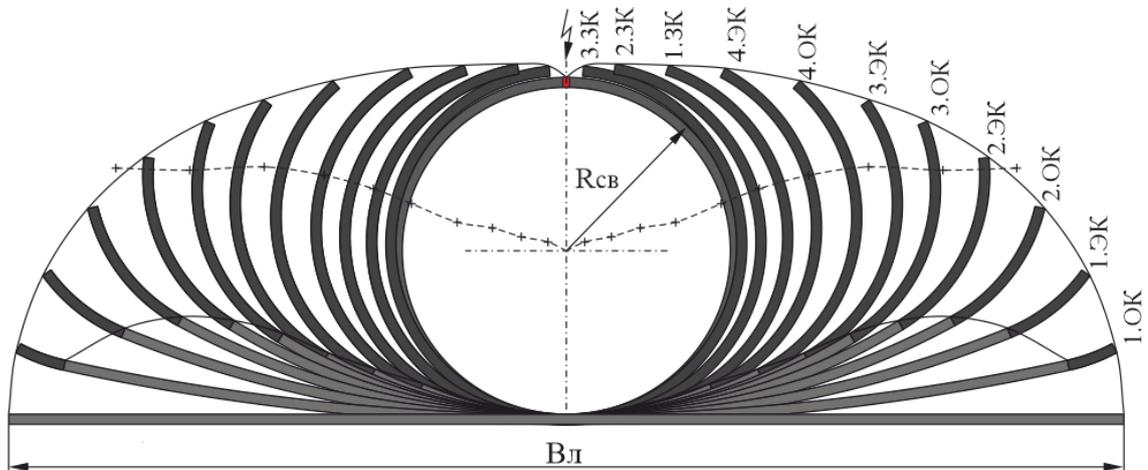
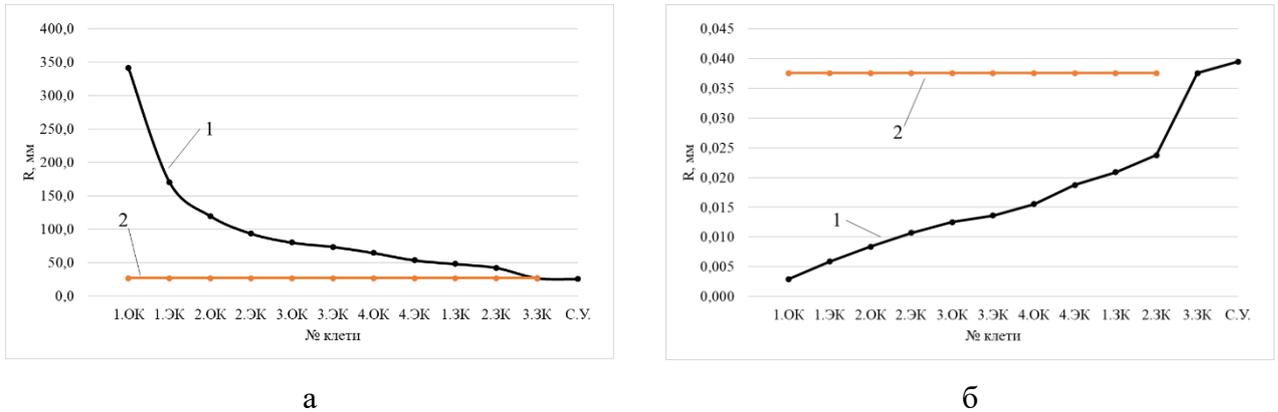


Рисунок 2.14 – Схема сворачивания трубной заготовки для трубы типоразмера $D_T \times S_T = 50 \times 1,5$ мм с двухрадиусной калибровкой с переменными периферийными участками

График распределения радиусов формовки трубной заготовки и график кривизны по элементам профиля калибров при формовке трубы типоразмера $D_T \times S_T = 50 \times 1,5$ мм состоящий из центрального участка и двух переменных периферийных участков представлены на рисунке 2.15. Эти графики дают зависимость принципиального изменения радиусовгиба по центральному и переменному периферийному участку и кривизну по элементам. Основным фактором,

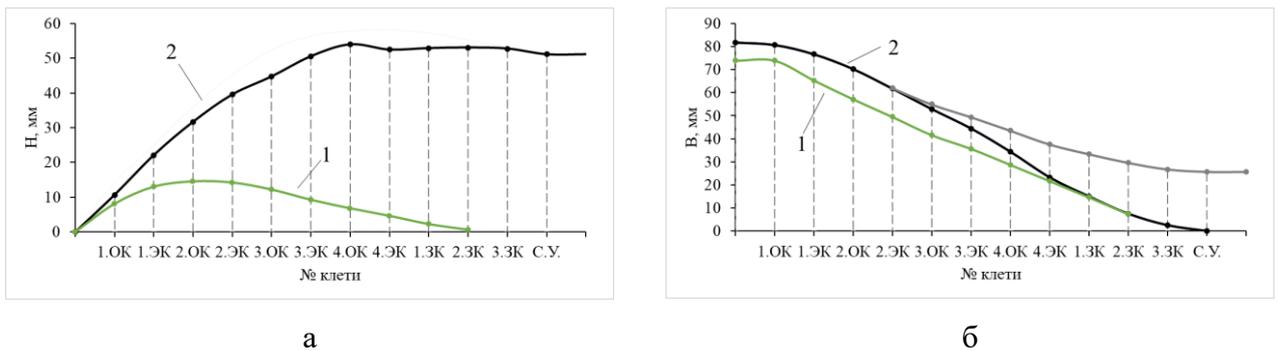
исключая возможность образования гофр, является плавное изменение кривизны центрального - 1 и периферийного - 2 участков профиля ТЗ.



а – радиусы формовки ТЗ; б – кривизны ТЗ

Рисунок 2.15 – Графики распределения радиусов формовки и кривизн трубной заготовки центрального - 1 и периферийного - 2 участков для двухрадиусной калибровки с переменными периферийными участками

На рисунке 2.16 показаны графики высот и ширин профиля трубной заготовки по клетям формовочного стана для двухрадиусной калибровки с переменными периферийными участками, которые дают возможность оценить изменение высот и ширин центрального - 1 и переменных периферийных - 2 участков профиля по всему очагу сворачиванию и представить максимальные габариты трубной заготовки.



а – высоты участков ТЗ; б – ширины участков ТЗ

Рисунок 2.16 – Графики высот и ширин центрального - 1 и периферийных - 2 участков профиля трубной заготовки по клетям формовочного стана для двухрадиусной калибровки с переменными периферийными участками

2.4 Анализ деформированного состояния и работы гибо трубной заготовки

Определенный уровень значений продольных деформаций кромок трубной заготовки, является одним из основных критерием устойчивого формоизменения ТЗ по всему очагу сворачивания [11,13,38,39]. В ряде научно-исследовательских работ сформулированы критерии качественного формоизменения трубной заготовки формовки, которые требуют: отсутствия локальных всплесков продольных деформаций между соседними формовочными клетями; максимально возможного снижения неравномерности деформаций.

При непрерывной формовке полосы в очаге сворачивания трубной заготовки на ее кромках возникают продольные растягивающие деформации и напряжения [11-13,35,39,40,41]. Расчет деформаций по всему очагу сворачивания трубной заготовки в непрерывных формовочных участках, в основу которого заложен характер изменения геометрии полосы в фиксированных волокнах трубной заготовки по всем калибрам.

На рисунке 2.17 представлена схема сворачивания трубной заготовки для прямолинейного очага сворачивания и траектории четырех фиксированных волокон по ширине полосы [36,42]. Исходные материальные волокна 0, 1, 2, 3 расположенные в сечении начального положения полосы B_d , которая формуется в клети (1.ОК) на радиус R_{ni} и на высоту профиля H_i . Далее из первой клети (1.ОК), как показано на схеме, полоса перемещается во вторую клеть (2.ОК) с радиусом формовки R_{ni+1} и высотой профиля H_{i+1} . После формовки полосы в первой клети, фиксированные материальные волокна займут новое положение в пространстве и будут иметь значения 0', 1', 2', 3'. Относительно этих двух сечений и производился расчет траектории перемещения фиксированных волокон. Для последующих волокон расчет ведется аналогично с корректировкой положения нулевого волокна. Все волокна, кроме центрального волокна совершают винтовое движение. Центральное (нулевое) волокно движется по прямой траектории.

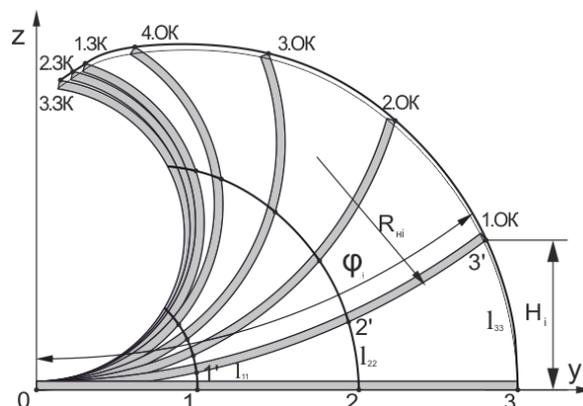


Рисунок 2.17 - Схема к расчету напряженно-деформированного состояния с трубной заготовки

Координаты z_i и y_i и длины волокон - l_i по фиксированным точкам (0,1,2,3):

$$z_i = R_n \cdot \left(1 - \cos \frac{\varphi_i}{2}\right), \quad (2.7)$$

$$y_i = \frac{B_n}{2} - R_n \cdot \sin \frac{\varphi_i}{2}, \quad (2.8)$$

$$y_i = \frac{B_n}{2} - R_n \cdot \sin \frac{\varphi_i}{2} - h, \quad (2.9)$$

$$l_i = \sqrt{B_n^2 + y_i^2 + z_i^2}, \quad (2.10)$$

где R_n – радиус калибра;

φ_i – угол калибра;

B_n – ширина исходной полосы;

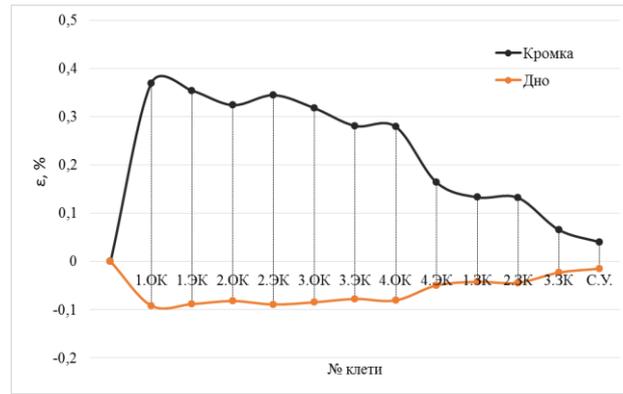
h – величина опускания центрального волокна относительно начального положения (для прямолинейного очага сворачивания $h=0$).

Значения продольной деформации в точках 0, 1', 2', 3':

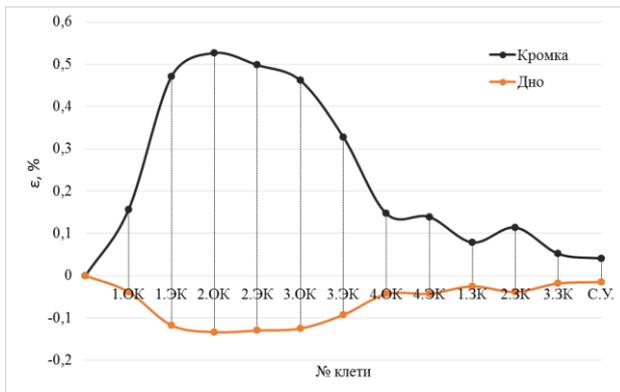
$$\begin{aligned} \varepsilon_{00} &= \frac{l_{00} - l_{22}}{l_{22}} \cdot 100\%, \\ \varepsilon_{11} &= \frac{l_{11} - l_{22}}{l_{22}} \cdot 100\%, \\ \varepsilon_{22} &= \frac{l_{22} - l_{22}}{l_{22}} \cdot 100\%, \\ \varepsilon_{33} &= \frac{l_{33} - l_{22}}{l_{22}} \cdot 100\%. \end{aligned} \quad (2.11)$$

Поля продольных деформаций для каждой калибровки по длине очага деформации на участке формовочного стана и по ширине формируемой заготовки, при формоизменении в четырех открытых, трех закрытых и четырех эджерных клетях, позволяет провести анализ геометрических параметров очага сворачивания.

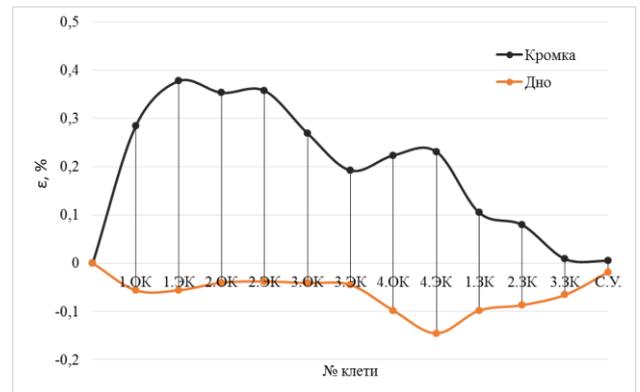
Поля продольных деформаций для трубы типоразмера $D_T \times S_T = 50 \times 1,5$ мм по трем схемам сворачивания (однорядная калибровка, двухрядные калибровки с постоянными и переменными периферийными участками) представлены на рисунке 2.18.



а



б



в

а - однорадиусная калибровка; б - двухрадиусная калибровка с постоянными периферийными участками; в - двухрадиусная калибровка с переменными периферийными участками.

Рисунок 2.18 – Поля продольных деформаций для трубы типоразмера $D_T \times S_T = 50 \times 1,5$ мм по трем схемам сворачивания

Результаты расчета деформированного состояния для трех типов калибровок показали, что поля продольных деформаций, ограничивающиеся волокнами на кромке и по дну ТЗ показывают, что при однорадиусной схеме сворачивания максимальное значение растягивающих продольных деформаций достигается на кромке в первой формовочной клетки ($\varepsilon_{xx} = 0,37\%$) далее деформация постепенно уменьшаются. Максимальное значение сжимающих продольных деформаций находящаяся по дну ТЗ, достигается в первой формовочной клетки ($\varepsilon_{xx} = 0,09\%$) и на протяжении участка открытых калибров изменяется не значительно.

При двухрадиусной схеме сворачивания с постоянными периферийными участками максимальное значение растягивающих продольных деформаций достигается во второй формовочной клетки ($\varepsilon_{xx} = 0,52\%$) далее деформация постепенно уменьшаются. Максимальное значение сжимающих продольных деформаций находящаяся по дну ТЗ, достигается во второй формовочной и второй эджерной клетки ($\varepsilon_{xx} = 0,13\%$) далее деформация постепенно уменьшаются.

При двухрадиусной схеме сворачивания с переменными периферийными участками максимальное значение растягивающих продольных деформаций достигается во второй формовочной клетки ($\varepsilon_{xx}=0,38\%$) далее деформация постепенно уменьшаются. Максимальное значение сжимающих продольных деформаций по дну ТЗ, достигается в четвертой эджерной клетки ($\varepsilon_{xx}=0,15\%$).

В процессе формоизменения трубной заготовки в калибрах формовочного стана продольные волокна деформируются. Калибровкой профиля валкового инструмента, возможно, добиться минимальной деформации этих волокон, таким образом повысить устойчивость трубной заготовки в процессе формоизменения, не допустить образования гофров и снизить до минимума работы деформации [9,43-48].

Работу деформации формоизменения трубной заготовки для трубы типоразмера $D_T \times S_T = 50 \times 1,5$ по клетям формовочного стана для трех калибровок рассчитанных ранее, в соответствии с углами сворачивания ТЗ определяли следующим образом.

Работа деформации, необходимая для формоизменения ТЗ.

$$A_T = V_{Tzi} \cdot A_{уд}, \quad (2.12)$$

где A_T - работагиба листа, Дж;

V_{Tzi} - объём изогнутой части листа, m^3 ;

$A_{уд}$ - удельная работа изгиба листа, H/m^2 .

Объём сформованной части трубной заготовки:

$$V_{Tzi} = 0,5 \cdot L_{mk} \cdot S_T \cdot (R_{ni} \cdot \varphi_i + R_{ni-1} \cdot \varphi_{i-1}), \quad (2.13)$$

где L_{mk} - длина изогнутой части ТЗ между клетями, мм;

S_T - толщина ТЗ, мм;

R_{ni} - наружный радиус ТЗ в клетки, мм;

R_{ni-1} - наружный радиус ТЗ в предыдущей клетки, мм;

φ_i - угол формовки ТЗ в клетки, рад;

φ_{i-1} - угол формовки ТЗ в предыдущей клетки, рад

Удельная работа деформациигиба в клетки:

$$A_{удi} = 0,5 \cdot \sigma_T \cdot \varepsilon_T + \sigma_T \cdot (\varepsilon_i - \varepsilon_T)^2 \cdot \Pi, \quad (2.14)$$

где σ_T – предел текучести, мПа;

ε_T – деформация предела текучести;

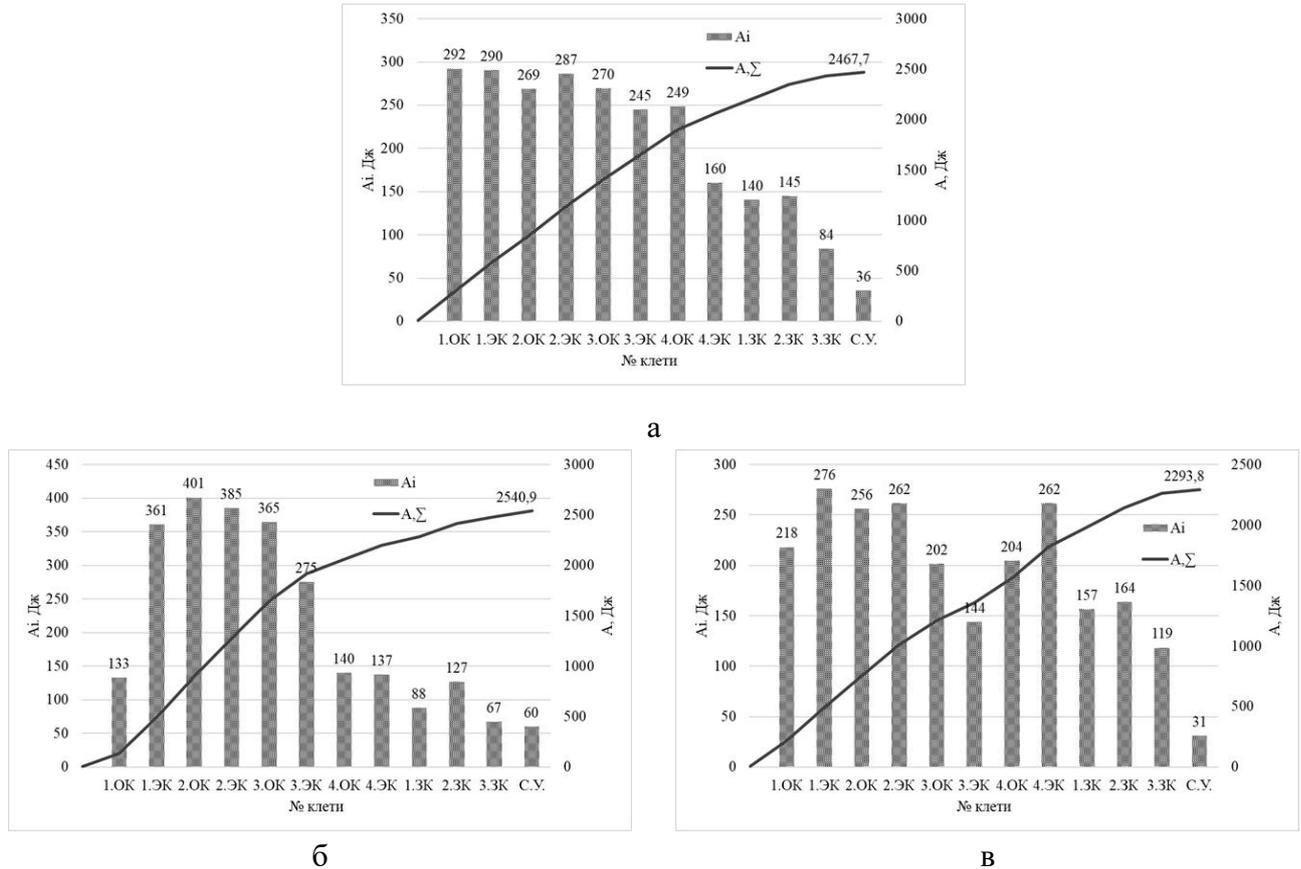
ε_i – интенсивность деформации;

Π – модуль упрочнения, мПа;

Суммарная работа деформации гiba по всему очагу сворачивания:

$$A_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n A_i. \quad (2.15)$$

Результаты расчета и распределение работы деформации гiba трубной заготовки по клетям формовочного стана и суммарной работы всего очага сворачивания по трем типам сворачивания (однорядусная калибровка, двухрядусные калибровки с постоянными и переменными периферийными участками) представлены на рисунке 2.19.



а – для однорядусной калибровки; б - для двухрядусной калибровки с постоянными периферийными участками; в – для двухрядусной калибровки с переменными периферийными участками

Рисунок 2.19 – Работа деформации гiba трубной заготовки по клетям формовочного стана и суммарная работа всего очага сворачивания по трем схемам сворачивания

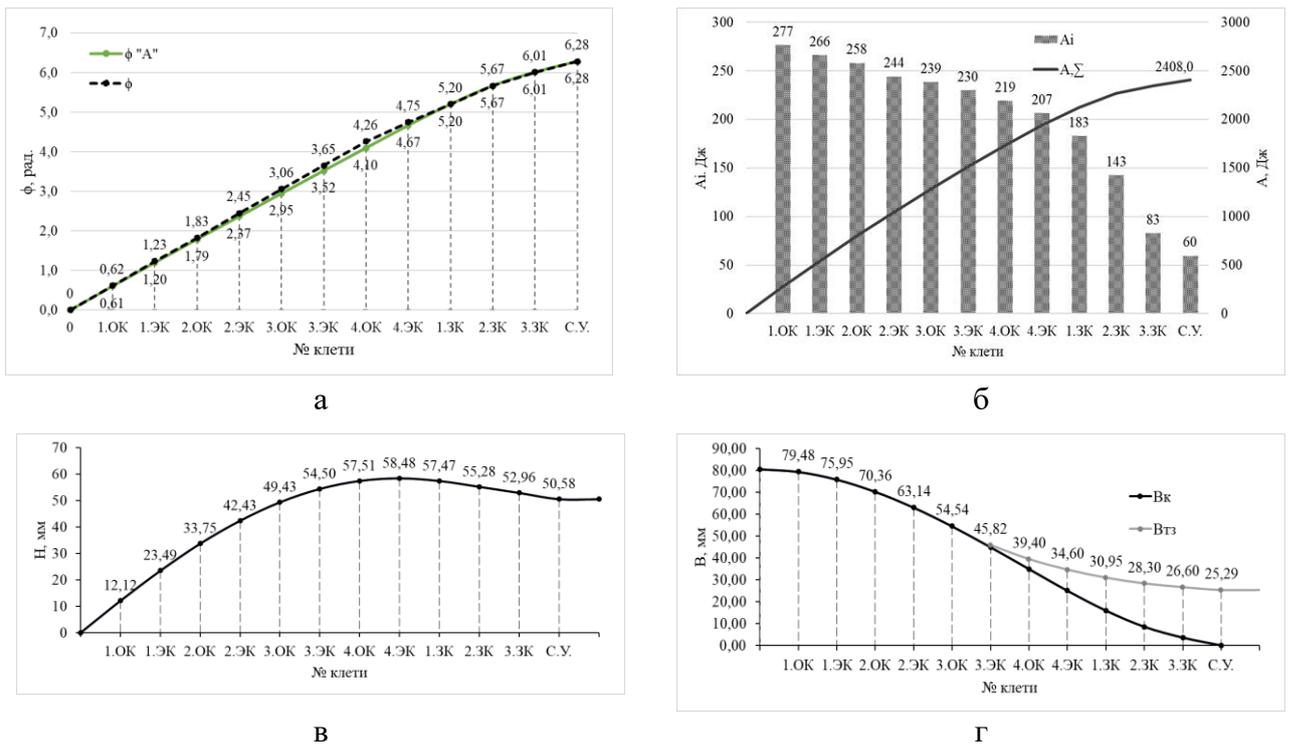
График работы деформации гiba формуемой трубной заготовки с однорядусной калибровкой показывает, что максимальная работа гiba достигается в первой формовочной клетке ($A_i = 292$ Дж), а суммарная работа деформации в очаге сворачивания составляет ($A_{\Sigma} = 2467,7$ Дж). При двухрядусной калибровки с постоянными периферийными участками, максимальное значение работы деформации гiba достигается во второй формовочной клетке ($A_i = 401$ Дж), а суммарная работа деформации в очаге сворачивания составляет ($A_{\Sigma} = 2540,9$ Дж). При двухрядусной

усной калибровки с переменными периферийными участками, максимальное значение работы деформации гйба достигается в первой эджерной клети ($A_i = 267$ Дж), а суммарная работа деформации в очаге сворачивания составляет ($A_{\Sigma} = 2293,8$ Дж).

Все три калибровки не соответствую равномерному минимуму работы деформации гйба трубной заготовки от клетки к клети, что может привести к уменьшению устойчивости процесса формоизменения трубной заготовки [43,47].

Для того чтобы добиться минимальной работы гйба ТЗ от клетки к клети необходимо изменить параметры калибровок путем корректирования величин углов сворачивания ТЗ. Углы сворачивания подбирали, таким образом, чтобы на участке открытых клетей работа деформации гйба уменьшалась равномерно.

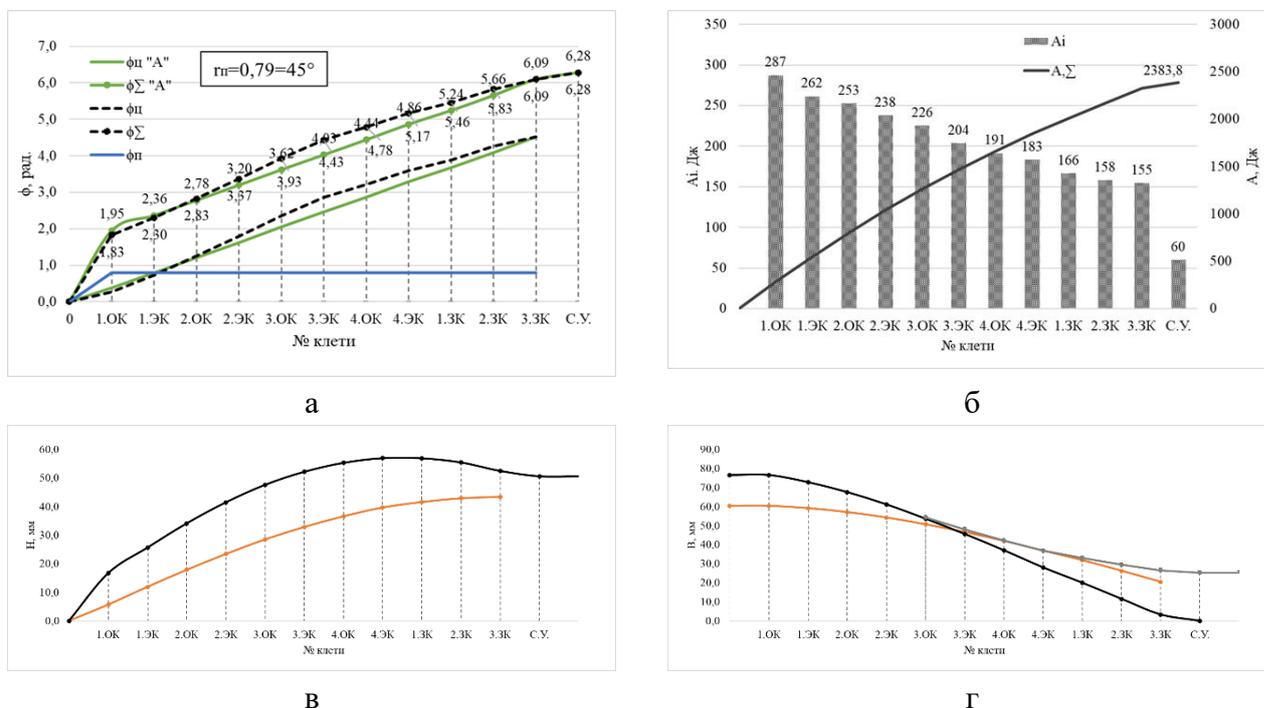
На рисунке 2.20 представлены скорректированные углы сворачивания с учетом минимизации работы деформации гйба трубной заготовки и геометрические параметры очага сворачивания для однорадиусной схемы сворачивания.



а – углы сворачивания ТЗ; б – работа гйба ТЗ по клетям формовочного стана и суммарная работа всего очага сворачивания; в – высота ТЗ; г – ширина ТЗ

Рисунок 2.20 – Скорректированные параметры трубной заготовки для трубы типоразмера $D_T \times S_T = 50 \times 1,5$ с однорадиусной схемой сворачивания

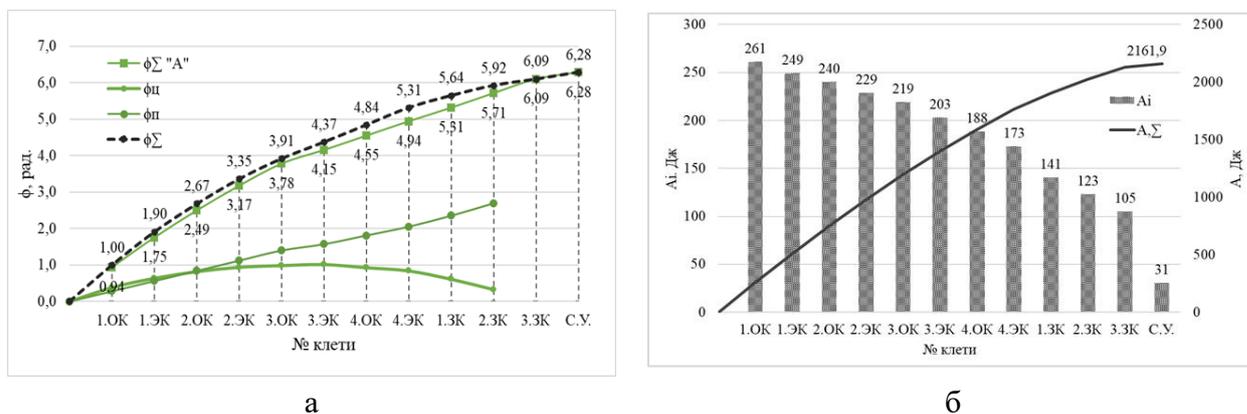
На рисунке 2.21 представлены скорректированные углы сворачивания с учетом минимизации работы деформации гiba трубной заготовки и геометрические параметры очага сворачивания для двухрадиусной схемы сворачивания с постоянными периферийными участками.

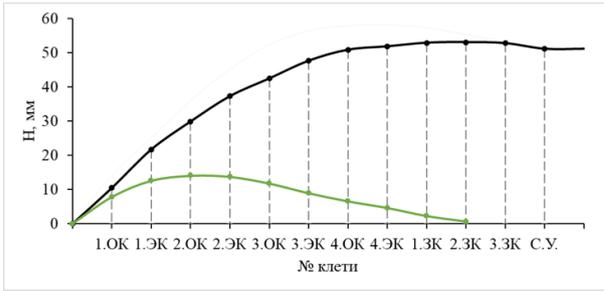


а – углы сворачивания ТЗ; б – работа гiba ТЗ по клетям формовочного стана и суммарная работа всего очага сворачивания; в – высота ТЗ; г – ширина ТЗ

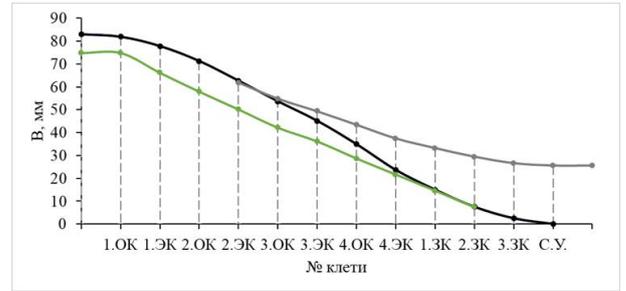
Рисунок 2.21 – Скорректированные параметры трубной заготовки для трубы типоразмера $D_T \times S_T = 50 \times 1,5$ с двухрадиусной схемой сворачивания с постоянными периферийными участками

На рисунке 2.22 представлены скорректированные углы сворачивания с учетом минимизации работы деформации гiba трубной заготовки и геометрические параметры очага сворачивания для двухрадиусной схемы сворачивания с переменными периферийными участками.





в

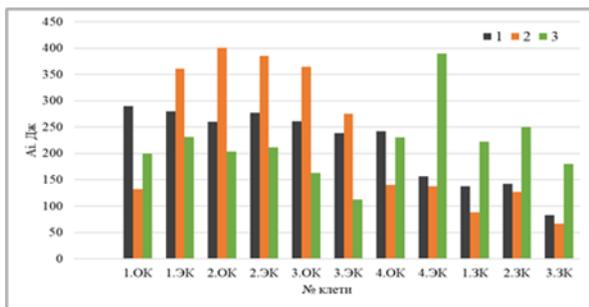


г

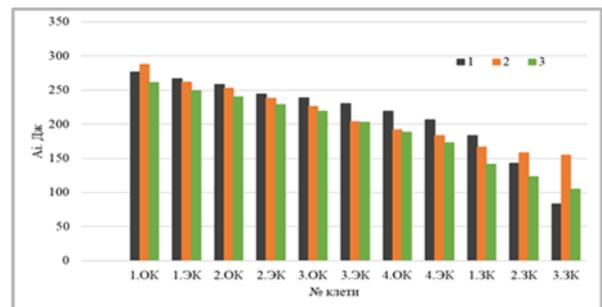
а – углы сворачивания ТЗ; б – работагиба ТЗ по клетям формовочного стана и суммарная работа всего очага сворачивания; в – высота ТЗ; г – ширина ТЗ

Рисунок 2.22 – Скорректированные параметры трубной заготовки для трубы типоразмера $D_T \times S_T = 50 \times 1,5$ с двухрадиусной схемой сворачивания с переменными периферийными участками

Сравнение результатов расчета работы деформациигиба трубной заготовки для трех калибровок до и после корректировки углов сворачивания представлено на рисунке – 2.23.



а



б

а – до корректировки углов сворачивания ТЗ; б – после корректировки углов сворачивания ТЗ

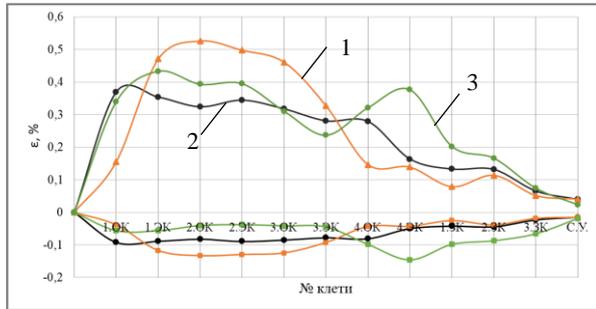
Рисунок 2.23 – Работа деформациигиба трубной заготовки для трубы типоразмера $D_T \times S_T = 50 \times 1,5$ для трех типов калибровок: 1– однорадиусная калибровка; 2– двухрадиусная калибровка с постоянными периферийными участками; 3– двухрадиусная калибровка с переменными периферийными участками

Анализ сравнения деформированного состояния трубной заготовки.

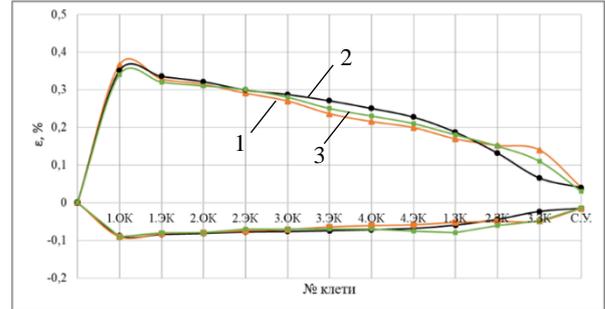
Сравнение результатов расчета деформированного состояния по трем типам калибровок до корректировки углов сворачивания рисунок – 2.24а показало, что максимальные значения продольных деформаций возникают при двухрадиусной калибровке с постоянными периферийными участками во второй формовочной клетке, в этой же клетке при однорадиусной калибровке и двухрадиусной калибровке с переменными периферийными участками величины продольных деформаций меньше соответственно на 17,94 % и 24,41 %. Во всех трех калибровок характер изменения величин продольных деформаций по длине очага сворачивания не равно-

мерный и разность деформации в трех последовательно стоящих клетях может изменяться от 1,6 до 2,2 раза.

Сравнение результатов расчета деформированного состояния по трем типам калибровок после корректировки углов сворачивания рисунок – 2.24б показало, что для всех трех калибровок максимальные значения продольных деформаций соответствует первой формовочной клети и характер изменения по длине очага сворачивания соответствует равномерному уменьшению от начала формовки до полного схождения кромок в сварочном узле.



а



б

а – до корректировки углов сворачивания ТЗ; б – после корректировки углов сворачивания ТЗ

Рисунок 2.24 – Деформированное состояние трубной заготовки для трубы типоразмера $D_T \times S_T = 50 \times 1,5$ мм для трех типов калибровок: 1– однорадиусная калибровка; 2– двухрадиусная калибровка с постоянными периферийными участками; 3– двухрадиусная калибровка с переменными периферийными участками

2.5 Выводы по главе

Анализ процесса формообразования трубной заготовки показал, что для всех трех типов калибровок распределение относительной продольной деформации соответствует неравномерному деформированию на участке открытых калибров. Максимальные деформации для однорядной калибровки соответствует 1.ОК ($\varepsilon_{33} = 0,37\%$); для двухрядных калибровок с постоянными и переменными периферийными участками соответственно в 2.ОК ($\varepsilon_{33} = 0,52\%$) и 1.ЭК ($\varepsilon_{33} = 0,43\%$).

После корректировки (уменьшение) углов сворачивания ТЗ, анализ процесса формообразования ТЗ показал, что на всем протяжении очага сворачивания ТЗ продольные деформации соответствует равномерному изменению. Максимальные величины деформаций для всех трех калибровок соответствует 1.ОК и имеет минимальные расхождения до 7%. Так же работа деформациигиба ТЗ соответствует равномерному уменьшению от начала формовки до сварочного узла, что способствует устойчивому формоизменению ТЗ. Наименьшая суммарная работа деформациигиба соответствует двухрядной калибровки с переменными периферийными участками и равна $A_{\Sigma} = 2161,9$ Дж.

Глава 3 Экспериментальное исследование условий контакта трубной заготовки с инструментом

3.1 Описание лабораторного формовочного стана ТЭСА 30 - 50

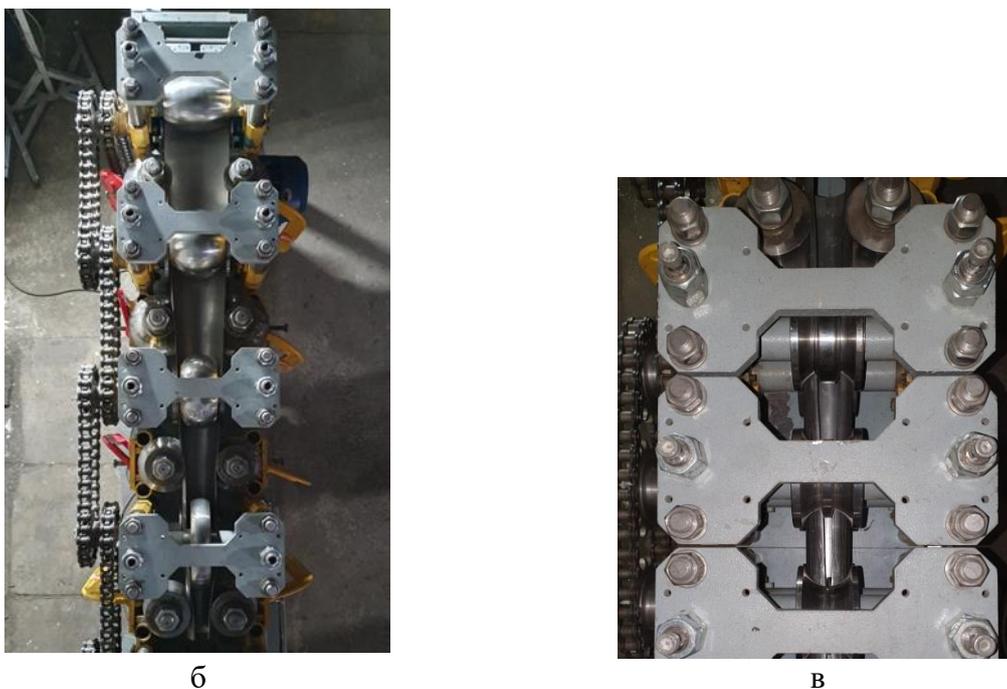
Одним из наиболее продуктивных и надежных методов исследования процессов ОМД является прямое физическое моделирование на реальном металле. Ограничения этого метода, как правило, связаны только с отсутствием специализированного оборудования для конкретного процесса. Для преодоления этого недостатка в условиях научно– производственного центра кафедры ОМД НИТУ «МИСиС» создан лабораторный комплекс физического моделирования наиболее распространённых процессов формовки электросварных прямошовных труб. Комплекс включает в себя лабораторный формовочный стан ТЭСА 30–50 и профилегибочную установку фирмы Profilbiegetechnik AG (Швейцария), позволяющие моделировать непрерывные [49,50] и дискретные процессы формовки электросварных труб в широком диапазоне.

Для изучения процессов непрерывной формовки труб применяются различные методы исследования. К ним можно отнести компьютерное моделирование [51-57] и физическое моделирование на действующем оборудовании [49,50,58,59]. Компьютерное моделирование процесса непрерывной формовки электросварных труб позволяет получать и анализировать параметры процесса формоизменения трубной заготовки и деформирующего оборудования. Технические параметры процессов, полученные с помощью компьютерного моделирования, требуют подтверждения на реальном металле.

Для возможности проверки теоретических результатов исследования на кафедре ОМД «МИСиС» разработан и спроектирован лабораторный формовочный стан ТЭСА 30–50 [50] – рисунок 3.1.



а



а – общий вид; б – участок открытых клеток; в – участок закрытых клеток

Рисунок 3.1 – Лабораторный формовочный стан ТЭСА 30–50

Лабораторной формовочный стан ТЭСА 30–50 состоит из входного стола, где устанавливается исходная полоса, далее по направлению формовки на станине закреплены формовочные клетки, клетки состоят из нижних и верхних валковых узлов. Клетки, возможно, устанавливать по длине станины на различном расстоянии с шагом равным 150 мм. Настройка калибров клеток осуществляется перемещением верхних и нижних валковых узлов с помощью шаговых двигателей и нижних регулировочных винтов. Длина станины позволяет устанавливать до 20 рабочих клеток. В формовочных клетях установлены тензодатчики, усилие формовки выводится на экран программного обеспечения. Валковые узлы сконструированы из вала, подушек, подшипников, дистанционных втулок и валкового инструмента, который формирует калибры. Калибры делятся на открытый и закрытый участки калибров. На участке открытых калибров полоса в процессе формовки деформируется в четырех последовательно расположенных клетях. На участке закрытых калибров с разрезными шайбами на верхних валках полоса формуется в трех последовательно расположенных клетях. Для предотвращения распружинивания полосы после каждой формовочной клетки расположена эджерная клеть. Формовка полосы может проводиться по прямолинейной и ниспадающей траекториям.

Настройка калибров клеток осуществляется перемещением верхних и нижних валковых узлов с помощью шаговых двигателей и нижних регулировочных винтов.

Технические характеристики лабораторного формовочного стана ТЭСА 30–50 представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Технические характеристики лабораторного формовочного стана ТЭСА 30–50

№ п/п	Название параметра	Данные параметра
1	Диаметр труб и, мм	30–50
2	Толщина стенки, мм	0,5–3,5
3	Скорость формовки (калибровки), м/мин	0,5–23
4	Число клеток: горизонтальные (открытого типа) горизонтальные (закрытого типа) вертикальные (эджерные)	4 3 4
5	Тип привода Мощность двигателя, кВт	групповой (цепной)
6	Межклетевое расстояние, мм	от 150
7	Схема формоизменения	однорADIUSная

Лабораторный формовочный стан ТЭСА 30–50 позволяет реализовать как типовые, так и нестандартные компоновки клеток. Это достигается путем заданного размещения рабочих клеток на станине, на которых монтируются скомпонованные в определенной последовательности клетки. Спроектированная конструкция клеток стана обеспечивает совместимость с разными комплектами сменного рабочего инструмента, что открывает возможности физического моделирования и исследования процессов формовки, калибровки, редуцирования и профилирования электросварных труб.

Тензометрическая система и измерительный инструмент.

Тензометрическая система для фиксирования энергосиловых параметров процесса формовки ТЗ в клетях формовочного стана. Измерительные инструменты для замера геометрических параметров трубной заготовки: контурный шаблон для замера профиля и изготовленная индивидуальная оснастка для замера углов контакт ТЗ с ребрами валков.

В формовочных клетях установлены тензодатчики, усилие формовки выводится на экран программного обеспечения.

На рисунке 3.2 представлено расположения шаговых двигателей и тензодатчиков в формочной клети.



Рисунок 3.2 – Шаговые двигатели (1) и тензодатчики (2) в формочной клети ТЭСА 30-50

Перемещение верхних валковых узлов по вертикальным направляющим формочной клети происходит с помощью пары соединения, состоящей из нажимного винта и индивидуального шагового двигателя. Такая пара соединения установлена с левой и с правой сторон формочных клеток. Шаговые двигатели снабжены блоком управления, позволяющий устанавливать значение вертикального перемещения верхнего валкового узла с шагом от 0,1 мм. Вал шагового двигателя соединён с нажимным винтом через безлюфтовую муфту с компенсирующей прокладкой из эластомера.

Для измерения усилия формовки под подушками нижних валковых узлов установлены тензодатчики сжатия мембранного типа М50 – рисунок 3.3. Диапазон измерения нагрузок от 5 до 5000 кг. На тензодатчики установлены силопередающие опоры, через которые воспринимается усилие формовки.

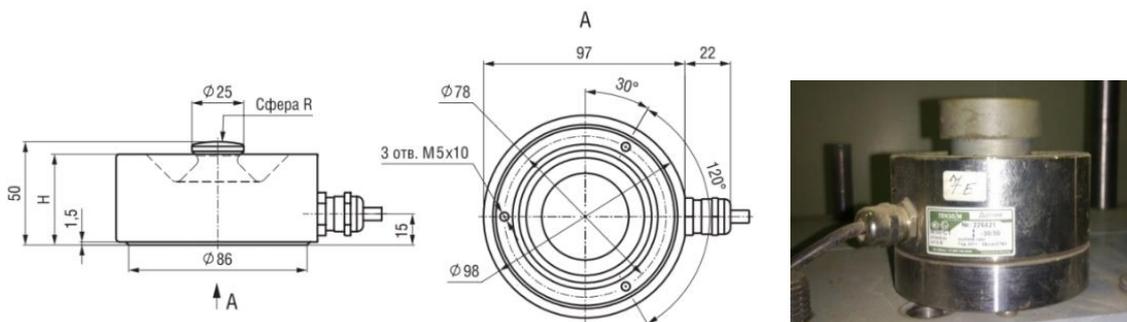


Рисунок 3.3 – Тензодатчик сжатия мембранного типа М50

Схема программно – технического комплекса, включающего измерительные устройства для фиксирования усилия процесса формоизменения полосы представлена на рисунке 3.4.

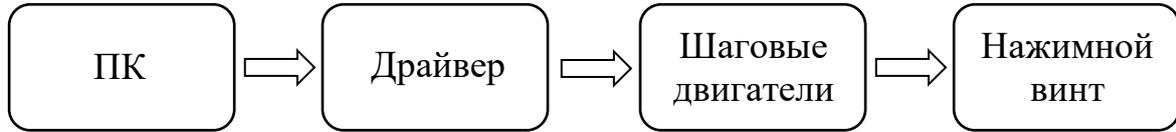
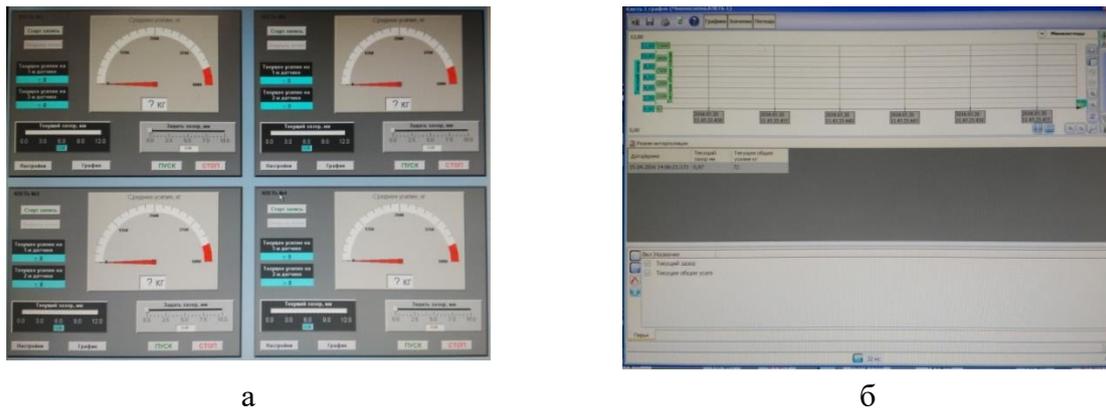


Рисунок 3.4 – Схема управления шаговыми двигателями на ТЭСА 30–50

На рисунке 3.5 представлены программные окна приложения ТЭСА 30-50. При настройке калибров клеток формовочного стана, задавая величину расстояния между верхним и нижним валками возможно регулировать дополнительное усилие(поджатие) формовки. Параметры настройки расстояния и усилия каждой клетки выводятся на экран приложения – рисунок 3.5а. В приложении доступна функция регистрации значений усилий в процессе формовки трубной заготовки – рисунок 3.5б.



а – управление и вывод усилий формовки; б – регистрация данных усилий формовки во время процесса

Рисунок 3.5 – Программные окна приложения ТЭСА 30–50

Для определения длин контакта ТЗ по ребрам валка спроектирована и изготовлена индивидуальная измерительная оснастка (транспортиры) – рисунок 3.6. С помощью, которых замеряли углы контакта ТЗ с валками. Индивидуальная измерительная оснастка (транспортиры) изготавливались в цифровой лаборатории FabLab НИТУ «МИСиС» [60] на устройстве лазерной резки/гравировки LaserPRO Spirit 100 Вт.



Рисунок 3.6 – Индивидуальная измерительная оснастка (транспортиры)

В таблицах 3.2 и 3.3 представлены параметры измерительной оснастки(транспортиров) для нижних и верхних валков

Таблица № 3.2 – Параметры измерительной оснастки (транспортиров) для нижних валков

Клеть	1.ОК	2.ОК	3.ОК	4.ОК	1.ОК	2.ЗК	3.ЗК
Радиус угломерной шкалы, мм	61,3	84,5	81,2	70,6	65,5	64,6	63,8
Диапазон угломерной шкалы, угл. град	180						
Цена деления угломерной шкалы, угл. град	1						

Таблица № 3.3 – Параметры измерительной оснастки (транспортиров) для верхних валков

Клеть	1.ОК	2.ОК	3.ОК	4.ОК	1.ОК	2.ЗК	3.ЗК
Радиус угломерной шкалы, мм	32,7	28,4	70,4	90,9	65,5	64,5	63,7
Диапазон угломерной шкалы, угл. град	180						
Цена деления угломерной шкалы, угл. град	1						

Для замера профиля трубной заготовки использовали профильный стержневой шаблон Shinwa 300x150мм – рисунок 3.7.



Рисунок 3.7 – Профильный стержневой шаблон Shinwa 300x150мм

В таблице 3.4 представлены характеристики шаблона Shinwa 300x150мм.

Таблица № 3.4 – Параметры профильного стержневого шаблона Shinwa 300x150мм

Параметр	Значение
Тип	Шаблон
Максимальная глубина измерения, мм	106
Толщина стержней, мм	1
Материал	Нержавеющая сталь
Максимальная ширина измерения, мм	293
Габариты, мм ШxВxГ	300x150x31

3.2 Исследование условий контакта трубной заготовки с инструментом

При определении энергосиловых и кинематических параметров процесса формоизменения трубной заготовки, определяющим значением является её взаимодействие с деформирующим инструментом [61-66]. Взаимодействие происходит по контактным поверхностям, на которых происходит контролируемое изменение геометрических параметров трубной заготовки и изменение всех технических параметров. Контактные поверхности определяются границами и площадью соприкосновения полосы с валковым инструментом, которые возможно исследовать на полученных контактных отпечатках. Определение контактных поверхностей является основной задачей для определения энергосиловых параметров процесса формоизменения.

В работах [25,27,30,31,67] представлены методики расчета контактных поверхностей, основанная на контактных отпечатках, которые получали при торможении формуемой полосы в формовочных клетях, наклеивании бумаги на полосу, нанесении графитового порошка на валки, последующем включении стана и формовки до тех пор, пока участки полосы с бумагой не

окажутся в калибрах. Затем формовку останавливали, разводили валки, извлекали трубную заготовку (ТЗ) с бумагой, на которой оставались отпечатки контактных поверхностей. Такой метод получения контактных отпечатков может повлиять на результат, так как контакт полосы с валками был определен через графитовый порошок и бумагу. Полученные границы по ширине контактной поверхности в виде дуги, при вычислении площади, преимущественно заменялись хордами [26,31,30], при этом не учитывались длины контакта полосы по дну нижних валков и по реборде с верхними валками. Такой способ вычисления площадей контактных поверхностей подходит для оценочных расчетов, но его недостаточно для анализа энергосиловых и кинематических параметров формоизменения полосы в процессах реальной формовки на действующих ТЭСА. В работе [69] предложена методика, исключая использования каких-либо средств (графита, бумаги), мешающих прямому контакту полосы с валками.

В связи с большим ассортиментом валкового инструмента и схем формовок, актуальной задачей, является проведения новых экспериментов по фиксированию контактных поверхностей, и разработка методик определения площадей контактных поверхностей полосы с валковым инструментом.

В методике расчета контактных поверхностей полосы с профилированными валками, принципиальным является определение параметров границ (контуров). На рисунке – 3.8 представлены схемы контактных поверхностей полосы в валковом калибре. На данной схеме контактная поверхность полосы с нижним валком – 1 определяется следующими параметрами: контактной линией полосы по реборде нижнего валка ($L_{нр}^i$) – 2; входной границе контакта полосы с нижним валком – 3; контактной линией полосы по дну нижнего валка ($L_{нд}^i$) – 4. Контактная поверхность полосы с верхним валком – 5 определяется следующими параметрами: входной границе контакта полосы с верхним валком – 5; контактной линией полосы по дну верхнего валка ($L_{вд}^i$) – 7; контактной линией полосы по реборде верхнего валка ($L_{вр}^i$) – 8.

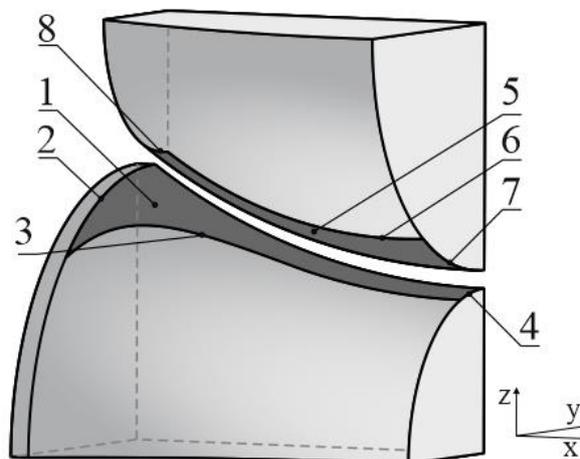


Рисунок 3.8 – Валковый калибр с контактными поверхностями полосы (трубной заготовкой)

Исследование контактных поверхностей для трубы размером $\varnothing 50 \times 1,5$ мм проводилось в условиях научно–производственного центра кафедры ОМД НИТУ МИСиС [68] на ТЭСА 30–50 [69,70].

Схема проведения эксперимента по определению контактных отпечатков трубной заготовки с формовочными валками представлена на рисунке 3.9.

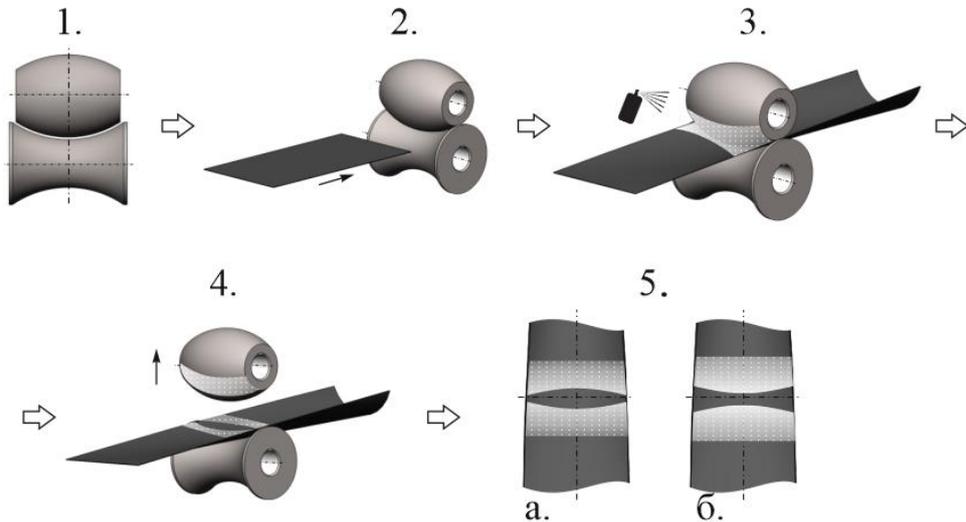


Рисунок 3.9 – Схема проведения эксперимента по определению контактных отпечатков: 1 – настройка калибров; 2 – начальное положение полосы перед формовкой; 3 – формовка полосы и нанесение красочного покрытия на полосу; 4 – извлечение сформованной полосы; 5а – фиксирование границ контактных отпечатков ТЗ с верхним валком; 5б – фиксирование границ контактных отпечатков ТЗ с нижним валком

Фиксирование контактных отпечатков состояло из следующих этапов:

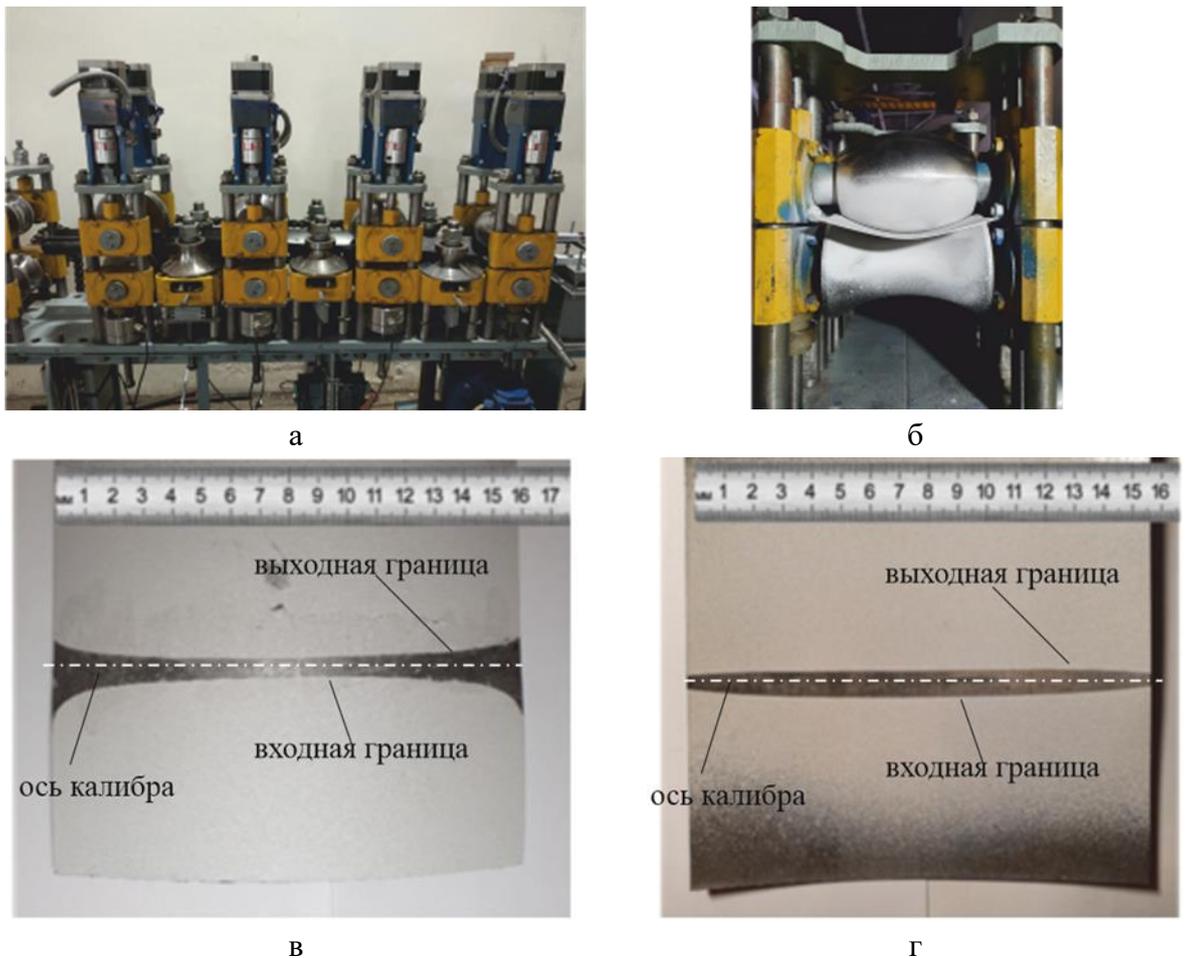
- подготовка исходной полосы;
- настройка входного стола;
- настройка нижних и верхних валковых узлов и калибров;
- установка полосы перед формовкой;
- формовка полосы;
- нанесение краски на заготовку после остановки формовки;
- извлечение полосы из формовочных стана;
- фиксирование и замеры границ контактных отпечатков.

В качестве исходной заготовки использовалась полоса из стали 09Г2С толщиной 1,5 мм, шириной 160 мм и длиной 2150 мм с ровной и чистой поверхностью. Настройку ТЭСА 30–50 проводили следующим образом. Нижние и верхние валковые узлы клетей настраивали горизон-

тально и параллельно относительно друг друга. Нижние валки настраивали по дну, реализуя прямолинейную, горизонтальную ось. Верхние валки регулировали с помощью шаговых электродвигателей, настраивая калибры между валками, зазор между верхним и нижним валком устанавливали, равны S_t - (0,3 – 0,5 мм). Перед формовкой полосу устанавливали параллельно на входной стол, так что бы ось полосы совпадала с ось формовки.

Процесс формовки осуществлялся по прямолинейной траектории в последовательно расположенных калибров. Остановку полосы осуществляли после выхода передней части полосы из последней клетки. Далее на границе контакта полосы с валковым инструментом под давлением носили аэрозольную краску. Краска покрывала поверхности валков и заготовки, не входящих в контакт. После высыхания краски извлекали покрашенную трубную заготовку с неокрашенными контактными отпечатками.

Ход поведения эксперимента по определению контактных отпечатков представлен на рисунке 3.10.



а – организация формовки полосы на ТЭСА 30-50; б – нанесение краски;

в, г – фиксирование полученных результатов

Рисунок 3.10 – Ход поведения эксперимента по определению контактных отпечатков

Зафиксированные контактные отпечатки трубной заготовки с валками формовочного стана представлены на рисунке 3.11. Контактный отпечаток ТЗ с валком состоит из входного и выходного отпечатка, которых разделяет осевое сечение калибра [69].

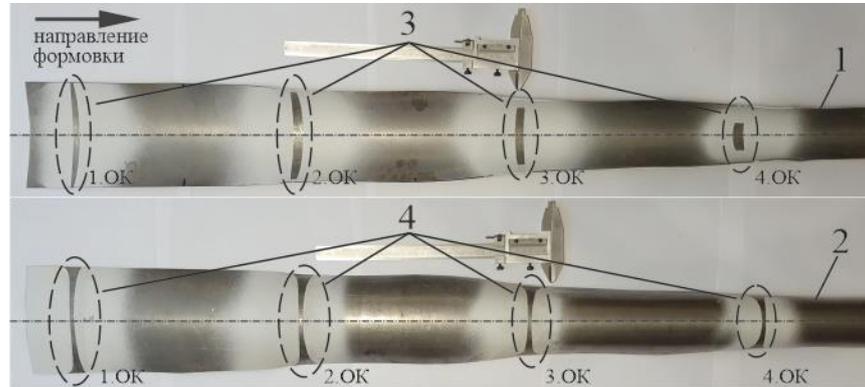
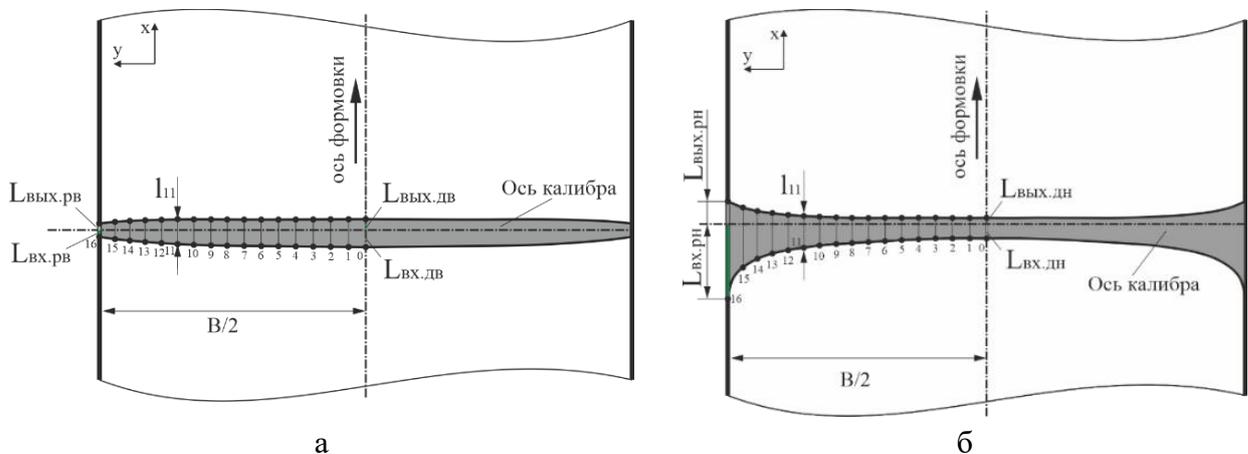


Рисунок 3.11 – Трубная заготовка (ТЗ) (торможенка) для трубы 50x1,5 мм: 1 – внутренняя поверхность ТЗ; 2 – наружная поверхность ТЗ; 3 – контактные отпечатки с верхними валками; 4 – контактные отпечатки с нижними валками

3.3 Обработка результатов измерений контактных отпечатков

Полученные контактные отпечатки ТЗ с верхними и нижними валками обмеряли по схемам, представленным на рисунке 3.12. Замер осуществлялся от границы входного контакта до границы выходного контакта l_i в i – точках по ширине контактного отпечатка, расстояние между точками – 5 мм. Входным контактом является расстояние от первой точки границы контакта до плоскости сечения оси калибра, а выходным контактом является расстояние от плоскости калибра до последней точки границы контакта [70].

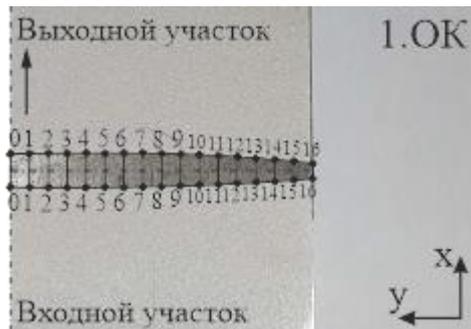


а – для верхнего валка; б – для нижнего валка

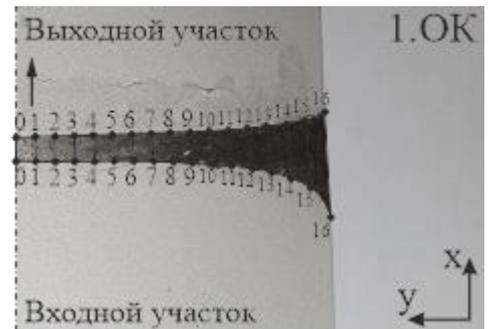
Рисунок 3.12 – Схема замеров расстояний между границами входного и выходного контакта

На рисунке 3.12 верхний контактный отпечаток определяется следующими параметрами : $L_{вх.рв.}$ – длина входного контакта по реборде с верхним валком; $L_{вых.рв.}$ – длина выходного контакта по реборде с верхним валком, а нижний контактный отпечаток определяется: $L_{вх.рн.}$ – длина входного контакта по реборде с нижним валком; $L_{вых.рн.}$ – длина выходного контакта по реборде с нижним валком; $V/2$ – половина ширины полосы; l_{11} – длина между границей входного и выходного контакта в сечении 11.

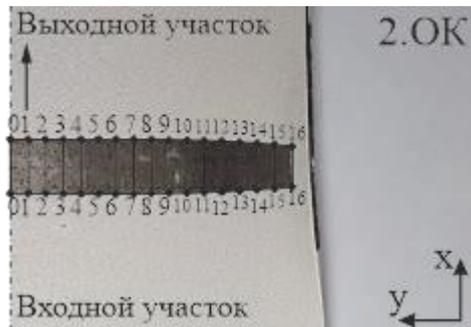
Схемы замеров расстояний между границами входного и выходного контакта для каждого отпечатков представлены на рисунке 3.13.



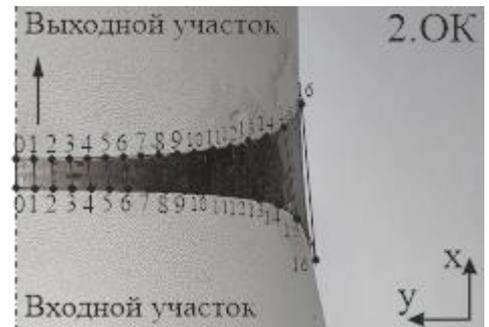
а



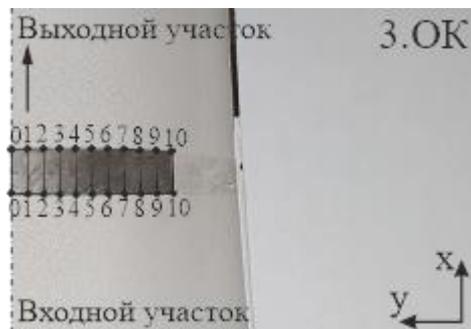
б



в



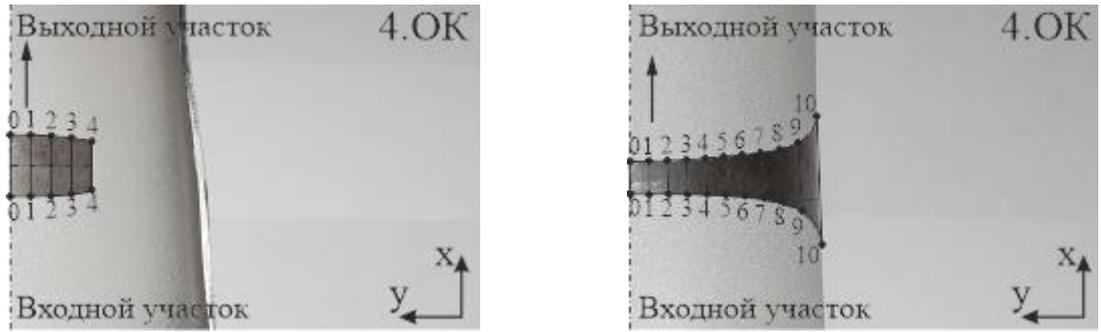
г



д



е



ж

з

а,в,д,ж – верхние отпечатки 1.ОК;2.ОК;3ОК;4.ОК;

б,г,е,з – нижние отпечатки 1.ОК,2.ОК, 3ОК, 4.ОК

Рисунок 3.13 – Схемы замеров расстояний между границами входного и выходного контакта

Результаты замеров расстояний между границами входного и выходного контакта представлены в таблицах 3.5 – 3.11.

Таблица № 3.5 – Результаты измерений для первой формовочной клетки

1.ОК верхний валок				1.ОК нижний валок			
№ точки	l_i , мм	$L_{вх}$, мм	$L_{вых}$, мм	№ точки	l_i , мм	$L_{вх}$, мм	$L_{вых}$, мм
0	5,25	-2,63	2,63	0	4	-3,00	1,00
1	5,20	-2,60	2,60	1	4,11	-3,01	1,1
2	5,19	-2,60	2,60	2	4,24	-3,03	1,21
3	5,18	-2,59	2,59	3	4,39	-3,08	1,31
4	5,16	-2,58	2,58	4	4,57	-3,15	1,42
5	5,12	-2,56	2,56	5	4,79	-3,24	1,55
6	5,05	-2,53	2,53	6	5,05	-3,38	1,67
7	4,96	-2,48	2,48	7	5,37	-3,56	1,81
8	4,84	-2,42	2,42	8	5,76	-3,8	1,96
9	4,70	-2,35	2,35	9	6,25	-4,12	2,13
10	4,53	-2,27	2,27	10	6,89	-4,55	2,34
11	4,34	-2,17	2,17	11	7,74	-5,15	2,59
12	4,11	-2,06	2,06	12	8,92	-5,99	2,93
13	3,83	-1,92	1,92	13	10,68	-7,26	3,42
14	3,43	-1,72	1,72	14	13,65	-9,35	4,3
15	3,11	-1,56	1,56	15	20,11	-13,8	6,31
16	2,90	-1,45	1,45	16	32,15	-23,64	8,51

Таблица № 3.6 – Результаты измерений для второй формовочной клетки

2.ОК верхний валок				2.ОК нижний валок			
№ точки	l _i , мм	L _{вх} , мм	L _{вых} , мм	№ точки	l _i , мм	L _{вх} , мм	L _{вых} , мм
0	6,00	-3,00	3,00	0	4,00	-3,00	1,00
1	6,00	-3,00	3,00	1	4,00	-3,00	1,00
2	5,98	-2,99	2,99	2	4,41	-3,05	1,36
3	5,96	-2,98	2,98	3	4,57	-3,12	1,45
4	5,90	-2,95	2,95	4	4,81	-3,26	1,55
5	5,82	-2,91	2,91	5	5,05	-3,45	1,60
6	5,74	-2,87	2,87	6	5,41	-3,74	1,67
7	5,62	-2,81	2,81	7	6,00	-4,10	1,90
8	5,50	-2,75	2,75	8	6,59	-4,59	2,00
9	5,36	-2,68	2,68	9	7,70	-5,25	2,45
10	5,20	-2,60	2,60	10	8,61	-6,11	2,50
11	5,02	-2,51	2,51	11	10,08	-7,28	2,80
12	4,82	-2,41	2,41	12	12,08	-8,88	3,20
13	4,58	-2,29	2,29	13	14,88	-11,22	3,66
14	4,28	-2,14	2,14	14	19,46	-14,90	4,56
15	3,92	-1,96	1,96	15	26,69	-19,76	6,93
16	3,20	-1,60	1,60	16	37,39	-26,68	10,71

Таблица № 3.7 – Результаты измерений для третьей формовочной клетки

3.ОК верхний валок				3.ОК нижний валок			
№ точки	l _i , мм	L _{вх} , мм	L _{вых} , мм	№ точки	l _i , мм	L _{вх} , мм	L _{вых} , мм
0	7,27	-3,64	3,64	0	4,00	-3,00	1,00
1	7,13	-3,56	3,56	1	4,32	-3,12	1,20
2	6,98	-3,49	3,49	2	4,52	-3,18	1,34
3	6,64	-3,32	3,32	3	4,90	-3,35	1,55
4	6,22	-3,11	3,11	4	5,14	-3,59	1,55
5	5,98	-2,99	2,99	5	5,53	-3,90	1,63
6	5,47	-2,74	2,74	6	6,13	-4,34	1,79
7	5,18	-2,59	2,59	7	7,13	-4,91	2,22
8	5,05	-2,53	2,53	8	8,10	-5,69	2,41
9	4,93	-2,46	2,46	9	9,35	-6,72	2,63
10	4,70	-2,35	2,35	10	11,04	-8,15	2,89
–	–	–	–	11	13,71	-10,19	3,52
–	–	–	–	12	17,66	-13,29	4,37
–	–	–	–	13	25,56	-18,72	6,84
–	–	–	–	14	43,99	-29,48	14,51

Таблица № 3.8 – Результаты измерений для четвертой формовочной клетки

4.ОК верхний валок				4.ОК нижний валок			
№ точки	l_i , мм	$L_{вх}$, мм	$L_{вых}$, мм	№ точки	l_i , мм	$L_{вх}$, мм	$L_{вых}$, мм
0	8,00	-4,00	4,00	0	4,00	-3,00	1,00
1	7,54	-3,77	3,77	1	4,39	-3,17	1,22
2	6,88	-3,44	3,44	2	4,94	-3,39	1,55
3	5,74	-2,87	2,87	3	5,51	-3,63	1,88
4	4,15	-2,08	2,08	4	6,66	-4,44	2,22
–	–	–	–	5	8,31	-5,90	2,41
–	–	–	–	6	10,65	-7,76	2,89
–	–	–	–	7	13,59	-10,29	3,30
–	–	–	–	8	18,29	-14,40	3,89
–	–	–	–	9	26,32	-20,87	5,45
–	–	–	–	10	42,07	-29,97	12,10

Таблица № 3.9 – Результаты измерений для пятой формовочной клетки

1.3К верхний валок				1.3К нижний валок			
№ точки	l_i , мм	$L_{вх}$, мм	$L_{вых}$, мм	№ точки	l_i , мм	$L_{вх}$, мм	$L_{вых}$, мм
0	5,9	-2,95	2,95	0	3,0	-1,50	1,50
1	6	-3,0	3,0	1	3,0	-1,50	1,50
2	6,2	-3,1	3,1	2	3,0	-1,50	1,50
3	6,5	-3,25	3,25	3	3,1	-1,55	1,55
4	7,3	-3,65	3,65	4	3,42	-1,71	1,71
5	11,4	-5,7	5,7	5	3,5	-1,75	1,75
6	22,98	-11,49	11,49	6	4,3	-2,15	2,15
–	–	–	–	7	5,5	-2,75	2,75
–	–	–	–	8	10,4	-5,20	5,20
–	–	–	–	9	23,25	-11,63	11,63

Таблица № 3.10 – Результаты измерений для шестой формовочной клетки

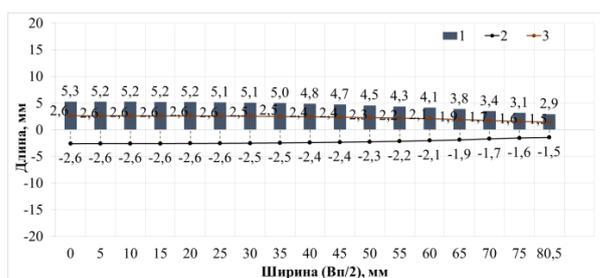
2.3К верхний валок				2.3К нижний валок			
№ точки	l_i , мм	$L_{вх}$, мм	$L_{вых}$, мм	№ точки	l_i , мм	$L_{вх}$, мм	$L_{вых}$, мм
0	4,00	-2,00	2,00	0	3,00	-1,50	1,50
1	4,00	-2,00	2,00	1	3,00	-1,50	1,50
2	4,30	-2,15	2,15	2	3,00	-1,50	1,50
3	5,10	-2,55	2,55	3	3,10	-1,55	1,55
4	7,50	-3,75	3,75	4	3,40	-1,70	1,70
5	12,90	-6,45	6,45	5	4,20	-2,10	2,10
6	22,25	-11,13	11,13	6	5,58	-2,79	2,79
–	–	–	–	7	8,90	-4,45	4,45

2.3К верхний валок				2.3К нижний валок			
№ точки	l_i , мм	$L_{ВХ}$, мм	$L_{ВЫХ}$, мм	№ точки	l_i , мм	$L_{ВХ}$, мм	$L_{ВЫХ}$, мм
—	—	—	—	8	14,80	-7,40	7,40
—	—	—	—	9	21,87	-10,94	10,94

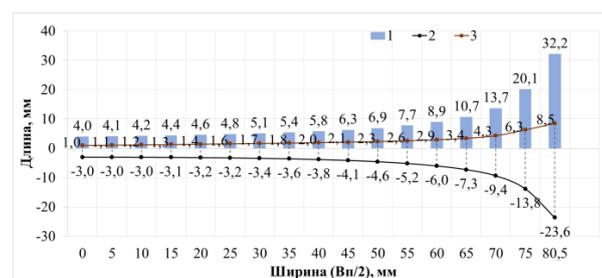
Таблица № 3.11 – Результаты измерений для седьмой формовочной клетки

3.3К верхний валок				3.3К нижний валок			
№ точки	l_i , мм	$L_{ВХ}$, мм	$L_{ВЫХ}$, мм	№ точки	l_i , мм	$L_{ВХ}$, мм	$L_{ВЫХ}$, мм
0	4	-2,00	2,00	0	3,0	-1,50	1,50
1	4,1	-2,05	2,05	1	3,0	-1,50	1,50
2	4,4	-2,20	2,20	2	3,0	-1,50	1,50
3	5,5	-2,75	2,75	3	3,1	-1,55	1,55
4	7,1	-3,55	3,55	4	3,3	-1,65	1,65
5	13,2	-6,60	6,60	5	4,1	-2,05	2,05
6	21,33	-10,67	10,67	6	5,8	-2,90	2,90
—	—	—	—	7	9,4	-4,70	4,70
—	—	—	—	8	13,6	-6,80	6,80
—	—	—	—	9	20,51	-10,26	10,26

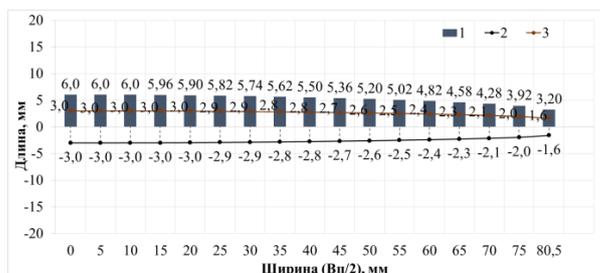
На рисунке 3.14 представлены результаты измерений параметров контактных отпечатков с верхним (а) и нижним (б) валками по сечениям: 1 – абсолютные значения протяженности отпечатка по точкам; 2 – длина входного отпечатка; 3 – длина выходного отпечатка.



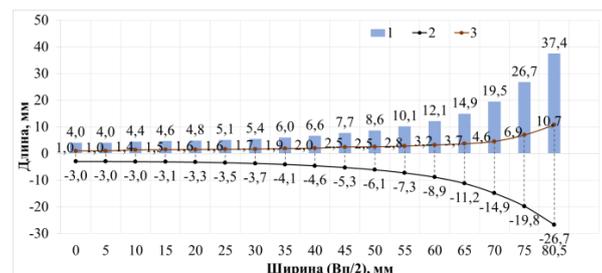
а



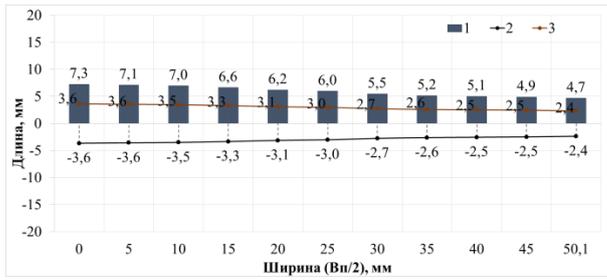
б



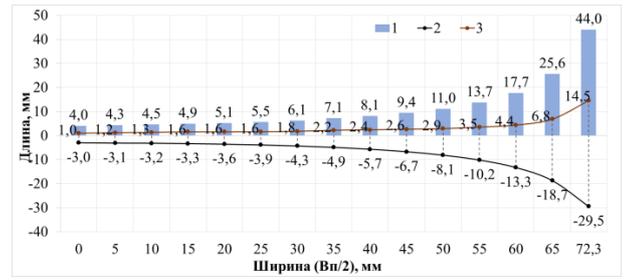
в



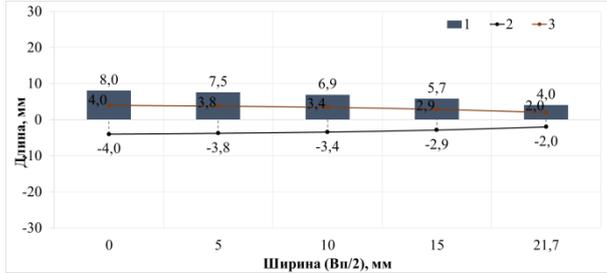
г



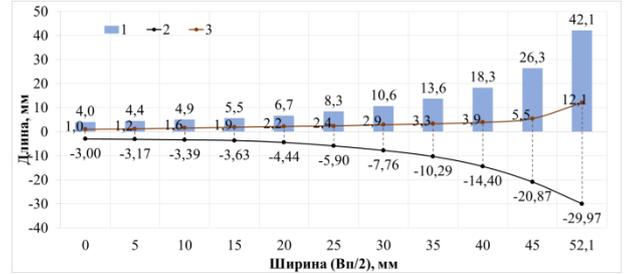
Д



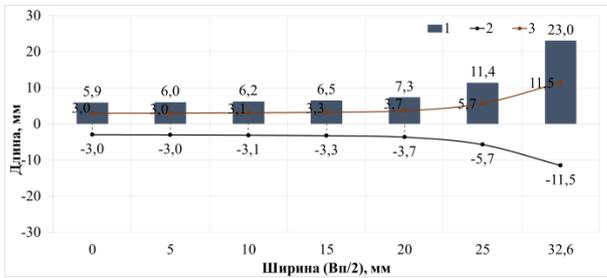
е



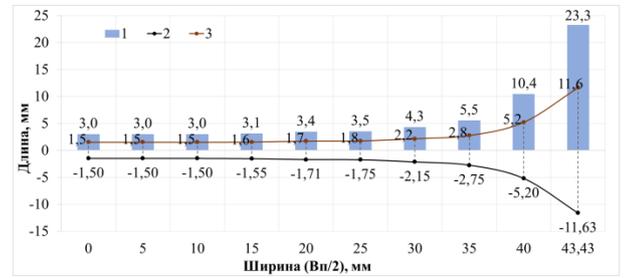
Ж



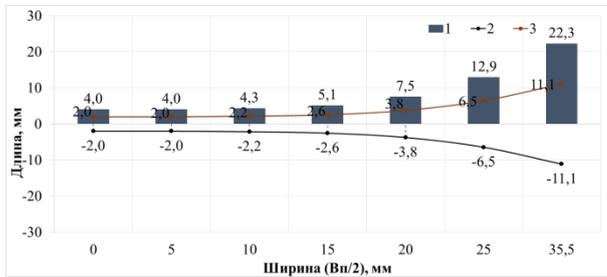
з



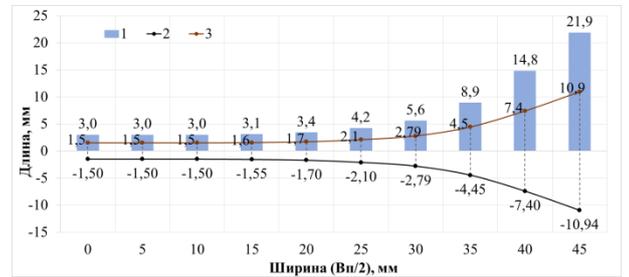
И



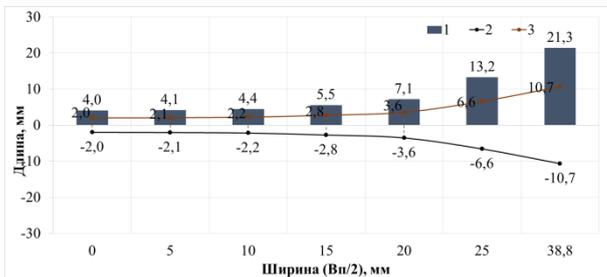
з



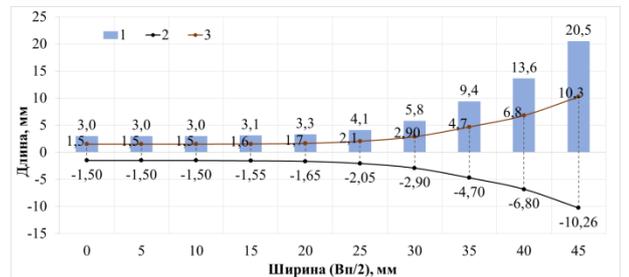
И



К



Л



М

а,в,д,ж,и,л,н – длины контактных отпечатков ТЗ для верхних валков;

б,г,е,з,к,м,о – длины контактных отпечатков ТЗ для нижних валков

Рисунок 3.14 – Результаты измерений развертки контактных отпечатков

График распределения зафиксированных вертикальных усилий формовки полосы по формовочным клетям представлен на рисунке 3.15.

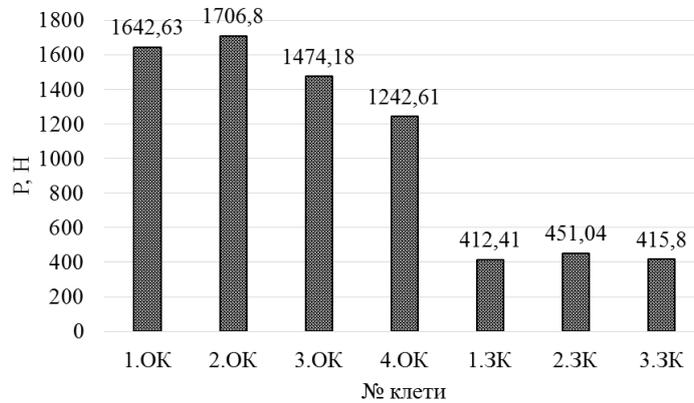


Рисунок 3.15 – График распределения вертикальных усилий формовки полосы по формовочным клетям зафиксированные на лабораторном стане ТЭСА 30–50

Результаты обработки замеров позволяют сделать вывод, что экспериментальное исследование условий контакта формуемой полосы с валковым инструментом было проведено корректно с высокой степенью точности, что позволит разработать методики расчета контактного взаимодействия и других параметров формовки для дальнейшего совершенствования процесса.

3.4 Выводы по главе

Разработана и применена методика прямого экспериментального определения геометрических параметров контактных поверхностей трубной заготовки с валковым инструментом по всей линии формовки для трубы $\varnothing 50 \times 1,5$ мм.

Экспериментально получены контактные отпечатки ТЗ с валковым инструментом, отмечено, что входные и выходные границы контакта валков имеют криволинейный (нелинейный) характер.

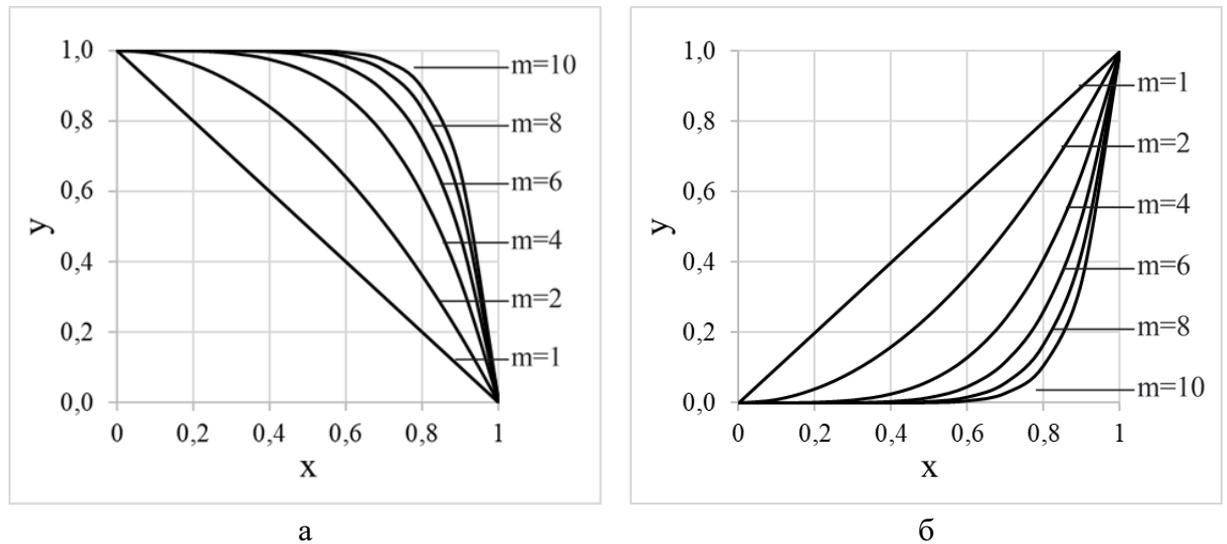
При определении площадей контактной поверхности заготовки для трубы $\varnothing 50 \times 1,5$ мм по приводным калибрам формовочного стана ТЭСА 30–50 установлено, что площади внутренних контактных поверхностей меньше, чем площади наружных контактных поверхностей, соответственно на участке открытых калибров на 50-70 %, на участке закрытых калибров - на 6-35 %.

Глава 4 Разработка методик определения контактных условий с применением фактора формы и определение баланса тянущих и тормозящих усилий формовки с учетом конфигураций контактных поверхностей

4.1 Аналитическое описание криволинейных границ контакта трубной заготовки с инструментом

Обработка результатов замеров контактных отпечатков формуемой полосы с нижними и верхними валками показала, что входные границы, ограничивающие контактные поверхности на входе формуемой полосы в калибр могут быть достаточно точно аппроксимированы степенной функцией при показателе степени (m) не меньше единицы и основании степени, изменяющемся в пределах $0,1$. Аналитическое описание входных границ контактных поверхностей полосы с валками представлено на рисунке 4.1.

Внутренние контактные поверхности полосы с верхними валками могут быть аппроксимированы с применением убывающей степенной функции – рисунок 4.1а. Наружные контактные поверхности полосы с нижними валками могут быть аппроксимированы с применением возрастающей степенной функции – рисунок 4.1б.



а – для внутренних; б – для наружных

Рисунок 4.1 – Аналитическое описание входных границ контактных поверхностей полосы с валками

4.2 Методика определения параметров внутренней контактной поверхности с применением фактора формы

Контактная поверхность и схема к определению границ контактной поверхности с полосы с верхним валком представлен рисунке 4.2

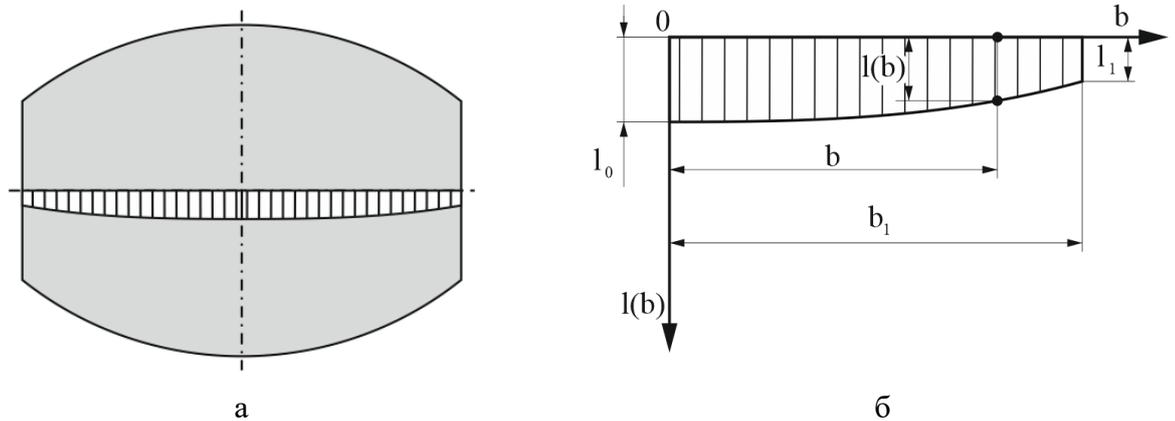


Рисунок 4.2 – Контактная поверхность (а) и схема к определению границ контактной поверхности полосы (б) с верхним валком (представлена 1/2 контактной поверхности)

Для верхней контактной поверхности общий вид аппроксимирующего выражения представляется в виде:

$$l(b) = L - A \left(\frac{b}{C} \right)^m. \quad (4.1)$$

Числовые константы A , C , L вычисляются по экспериментальным значениям в центре и на краю полосы следующим образом. Константа C принимается равной максимальной полуширине контакта полосы с верхним деформирующим инструментом, т.е.

$$C = b_1. \quad (4.2)$$

Определение констант A и L выбираются исходя из значений длины контакта по дну верхнего валка, которая соответствует центральному волокну l_0 и по реборде верхнего валка l_1 , которая в калибрах полного охвата соответствует волокну на кромке полосы, а в калибрах неполного охвата соответствует волокну находящегося на реборде верхнего валка

$$L = l_0 \text{ и } A = l_1 - l_0, \quad (4.3)$$

т. е. для верхних валков имеем выражение, которое дает точные значения длины контакта в центре и на ребордах полосы:

$$l(b) = l_0 - (l_1 - l_0) \left(\frac{b}{b_1} \right)^m. \quad (4.4)$$

Показатель степени m определяет форму контактной поверхности в соответствие с графиком возрастающей степенной функции. Показатель степени m , является фактором формы. Для его нахождения вычисляется среднеквадратичное отклонение между экспериментальными и аппроксимированными значениями:

$$\Delta_i = \sqrt{(l_i - l_i^{\text{эксп}})^2}, \quad (4.5)$$

где $l_i^{\text{эксп}}$ – длина, полученная в ходе эксперимента.

Полученные отклонения суммируются по всем точкам, в которых известны опытные значения. Искомое значение фактора формы m находится из условия минимума выражения:

$$\sum_{i=1}^N \Delta_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{(l_i - l_i^{\text{эксп}})^2}. \quad (4.6)$$

Расчет полной площади контактной поверхности трубной заготовки с верхним валком [70]:

$$F_B(B_{\text{КВ}}) = \left(L_{\text{ВД}} - \frac{L_{\text{ВД}} - L_{\text{ВР}}}{m + 1} \right) \cdot B_{\text{КВ}}, \quad (4.7)$$

где $B_{\text{КВ}}$ – ширина верхней контактной поверхности;

$L_{\text{ВД}}$ – длина по дну верхнего вала;

$L_{\text{ВР}}$ – длина по реборде верхнего вала;

m – фактор формы входного контакта с верхним валком.

Площадь зоны контактной поверхности ТЗ с нижним валком в зависимости от расположения $L(b_i)$ по ширине нижней контактной поверхности [71]:

$$F_B(b_i) = L_{\text{ВД}} - \left(\frac{L_{\text{ВД}} - L_{\text{ВР}}}{m + 1} \right) \cdot \left(\frac{b_1}{B_{\text{КВ}}} \right)^m. \quad (4.8)$$

4.3 Методика определения параметров наружной контактной поверхности с применением фактора формы

Контактная поверхность и схема к определению границ контактной поверхности с полосы с нижним валком представлена на рисунке 4.3.

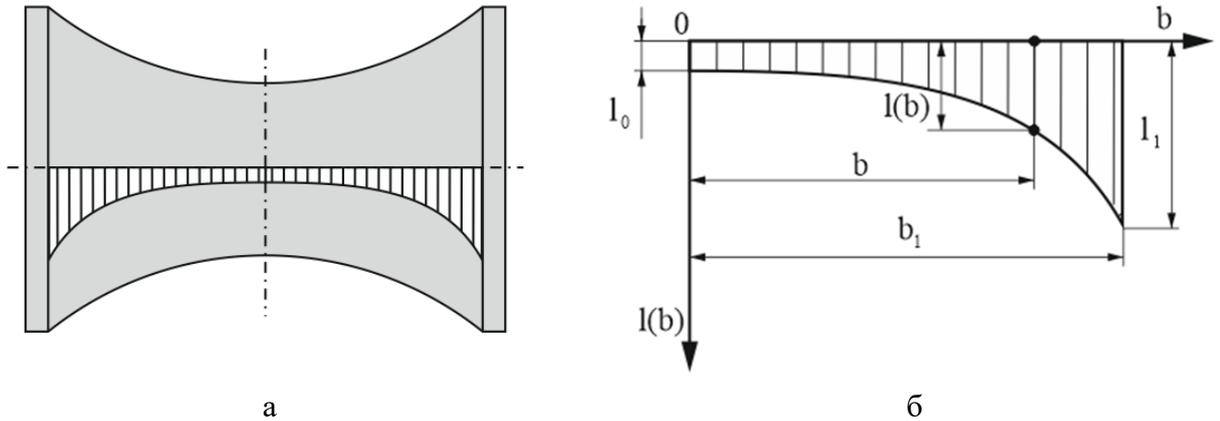


Рисунок 4.3 – Контактная поверхность (а) и схема к определению границ контактной поверхности полосы (б) с нижним валком (представлена 1/2 контактной поверхности)

Для нижней контактной поверхности общий вид аппроксимирующего выражения представляется в виде:

$$l(b) = A \left(\frac{b}{C} \right)^m + L. \quad (4.9)$$

Числовые константы A , C , L вычисляются по экспериментальным значениям в центре и на краю полосы следующим образом. Константа C принимается равной максимальной полуширине контакта полосы с нижним деформирующим инструментом, т.е.

$$C = b_1. \quad (4.10)$$

Определение констант A и L выполняется исходя из значений длины контакта по дну нижнего валка, которая соответствует центральному волокну l_0 и по реборде нижнего валка l_1 , которая в калибрах полного охвата соответствует волокну на кромке полосы, а в калибрах неполного охвата соответствует волокну находящегося на реборде нижнего валка:

$$L = l_0 \text{ и } A = l_1 - l_0. \quad (4.11)$$

Для нижних валков имеем выражение, которое дает точные значения длины контакта в центре и на ребордах полосы:

$$l(b) = (l_1 - l_0) \left(\frac{b}{b_1} \right)^m + l_0. \quad (4.12)$$

Расчет полной площади контактной поверхности трубной заготовки с нижним валком [70]:

$$F_H(B_{KH}) = \left[\left(\frac{L_{HP} + L_{HD}}{m + 1} \right) + L_{HD} \right] \cdot B_{KH}, \quad (4.13)$$

где B_{KH} – ширина нижней контактной поверхности;

L_{HP} – длина по реборде нижнего валка;

L_{HD} – длина по дну нижнего валка;

m – фактор формы входного контакта с нижним валком.

Площадь зоны контактной поверхности ТЗ с нижним валком в зависимости от расположения $L(b_i)$ по ширине нижнего контактной поверхности [71]:

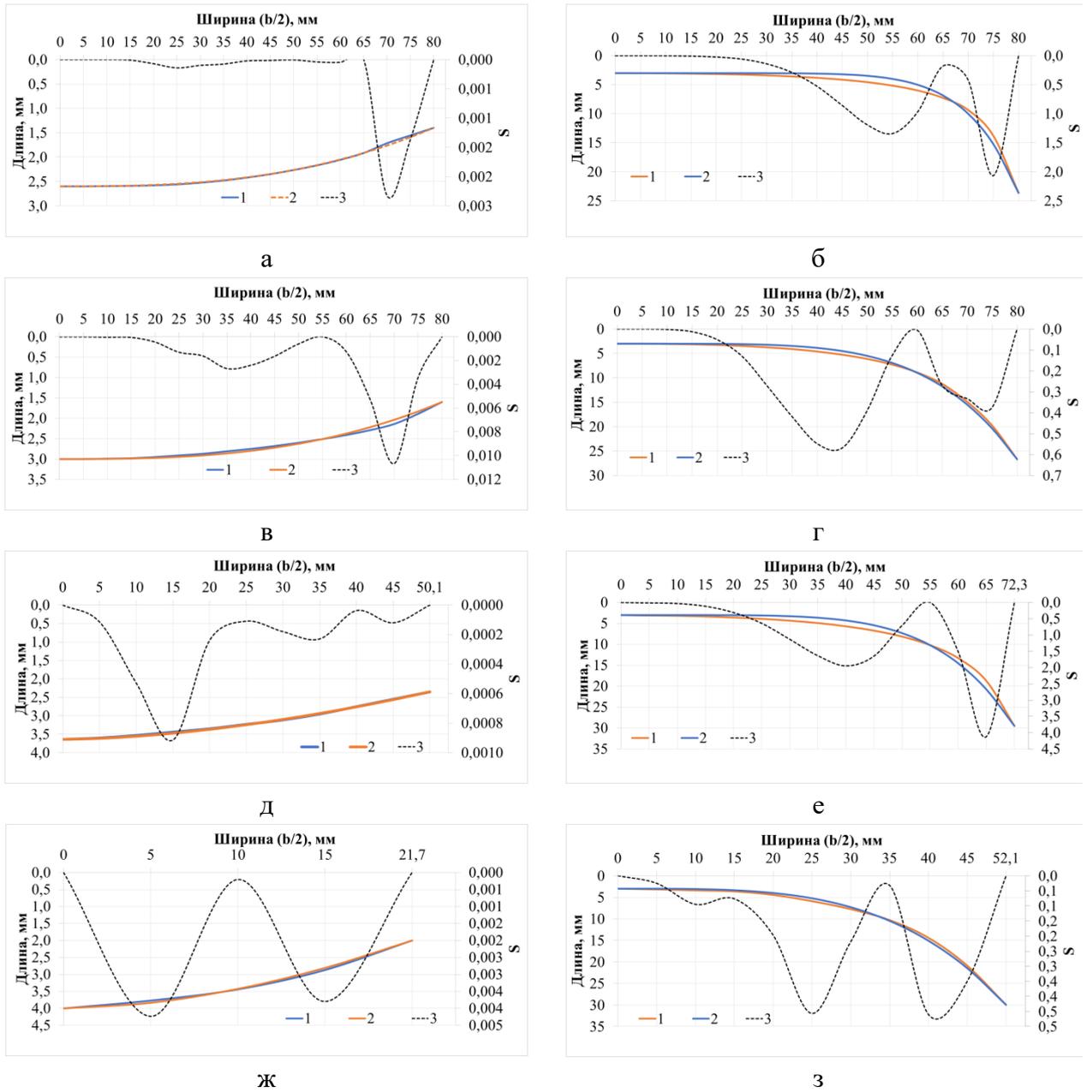
$$F_H(b_i) = \left[\left(\frac{L_{HP} + L_{HD}}{m + 1} \right) \cdot \left(\frac{b_i}{B_{KH}} \right)^m + L_{HD} \right] \cdot b_i. \quad (4.14)$$

Результаты расчета фактора формы (m) контуров контактных поверхностей, площадей контактных поверхностей ($F_B(B_{KB}), F_H(B_{KH})$) и среднеквадратичное отклонение (S) представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Параметры контактных поверхностей полосы

№	Верхний валок			Нижний валок		
	m	$F_B(B_{KB}), \text{ мм}$	S	m	$F_H(B_{KH}), \text{ мм}$	S
1.ОК	2,7	364,1	0,016	8,1	842,9	0,709
2.ОК	2,8	421,1	0,044	4,8	1133,1	0,468
3.ОК	1,7	316,6	0,016	5,4	1032,2	0,993
4.ОК	1,8	141,2	0,045	3,6	923,5	0,437
1.ЗК	7,1	527,9	0,350	6,2	564,9	0,418
2.ЗК	4,5	524,4	0,442	4,9	550,4	0,425
3.ЗК	3,7	520,4	0,358	4,5	540,4	0,278

На рисунке 4.4 представлены контактные поверхности полосы с нижним и верхним валками на участке открытых калибров (представлены 1/2 контактные поверхности). Входная граница контактной поверхности – 2 получена по методике и хорошо согласуется с входной границей, полученной в результате эксперимента – 1, среднеквадратичное отклонение – 3.

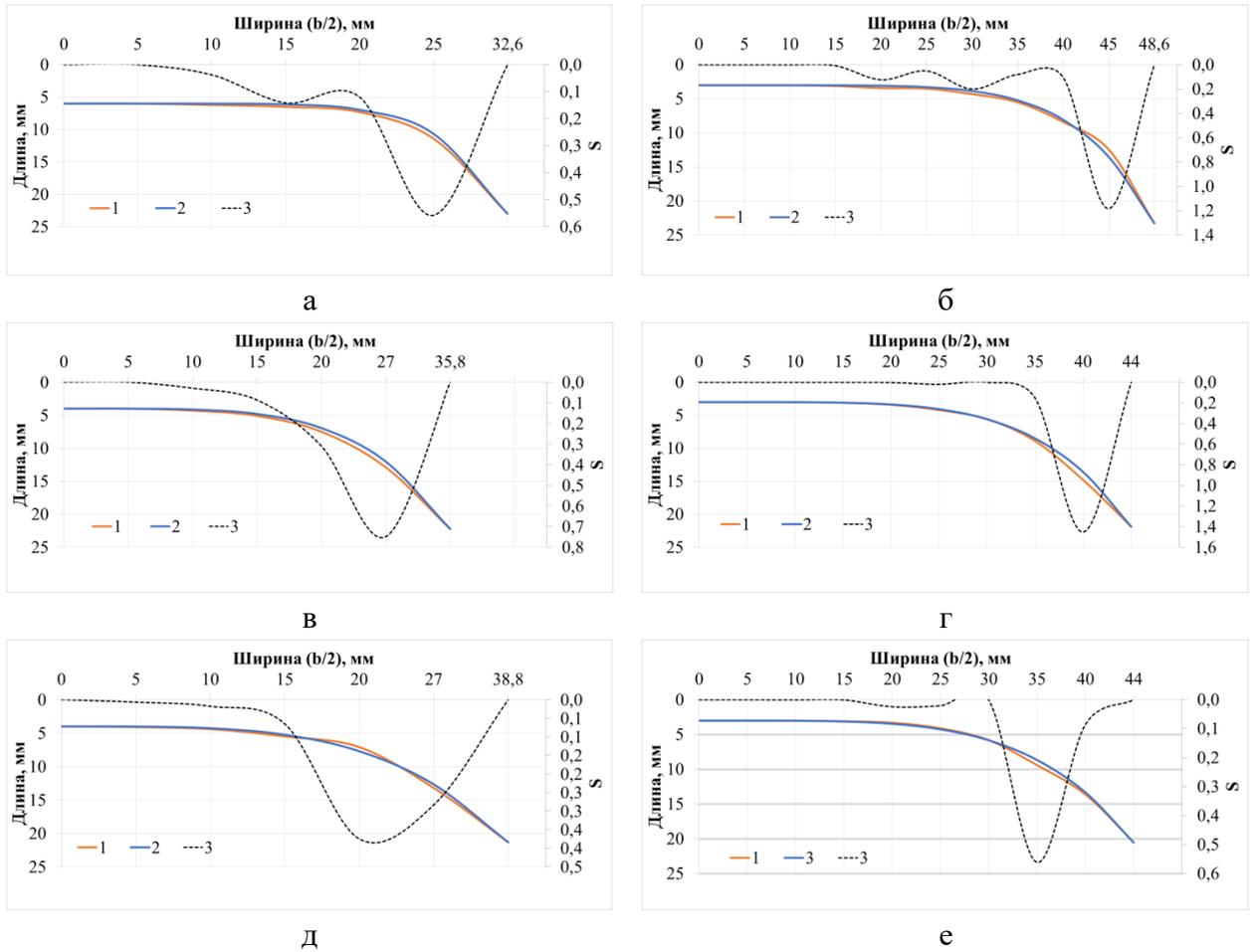


а, в, д, ж – с нижним валком 1.ОК, 2.ОК, 3.ОК, 4.ОК;

б, г, е, з – с верхним валком 1.ОК, 2.ОК, 3.ОК, 4.ОК

Рисунок 4.4 – Контактные поверхности полосы в открытых калибрах

На рисунке 4.5 представлены контактные поверхности полосы с нижним и верхним валками на участке закрытых калибров (представлены 1/2 контактные поверхности). Входная граница контактной поверхности – 2 получена по методике и хорошо согласуется с входной границей, полученной в результате эксперимента – 1, среднеквадратичное отклонение – 3.



а, в, д – с нижним валком 1.3К, 2.3К, 3.3К;

б, г, е – с верхним валком 1.3К, 2.3К, 3.3К

Рисунок 4.5 – Контактные поверхности полосы в закрытых калибрах

Для визуального представления контактных поверхностей ТЗ и ее распределения по поверхности валков использовалось инженерное математическое программное обеспечение Mathcad. Создана программа, в которой заносятся параметры валка и контактной поверхности. Выполняется пересчет значений точек границ из двумерного пространства в трехмерное пространство, где контактная поверхность ТЗ распределяется по поверхности валка.

Определения в координат (X, Y, Z) i – точек на входной и выходной границе контактов заключается в следующем [70]:

Расчет координат по оси X для входной ($X_{iВХ}$) и выходной ($X_{iВЫХ}$) границ:

$$X_{iВХ} = 2 \cdot R_{ni} \cdot \sin\left(\frac{\left(\frac{R_{ni}}{L_{iВХ}}\right)}{2}\right); X_{iВЫХ} = 2 \cdot R_{ni} \cdot \sin\left(\frac{\left(\frac{R_{ni}}{L_{iВЫХ}}\right)}{2}\right), \quad (4.15)$$

где R_{ni} – радиус профиля нижнего валка, мм;

$L_{iВХ}$ – расстояние от входной границы контакта до вертикальной плоскости валка, мм;

$L_{iВЫХ}$ – расстояние вертикальной плоскости валка до выходной границы контакта, мм.

Расчет координат по оси Y (расположение i -точек по ширине контактной поверхности):

$$Y_i = \frac{B_{\text{п}}}{i} \cdot b_i, \quad (4.16)$$

где $B_{\text{п}}$ – периметр полосы в клетке, мм;

i – количество сечений;

b_i – номер сечения по периметру полосы.

Расчет координат по оси Z (координата от оси вращения Y до поверхности валка для i -точки):

$$Z_i = r_{\text{нв}i} - r_{\text{нв}i} \left(1 - \cos \left(\frac{\varphi_i}{2} \right) \right), \quad (4.17)$$

где $r_{\text{нв}i}$ – радиус валка в i -сечении, мм;

φ_i – угол между вертикальной осью калибра в i -сечении, рад.

Так же границы контакта возможно определять с помощью степенной функцией (возрастающей / убывающей).

Результаты пересчета границ контактов в i -точках для нижнего валка отмечены точками и представлены на рисунке 4.6.

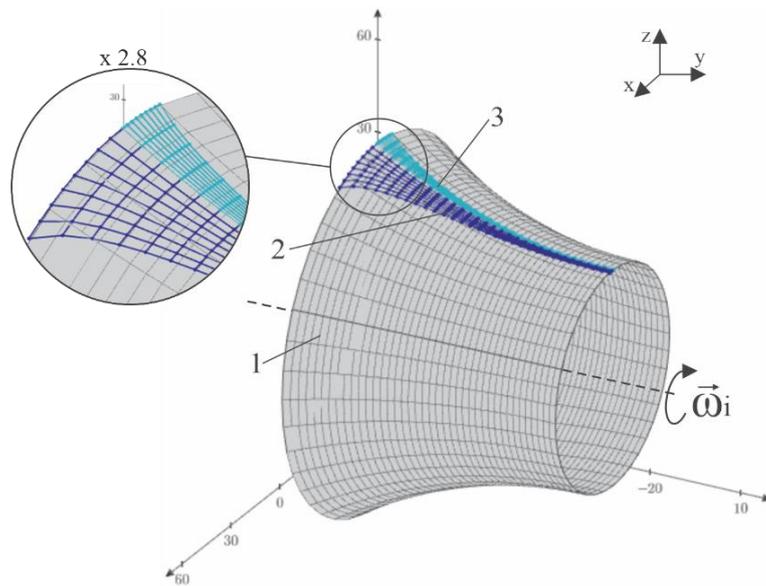


Рисунок 4.6 – Нижний валок с i -точками на границах контакта на поверхности валка: 1 – половина поверхности нижнего валка; 2 – точки принадлежащие входной границе контакта; 3 – точки принадлежащие выходной границе контакта

Таблица 4.2 – Параметры калибровки приводного валкового инструмента для трубы $\varnothing 50 \times 1,5$ мм

Клеть	1.ОК	2.ОК	3.ОК	4.ОК	1.3К	2.3К	3.3К
φ_i , рад.	1,35	2,70	4,04	5,41	5,61	5,82	6,06
R_n , мм	118,85	59,43	39,72	29,66	28,51	27,40	26,23
$D_{вд}$, мм	120	150	170	190	71,2	71,5	71,8
$D_{вр}$, мм	65,45	56,91	140,87	181,91	131,07	129,1	127,53
$D_{нд}$, мм	70	70,3	70,6	70,9	71,2	71,5	71,8
$D_{нр}$, мм	122,54	168,91	162,43	141,1	131,07	129,1	127,53

Реальное формоизменение осуществляется в непосредственном контакте ТЗ с профилированным валковым инструментом, который повторяет профиль рассчитанной выше калибровки.

Далее исследовался процесс формоизменения с различными кинематическими параметрами и контактными условиями инструмента и заготовки при формоизменении.

Непосредственное формоизменение осуществляется в валковых калибрах по контактным поверхностям. Для двухвалкового калибра есть нижняя контактная поверхность и верхняя контактная поверхность.

Определение площадей контактных поверхностей ТЗ с валками рассчитывали с учетом границ контакта формируемой полосы с валковым инструментом с конкретными геометрическими параметрами по разработанным методикам.

Геометрию контактной поверхности ТЗ определяли по длине контакта по дну валка, по реборде валка и по формам входной и выходной границ контакта [69,70].

Одними из важных технических параметров процесса являются кинематические характеристики процесса формовки, а именно: окружные скорости вращения валков, линейная скорость формируемой полосы в линии формовочного стана и линейные скорости материальных точек на профилированных поверхностях валков. Окружные скорости вращения валков и линейная скорость полосы в процессе формовки не изменяются, а линейные скорости в точках на контактных поверхностях валков имеют переменную величину, и зависят от профиля и габарита валков, и меняются в зависимости от сечения по очагу деформации формовки [25,26].

Линейные скорости в материальных точках на контактных поверхностях валков ($V_{пв}$) и скорость движения полосы (V_n) определяется следующими соотношениями:

– в точках, где линейная скорость на поверхности валков меньше линейной скорости полосы ($V_{пв} < V_n$) возникает зона отставания;

– в точках, где линейная скорость на поверхности валков больше линейной скорости по-

лосы ($V_{пв} > V_{п}$) возникает зона опережения;

– в точке, где равенство линейной скорости на поверхности валков и линейной скорости полосы ($V_{пв} = V_{п}$) находится катающий диаметр, в сечении которого проходит граница между зонами отставания и опережения.

Линейные скорости в точках валков представлены на рисунке 4.8.

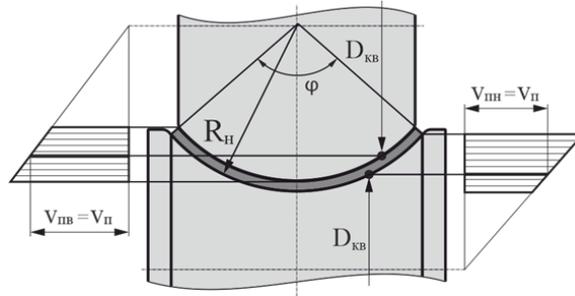
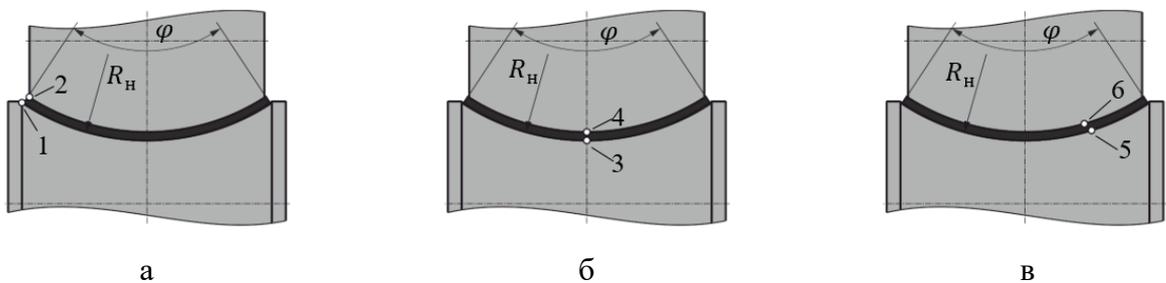


Рисунок 4.8 – Эпюры линейных скоростей для нижнего и верхнего валков

Различные точки калибра валков по ширине контактной поверхности с ТЗ перемещаются с неодинаковой линейной скоростью, а формируемая полоса имеет одну скорость перемещения. На полосу в контакте действуют определенные силы трения (контактное скольжение). В точках, находящихся на контактной поверхности валка, имеющие линейную скорость больше, чем скорость перемещения полосы возникают силы трения направленные по ходу формовки. Эти силы являются тянущими силами. В точках, где линейная скорость меньше скорости перемещения полосы возникают тормозящие силы трения направленные против хода формовки.

В линии пересечения, где линейная скорость на поверхности валка совпадает со скоростью перемещения ТЗ, находится катающий диаметр, который разделяет силы трения по ходу и против хода формовки ТЗ – соответственно возникают тянущие и тормозящие усилия.

Расположение катающего диаметра определяет различные взаимодействия валков с формируемой полосой по контактным зонам опережения, либо отставания - рисунок 4.9.



а – катающий диаметр по краям (ребордам) валков; б – катающий диаметр по дну валков; в – катающий диаметр по – середине профилированной части калибра валков; точки 1, 3, 5 – катающий диаметр нижних валков; точки 2, 4, 6 – катающий диаметр верхних валков

Рисунок 4.9 – Варианты расположения катающего диаметра

В таблице 4.3 представлены кинематические параметры формовки полосы с линейной скоростью $V_{\Pi} = 10$ м/мин.

Таблица 4.3 – Кинематические параметры формовочного стана ТЭСА 30–50 и кинематические параметры формовки полосы с линейной скоростью $V_{\Pi} = 10$ м/мин

Клеть	1.ОК	2.ОК	3.ОК	4.ОК	1.3К	2.3К	3.3К
n_{ϵ} , мин ⁻¹	33	27	27	30	31	32	32
n_{η} , мин ⁻¹	34	31	20	17	31	32	32

Примечание: V_{Π} – линейная скорость формовки формуемой полосы; n_{ϵ} – частота оборота верхнего вала; n_{η} – частота оборота нижнего вала

Определение положения катающих диаметров для каждого вала с учетом линейной скорости формуемой полосы по приводным клетям формовочного стана.

Расчет положения катающего диаметра [34]:

Угловая скорость вращения вала, рад/с.

$$\omega_i = \frac{\pi \cdot n}{30}, \quad (4.18)$$

где n – частота вращения вала, об/мин.

Катающий диаметр вала, мм [28,33]:

$$D_{ik} = \frac{V_{\Pi} \cdot 2000}{\omega_i}, \quad (4.19)$$

где V_{Π} – линейная скорость формуемой полосы (10 м/мин).

Значения катающих диаметров для всех валков ТЭСА 30–50 при скорости формуемой полосы $V_{\Pi} = 10$ м/мин представлены в таблице 4.4

Таблица 4.4 – Катающие диаметры валков при скорости формуемой полосы $V_{\Pi} = 10$ м/мин

Клеть	1.ОК	2.ОК	3.ОК	4.ОК	1.3К	2.3К	3.3К
$D_{\text{КВ}}$, мм	92,73	103,46	155,44	185,96	101,14	100,30	99,67
$D_{\text{КН}}$, мм	96,27	119,61	116,52	106,00	101,14	100,30	99,67

Примечание: $D_{\text{КВ}}$ – катающий диаметр верхнего вала; $D_{\text{КН}}$ – катающий диаметр нижнего вала.

В соответствии с положением катающих диаметров для первого валкового калибра определены площади зоны опережения $F_{\text{от}}$ и отставания $F_{\text{оп}}$ для нижнего и верхнего валков.

Усилие формовки трубной заготовки в калибрах формовочного стана [29,76,77]:

– для калибров открытого типа:

$$P_i^{\text{ок}} = \frac{\sigma_i^{\Gamma} \cdot S_{\text{T}} \cdot B_i \cdot \Delta \varepsilon_i \cdot L_i^{\text{вн.деф.}}}{m_i \cdot K_{\Phi}}, \quad (4.20)$$

– для калибров закрытого типа:

$$P_i^{\text{зк}} = \frac{\sigma_i^{\Gamma} \cdot S_{\text{T}} \cdot B_i \cdot \Delta \varepsilon_i \cdot L_i^{\text{вн.деф.}}}{m_i \cdot K_{\Phi}} + B_{\text{п}} \cdot S_{\text{T}} \cdot \varepsilon_i \cdot \sigma_i^n, \quad (4.21)$$

где: σ_i^{Γ} – напряжениегиба полосы в i -той клетке, определяемое из диаграммы истинных напряжений, МПа; S_m – толщина заготовки, мм; B_i – ширина заготовки, находящаяся в контакте с валками, мм; $\Delta \varepsilon_i$ – величина деформациигиба в i -той клетке, определяется как разность деформаций в i -том и в $(i - 1)$ -м калибре с учетом распруживания; $L_i^{\text{вн.деф.}}$ – длина неконтактной зоны деформации в i -том калибре, определяется по специальной методике, мм; m_i – ширина i -того калибра, мм; $B_{\text{п}}$ – периметр трубной заготовки в закрытой i -клетке; K_{Φ} – коэффициент схемы формовки.

Результаты расчета усилий формовки по клеткам формовочного в таблице представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Усилие формовки по клеткам формовочного стана

Клеть	1.ОК	2.ОК	3.ОК	4.ОК	1.ЗК	2.ЗК	3.ЗК
Р, Н	1825,1	1595,1	1403,9	1321,9	638,1	634,5	627,7

Расхождение расчётных результатов не превышали 5,5- 9,3 % от значений, полученных в процессе экспериментальной формовки.

По зонам опережения и отставания рассчитали силовые параметры в контактном взаимодействии заготовки с приводным профилированным инструментом.

Общее тянущее усилие валка T_{T} необходимое для продвижения формуемой полосы определяется разностью тянущего усилия $T_{\text{к}}$ необходимое на продвижение полосы и усилиемгиба $T_{\text{Г}}$ формуемой полосы:

$$T_{\text{T}} = T_{\text{к}} - T_{\text{Г}}, \quad (4.22)$$

где $T_{\text{к}}$ – тянущее усилие, необходимое для продвижения формуемой полосы, находящейся в контакте валковым калибром, Н;

$T_{\text{Г}}$ – усилиегиба, обеспечивающее получение формуемой полосы с заданными геометрическими параметрами валкового калибра, Н.

Тянущее усилие, необходимое для продвижения формуемой полосы, находящейся в контакте валковым калибром:

$$T_k = \frac{P_i}{F_{\Pi}} \cdot (F_{\text{от}} - F_{\text{оп}}) \cdot f, \quad (4.23)$$

где P_i – усилие формовки в клети;

F_{Π} – полная площадь контактной поверхности формуемой полосы с валком, мм²;

$F_{\text{от}}$ – площадь контактной поверхности формуемой полосы находящиеся в зоне отставания, мм²;

$F_{\text{оп}}$ – площадь контактной поверхности формуемой полосы находящиеся в зоне опережения, мм²;

f – коэффициент трения (0,08–0,12).

Усилие, затрачиваемое на изгиб полосы в калибре, обеспечивающее заданные параметры формуемой полосы:

$$T_{\Gamma} = \tau_{\Gamma} \cdot \left(\frac{S_{\Gamma}}{2R_i} - \frac{S_{\Gamma}}{2R_{(i-1)}} \right) \cdot B_{\text{к}} \cdot \frac{S_{\Gamma}}{2}, \quad (4.24)$$

где τ_{Γ} – предел текучести гiba ($\tau_{\Gamma} = \sigma_{\Gamma}/\sqrt{3}$), МПа;

S_{Γ} – толщина стенки трубы, мм;

R_i – радиус формовки в клети, мм;

$R_{(i-1)}$ – радиус формовки в предыдущей клети, мм;

$B_{\text{к}}$ – ширина контакта площади полосы с валком, мм.

Тянущие усилия валков калибра:

– для верхнего валка

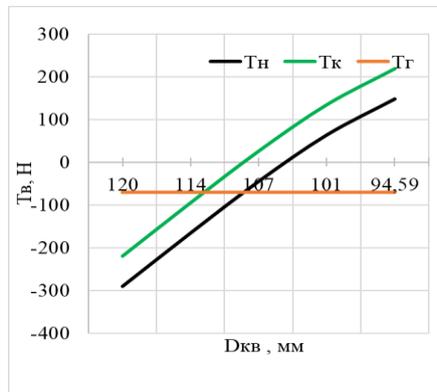
$$T_{\text{в}} = \frac{P_i}{F_{\Pi}^{\text{в}}} \cdot (F_{\text{от}}^{\text{в}} - F_{\text{оп}}^{\text{в}}) \cdot f - \tau_{\Gamma} \cdot \left(\frac{S_{\Gamma}}{2R_i} - \frac{S_{\Gamma}}{2R_{(i-1)}} \right) \cdot B_{\text{к}} \cdot \frac{S_{\Gamma}}{2}, \quad (4.25)$$

– для нижнего валка

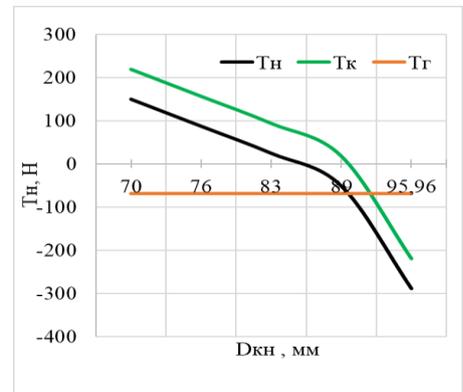
$$T_{\text{н}} = \frac{P_i}{F_{\Pi}^{\text{н}}} \cdot (F_{\text{от}}^{\text{н}} - F_{\text{оп}}^{\text{н}}) \cdot f - \tau_{\Gamma} \cdot \left(\frac{S_{\Gamma}}{2R_i} - \frac{S_{\Gamma}}{2R_{(i-1)}} \right) \cdot B_{\text{к}} \cdot \frac{S_{\Gamma}}{2}. \quad (4.26)$$

Контактная площадь поверхности рассчитывается с учетом конфигурации формы контакта трубной заготовки с инструментом (п. 4,2; п. 4.3).

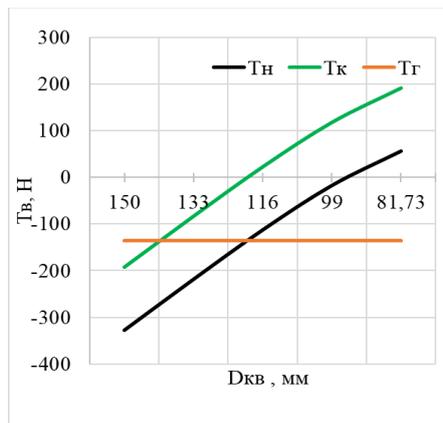
Графики тянущих усилий валков для открытых калибров представлены на рисунке 4.10.



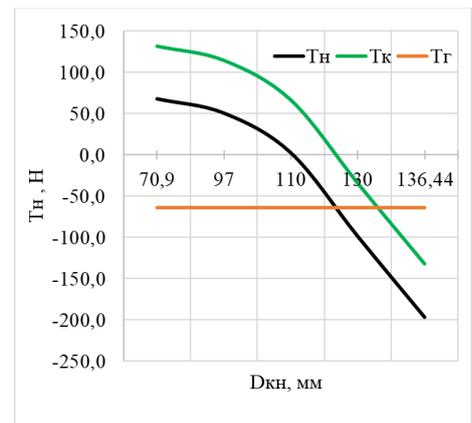
а



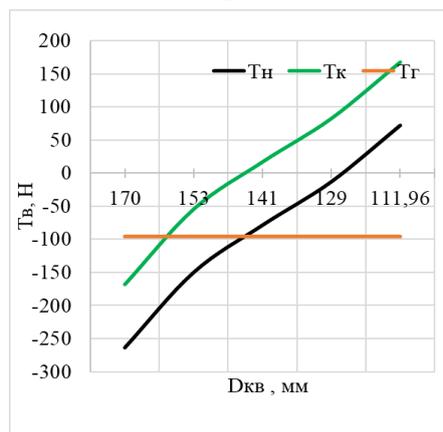
б



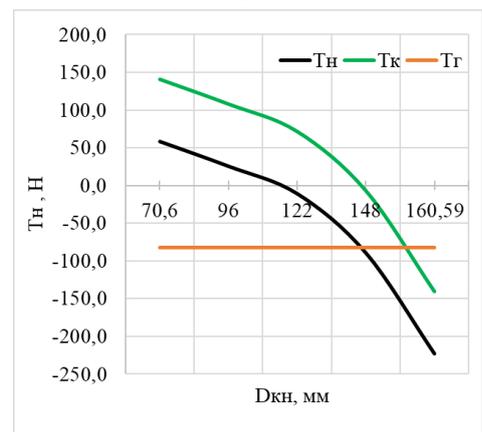
в



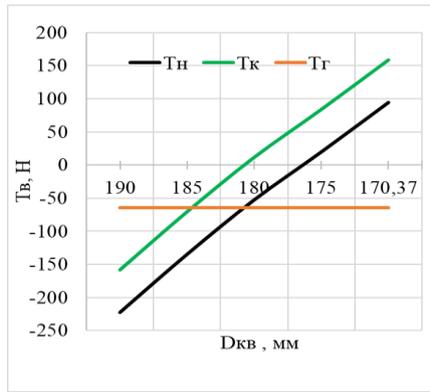
г



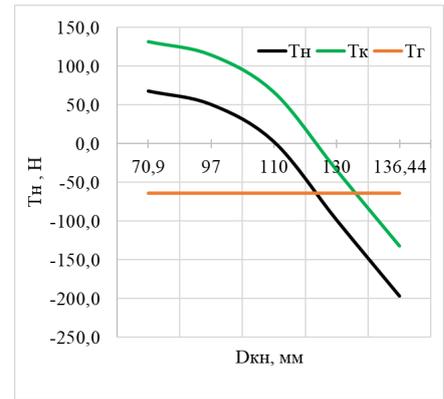
д



е



Ж

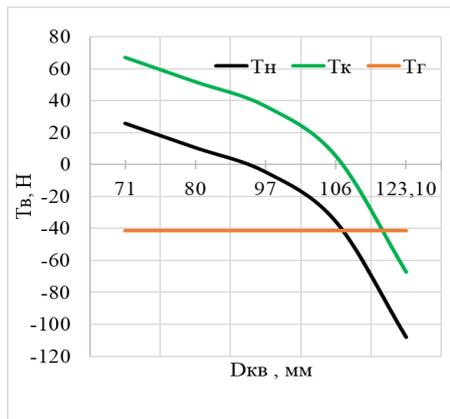


З

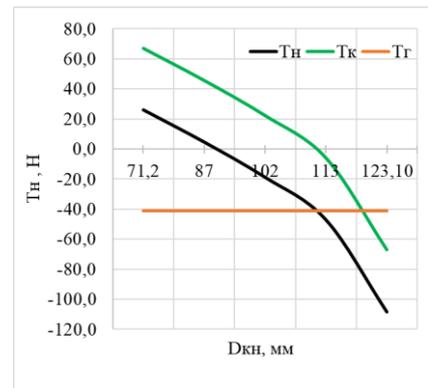
а, в, д, ж –нижнего валка 1.ОК, 2.ОК, 3.ОК, 4.ОК; б, г, е, з – верхнего валком 1.ОК, 2.ОК, 3.ОК, 4.ОК

Рисунок 4.10 – Графики тянущих усилий для валков открытых калибров

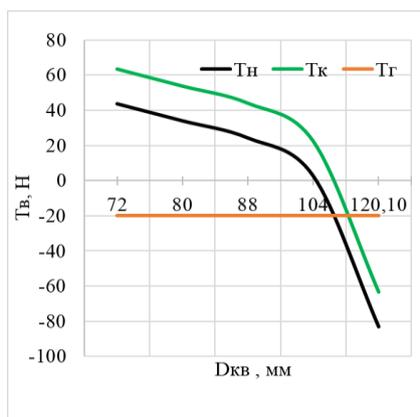
Графики тянущих усилий валков для закрытых калибров представлены на рисунке 4.11.



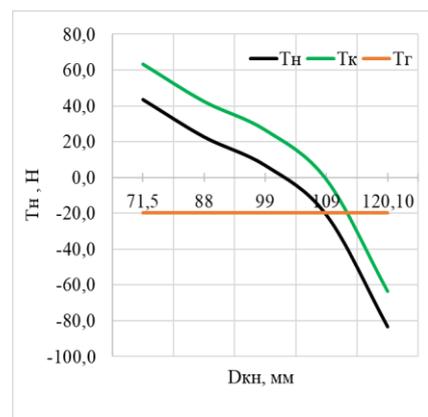
а



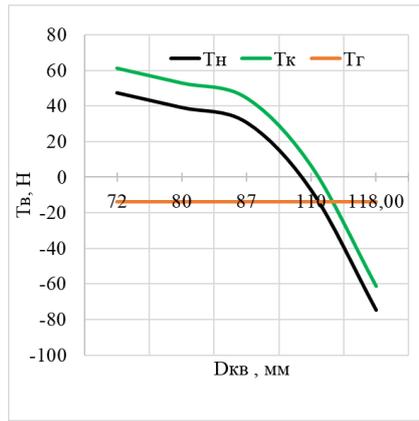
б



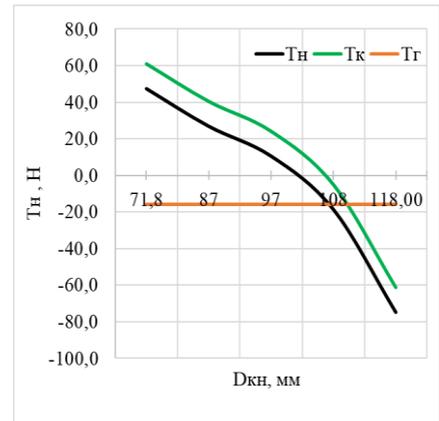
в



г



Д

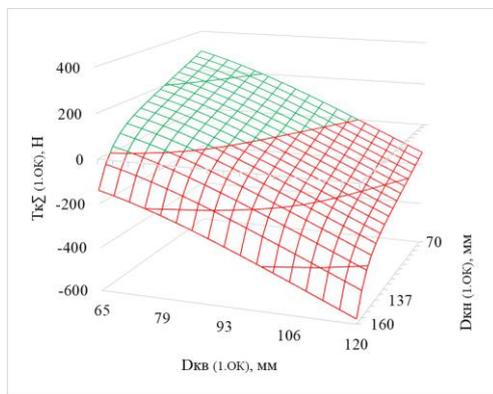


е

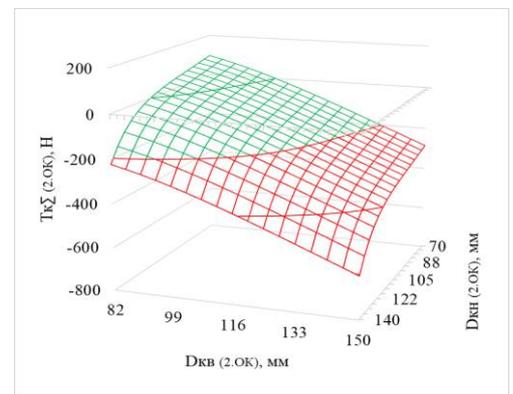
а, в, д –нижнего вала 1.ЗК, 2.ЗК, 3.ЗК; б, г, е – верхнего вала 1.ЗК, 2.ЗК, 3.ЗК

Рисунок 4.11 – Графики тянущих усилий для валков закрытых калибров

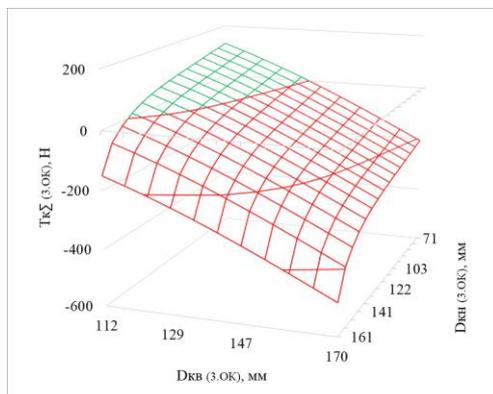
Тянущие усилия калибра рассчитываются путем сложения тянущих усилий верхнего и нижнего валков. В результате получаются диаграммы распределения тянущих усилий калибров, по которым возможно определить положительные усилия и диапазоны катающих диаметров валков, которые соответствуют этим усилиям. Диаграммы распределения тянущих усилий для открытых калибров представлены на рисунке 4.12.



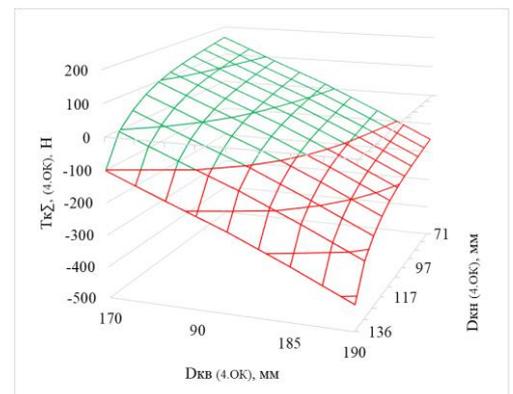
а



б



в

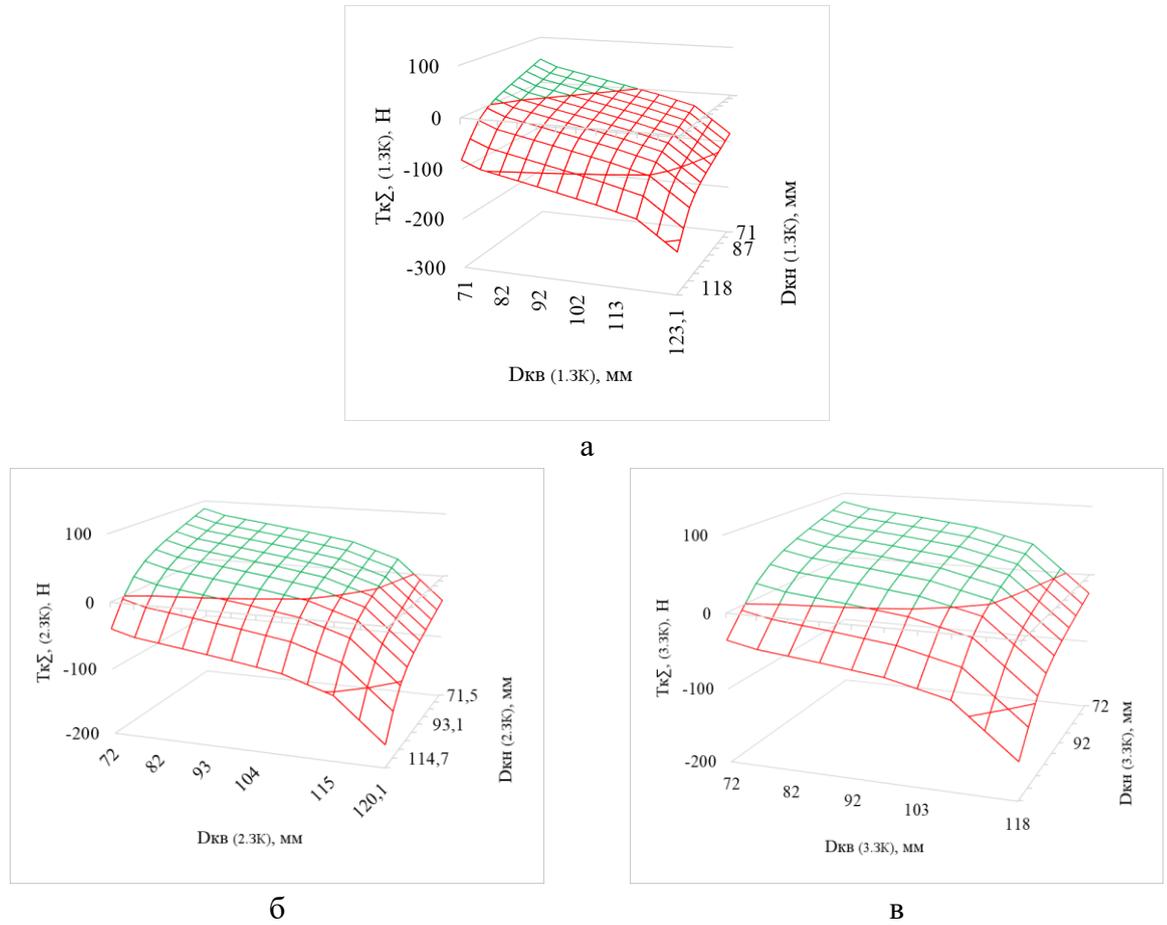


г

а, б, в, г – 1.ОК, 2.ОК, 3.ОК, 4.ОК

Рисунок 4.12 – Диаграммы распределения тянущих усилий для открытых калибров

Диаграммы распределения тянущих усилий для закрытых калибров представлены на рисунке 4.13.



а, б, в, – 1.3К, 2.3К, 3.3К

Рисунок 4.13 – Диаграммы распределения тянущих усилий для закрытых калибров

Катающий диаметр выбирается таким образом, чтобы в каждой клетке сбалансировать зоны опережения (тянущие силы трения) и зоны отставания (тормозящие силы трения). Отсутствие баланса зон увеличивает скольжение металла относительно валков, и вызывает непроизводительный расход энергии, ухудшает качество поверхности трубы, снижает стойкость валков и может привести к остановке процесса.

Диапазоны катающих диаметров, при которых тянущие усилия являются определяющими по сравнению с тормозящими представлены в таблице № 4.6.

Таблица № 4.6 – Диапазон катающих диаметров с тянущими усилиями

Валок	Верхний						
Клеть	1.ОК	2.ОК	3.ОК	4.ОК	1.3К	2.3К	3.3К
D_{\min} , мм	94,5	81,7	72,1	95,2	71,2	71,5	71,8
D_{\max} , мм	105,9	94,7	126,9	177,3	87,6	104	107,5
T_v , Н	43,49	41,97	22,82	21,92	24,69	17,01	15,28
Валок	Нижний						
Клеть	1.ОК	2.ОК	3.ОК	4.ОК	1.3К	2.3К	3.3К
D_{\min} , мм	70	70,3	70,6	70,9	71,2	71,5	71,8
D_{\max} , мм	85,4	96,6	109,1	115,7	91,1	103,9	102,2
T_n , Н	63,34	55,91	40,99	70,98	33,16	29,38	27,99
T_{Σ} , Н	106,83	97,88	63,81	92,9	57,85	46,39	43,27

4.5 Выводы по главе

Разработана расчетно-экспериментальная методика оценки параметров контактного взаимодействия полосы с валковым инструментом, позволяющая определять границы входного контакта, с применением фактора формы.

Фактор формы и предлагаемая методика позволяет аналитически рассчитывать (воспроизводить) контур контактной поверхности по заданным крайним точкам. Координаты крайних точек могут быть получены как экспериментально, так и теоретически расчетным путем.

Предложена методика для определения параметров зон опережения и отставания, суммарных тянущих усилий клеток формовочного стана и тянущих усилий в зависимости кинематических параметров.

Для формовочных калибров определены диаграммы распределения энергосиловых параметров процесса формоизменения трубной заготовки, позволяющие выбрать рациональные значения для конкретного сортамента труб.

Определены диапазоны катающих диаметров, при которых тянущие усилия являются определяющими по сравнению с тормозящими.

Глава 5 Распределение тянущих усилий, схемы валкового инструмента ТЭСА 30 - 50 и предлагаемый инструмент для ТЭСА 219 - 406 ООО «НТС-Лидер»

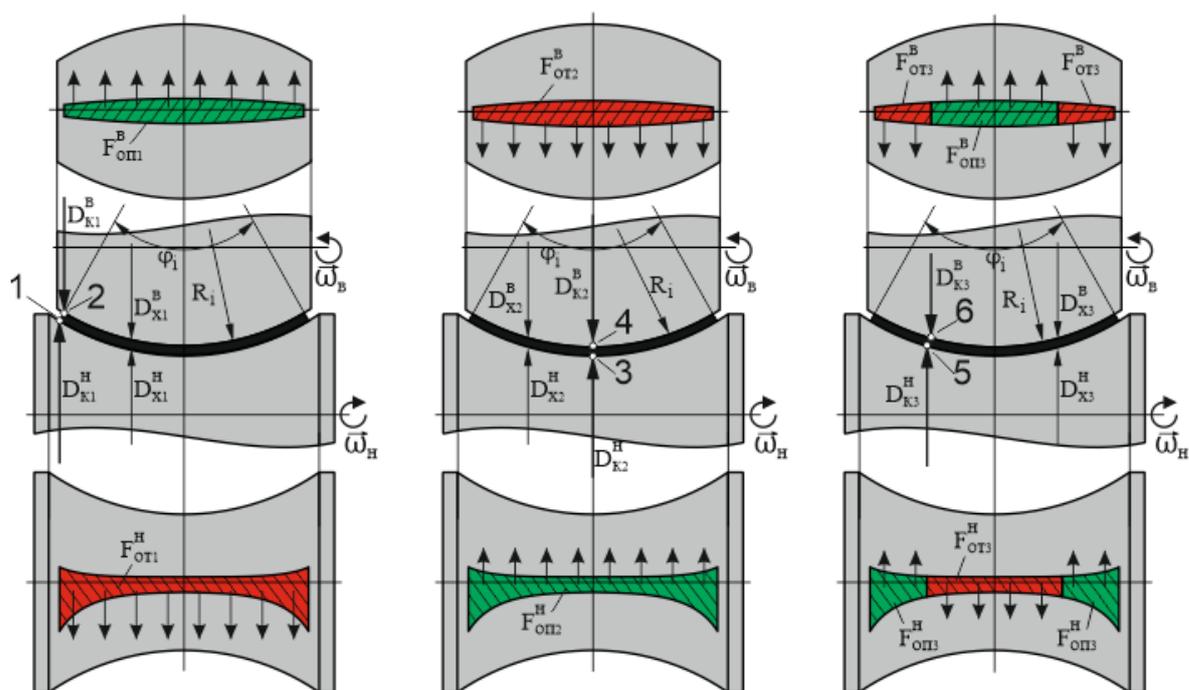
5.1 Распределение тянущих и тормозящих усилий на контактных поверхностях полосы с инструментом

В трубоэлектросварочном производстве продолжается тенденция перехода от традиционного двухвалкового деформирующего инструмента к отдельным валкам, к многовалковому и роликовому инструменту, которые в отличие от традиционного инструмента позволяют применять один комплект для широкого размерного сортамента труб [18-23].

Для ряда решений технологических задач применяется большое количество валкового инструмента. В традиционном понимании при формоизменении трубной заготовки валковый инструмент на участке открытых калибров с углом формовки $TЗ \leq 180^\circ$ обеспечивает полный контакт по всему периметру трубной заготовки и стабильное продвижение трубной заготовки. По разным причинам это условие не всегда обеспечивается и может приводить к образованию дефектов (смещение кромок; образование гофров кромки на ТЗ), а практических инженерных методик для оперативного корректирования технологических параметров процесса непрерывной формовки нет.

Традиционный валковый инструмент имеет ряд недостатков, что ограничивает его применение в ряде производств. Так как такой инструмент на участке открытых клетей с углом формовки $TЗ \leq 180^\circ$ обеспечивает полный контакт, возможны появления существенных отклонений технологических параметров процесса формовки ТЗ, связанные с настройкой и износом валкового инструмента. Не точная настройка инструмента способствуют развитию таких дефектов как смещения кромок и возникновения локальных гофров. Неравномерная выработка инструмента по профилю может привести к несимметричному контакту трубной заготовки с валковым инструментом. Это в свою очередь может привести к возникновению несимметричных усилий по ширине контакта. Применение валкового инструмента, состоящего из нескольких формовочных элементов, позволит минимизировать указанные недостатки и расширит технологические возможности процесса формоизменения трубной заготовки.

В зависимости от расположения катающего диаметра возможны несколько схем распределения тянущих и тормозящих усилий по контактным поверхностям – рисунок 5.1.



а – катающий диаметр по краям (ребрам) валков; б – катающий диаметр по дну валков; в – катающий диаметр по середине профилированной части калибра валков

Рисунок 5.1 – Схемы распределения тянущих и тормозящих усилий в зависимости от расположения катающего диаметра

На рисунке 5.1а, катающие диаметры для нижнего и верхнего валков находятся на периферийной части калибра соответственно в точках 1 и 2. Скорость в точке – 1, где находится сечение катающего диаметра нижнего валка ($D_{к1}^H$) больше, чем скорость любой точки калибра нижнего валка (D_{x1}^H). Это вызовет на контактной поверхности нижнего валка ($F_{от1}^H$) определенное торможение формуемой полосы. Скорость в точке – 2, где находится сечение катающего диаметра верхнего валка ($D_{к1}^B$) меньше, чем скорость в любой точки калибра верхнего валка (D_{x1}^B). Это вызовет на контактной поверхности верхнего валка ($F_{оп1}^B$) определенное опережение формуемой полосы.

Расположение катающих диаметров по дну калибров валков представлено на рисунок 5.1б соответственно в точках 3 и 4. Скорость в точке – 3, где находится сечение катающего диаметра нижнего валка ($D_{к2}^H$) меньше, чем линейная скорость любой точки калибра нижнего валка (D_{x2}^H). Это вызовет на контактной поверхности нижнего валка ($F_{оп2}^H$) определенное опережение формуемой полосы. Скорость в точке – 3, где находится сечении катающего диаметра верхнего валка ($D_{к2}^B$) больше, чем скорость в любой точки калибра верхнего валка (D_{x2}^B). Это вызовет на контактной поверхности верхнего валка ($F_{от2}^B$) определенное торможение формуемой полосы.

Анализ показал, что возможен выбор расположения катающего диаметра, которое позволяет определять, сравнивать и уравнивать силы трения на каждой из конкретных контактных поверхностях - рисунок 3в.

При расположении катающего диаметра (D_{x3}^H) в точке 5 для нижнего валка (рисунок 5.1в), скорость точек, находящихся на периферийных частях калибра нижнего валка, больше скорости полосы, это вызовет на контактной поверхности валка ($F_{отз}^H$) опережение периферийных частей формуемой полосы. Скорость точек находящиеся на центральной части калибра нижнего валка меньше скорости полосы, это вызовет на контактной поверхности валка ($F_{отз}^H$) торможение центральной части полосы. При расположении катающего диаметра (D_{x3}^B) в точке 6 для верхнего валка (рисунок 3в), скорость точек, находящихся на периферийных частях калибра верхнего валка, меньше скорости полосы, это вызовет на контактной поверхности валка ($F_{отз}^B$) торможение периферийных частей формуемой полосы. Скорость точек находящиеся на центральной части калибра верхнего валка больше скорости полосы, это вызовет на контактной поверхности валка ($F_{отз}^H$) опережение центральной части полосы.

Таким образом, соотношение линейных скоростей в точках на контактных поверхностях валков и скорости движения полосы, является определяющей характеристикой кинематического состояния контактной зоны. Различие в линейных скоростях точек на контактных поверхностях валков и полосы вызывает контактное трение (скольжение), интенсивность которого зависит от разницы текущих диаметров валка и катающего диаметра. Если катающий диаметр расположен у кромки полосы или в ее середине, то на всей контактной поверхности несовпадение скоростей полосы и точек по контактной поверхности валка имеет один знак (опережение или отставание), а разница линейных скоростей по ширине калибра максимальна, соответственно, трение (скольжение) получает наибольшее развитие, что может привести к ухудшению качество формуемой полосы, повышение износа валков, требует дополнительного расхода энергии.

Уменьшению контактного скольжения и его негативного воздействия на процесс способствует более точное согласование скоростей полосы и точек валков по контактным участкам. Целесообразно выбирать (устанавливать) расположение катающих диаметров, так чтобы на контакте полосы с каждым из валков были зоны разнонаправленного несовпадения скоростей – опережение и отставание. Это позволит сбалансировать уровень сил трения скольжения.

Для нижнего валка в зонах опережения, тянущие усилие составило 127,2 Н — это усилия является положительным и способствует продвижению ТЗ через формовочный калибр. В зоне отставания тормозящее усилие составило -14,7 Н — это усилие является отрицательным и создает сопротивление продвижению трубной заготовки. Суммарное тянущее усилие нижнего валка составило $127,2 + (-14,7) = 112,6$ Н. Для верхнего валка в зоне опережения, тянущие усилие составило 109,7 Н, а для зон отставания тормозящее усилие составило -35,0 Н. Соответственно суммарное усилие верхнего валка составило $109,7 + (-35) = 74,5$ Н. Суммарное усилие клетки составило $112,6 + 74,5 = 187,32$ Н.

На рисунке 5.26 представлен калибр, в котором контакт по внешней поверхности ТЗ с нижним валком происходит по периферийным участкам и составляет 51 % от ширины ТЗ, а контакт ТЗ по внутренней поверхности происходит с верхним валком в центральной ее части и составляет 55% ширины ТЗ.

В результате исключения центрального и периферийных контактов ТЗ, соответственно с нижним и верхним валками, площадь контактных отпечатков наружной поверхности по периферийным участкам ТЗ с нижним валком, входящие в зоны опережение составила 1034,02 мм², а площадь контактного отпечатка внутренней поверхности по центральной части ТЗ с верхним валком, которая также входит в зону опережения составила 394,46 мм². В данном калибре возникают только тянущие усилия, которые составили для нижнего валка 127,4 Н, а для верхнего валка 109,7 Н. Суммарное тянущее усилие клетки составило $127,4 + 109,7 = 237,1$ Н. Сравнивая традиционный калибр с калибром из разрезанных валков, можно сделать вывод, о том что тянущее усилие в калибре без зон отставания увеличилось для нижнего валка на 13,1 %, а для верхнего на 47,2 %, соответственно увеличилось суммарное тянущее усилие клетки на 26,6 %.

Для управления процессом формовки ТЗ, целесообразно предложить калибр, в котором с учетом изменения границ контактного взаимодействия ТЗ с валками и кинематических параметров (расположение катающего диаметра) возможно определять зоны отставания и опережения, тем самым управлять тянущими усилиями валков и калибра в целом – рисунок 5.2в.

Анализ процесса формоизменения заготовки в этом калибре показывает, что площадь зоны опережения равняется 950,54 мм², а площадь зоны отставания равняется 83,48 мм². В результате изменения расположения катающего диаметра на нижнем валке в зонах опережения образуются тянущие усилия, которые составили 103,6 Н, а в зонах отставания образуются тормозящие усилия, которые составили – 13,2 Н. Суммарное тянущее усилие нижнего валка составило $103,6 + (-13,2) = 90,4$ Н, а для верхнего валка тянущее усилие равняется 83,9. Суммарное тянущее усилие данного калибра составляет $90,4 + 83,9 = 174,3$ Н.

На основе анализа экспериментальных данных и результатов расчета по представленным методикам расчета контактного взаимодействия и тянущих усилий процесса формоизменения,

представляется, возможным применение схем валкового инструмента с углом формовки ТЗ $< 180^\circ$, состоящих из отдельных валков или из нескольких деформирующих элементов – рисунок 5.3.

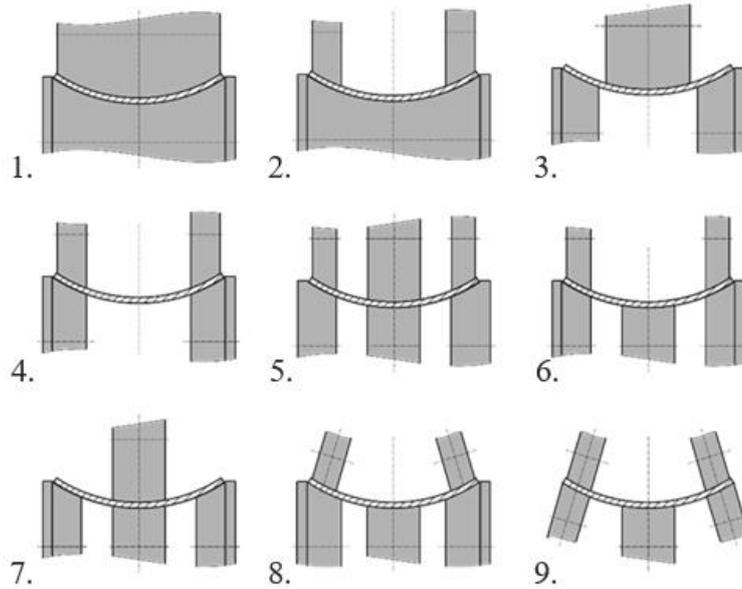
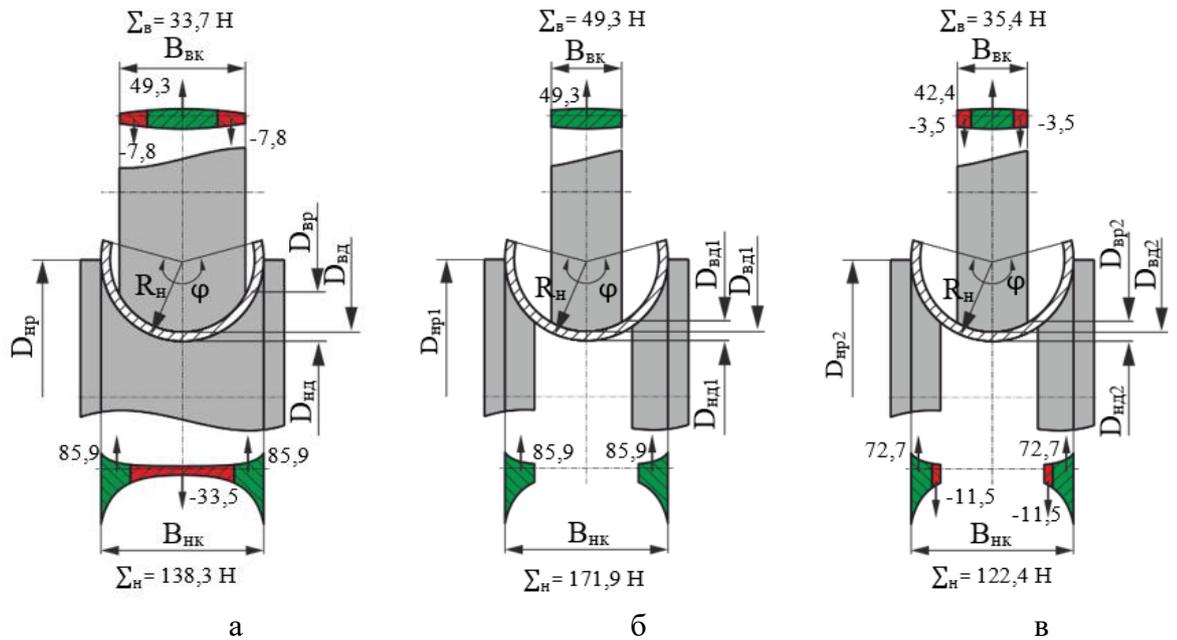


Рисунок 5.3 – Схемы валкового инструмента, состоящие из нескольких деформирующих элементов с углом формовки ТЗ $< 180^\circ$

Распределения тянущих и тормозящих усилий для калибров с углом формовки $\varphi \geq 180^\circ$ и схемы контакта для ТЭСА 30-50 с разными вариантами исполнения калибров представлены на рисунке 5.4.

В традиционном калибре неполного охвата с углом формовки $\varphi \geq 180^\circ$ участки трубной заготовки, которые находятся на расстоянии соответствующем углу профиля нижнего валка от $\varphi \geq 180^\circ$ до угла профиля ТЗ не контактируют рабочими валками, а контактирует по центральному участку ТЗ – рисунок 5.4а.



а – традиционный калибр; б – разрезанный калибр со схемой контакта включающие только зоны опережения; в – разрезанный калибр со схемой контакта включающие только зоны опережения и отставания

Рисунок 5.4 – Варианты калибров с углом формовки $\varphi \geq 180^\circ$ и схемы контакта для ТЭСА 30-50

Площадь контакта наружной поверхности с нижним валком равняется $955,18 \text{ мм}^2$, а площадь контакта внутренней поверхности ТЗ с верхним валком равняется $187,78 \text{ мм}^2$. С учетом расположения катающего диаметра для нижнего и верхнего вала определены площади зон опережения и отставания. По наружной поверхности ТЗ с нижним валком площадь зоны опережения, которые располагаются на периферийных участках контактного отпечатка составила 91,4 %, соответственно площадь зона отставания, которая находится в центральной части контактного отпечатка составила 8,6 %. На внутренней поверхности ТЗ с верхним валком площадь зона опережения, которая находится в центральной части контактного отпечатка составила 53,7 %, соответственно площадь зоны отставания, которые находятся на периферийных участках контактного отпечатка составила 46,3 %.

Для калибра с неполным охватом формовки, по зонам опережения и отставания рассчитаны тянущие и тормозящие усилия, суммарные тянущие усилия по валкам и суммарные тянущие усилия валковому калибру. Для нижнего вала в зонах опережения, тянущие усилия составило 171,8 Н — это усилия является положительным и способствует продвижению ТЗ через формовочный калибр. В зоне отставания тормозящее усилие составило $-33,5 \text{ Н}$ — это усилие является отрицательным и создает сопротивление продвижению трубной заготовки. Суммарное тянущее усилие нижнего вала не полного охвата составило $171,8 + (-33,5) = 138,3 \text{ Н}$. Для верхнего вала в зоне опережения, тянущие усилия составило 49,3 Н, а для зон отставания тормозя-

щее усилие составило $-15,6$ Н. Соответственно суммарное усилие верхнего валка составило $49,3 + (-15,6) = 33,7$ Н. Суммарное усилие клетки составило $138,3 + 33,7 = 172,0$ Н.

Анализ процесса формоизменения заготовки в калибре неполного охвата, показывает, что тормозящие усилия снижают тянущие усилия клетки и повышают сопротивление продвижения трубной заготовки через калибр. Поэтому целесообразно исключить зоны отставания и разработать калибр с отсутствием зон отставания – рисунок 5.4 б.

На рисунке 5.4 б представлен калибр, в котором контакт по внешней поверхности ТЗ с нижним валком происходит по периферийным участкам и составляет 42 % от ширины ТЗ, а контакт ТЗ по внутренней поверхности происходит с верхним валком в центральной ее части и составляет 33% ширины ТЗ. В результате исключения центрального и периферийных контактов ТЗ, соответственно с нижним и верхним валками, площадь контактных отпечатков наружной поверхности по периферийным участкам ТЗ с нижним валком, входящие в зоны опережения составила $870,48$ мм², а площадь контактного отпечатка внутренней поверхности по центральной части ТЗ с верхним валком, которая также входит в зону опережения составила $100,84$ мм². В данном калибре возникают только тянущие усилия, которые составили для нижнего валка $171,8$ Н, а для верхнего валка $49,3$ Н. Суммарное тянущее усилие клетки составило $171,8 + 49,3 = 221,1$ Н. Сравнивая традиционный калибр со схемой контакта включающим зоны опережения и отставания с калибром со схемой контакта без зон отставания, можно сделать вывод, о том что тянущее усилие в калибре без зон отставания увеличилось для нижнего валка на 24,5 %, а для верхнего на 46,3 %, соответственно увеличилось суммарное тянущее усилие клетки на 28,5 %.

Для управления процессом формовки в калибрах с углом формовки $\varphi \geq 180^\circ$ целесообразно предложить калибр, в котором с учетом изменения границ контактного взаимодействия ТЗ с валками и кинематических параметров (расположение катающего диаметра) возможно определять зоны отставания и опережения, тем самым управлять тянущими усилиями валков и калибра в целом – рисунок 5.4 в.

На рисунке 5.4в представлен калибр с углом формовки ТЗ $\varphi \geq 180^\circ$, в котором изменены кинематические параметры, в результате которых в контакте ТЗ с нижним валком образуются схема контакта включающие зоны опережения и отставания. Площадь зоны опережения равняется $806,64$ мм², а площадь зоны отставания равняется $63,82$ мм². В результате изменения расположения катающего диаметра на нижнем валке в зонах опережения образуются тянущие усилия, которые составили $145,4$ Н, а в зонах отставания образуются тормозящие усилия, которые составили $-23,0$ Н. Суммарное тянущее усилие нижнего валка составило $145,4 + (-23,0) = 122,4$ Н, а для верхнего валка тянущее усилие равняется $35,4$. Суммарное тянущее усилие данного калибра составляет $122,4 + 35,4 = 157,8$ Н.

На основе анализа экспериментальных данных и результатов расчета по представленным методикам расчета контактного взаимодействия и тянущих усилий процесса формоизменения, представляется, возможным применение схем валкового инструмента с углом формовки $\phi \geq 180^\circ$, состоящих из отдельных валков или из нескольких деформирующих элементов – рисунок 5.5.

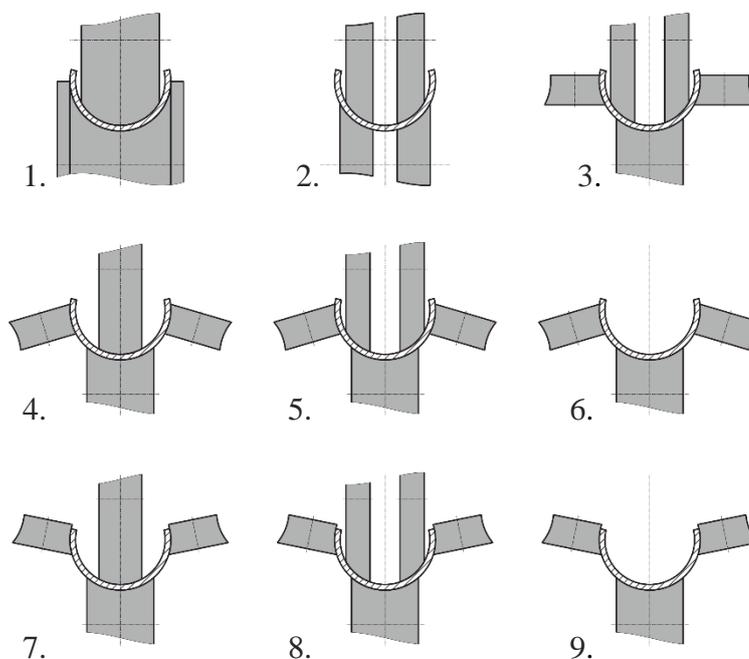


Рисунок 5.5 – Схемы валкового инструмента, состоящих из нескольких деформирующих элементов: с углом формовки $T3 \geq 180^\circ$

Таким образом, для ТЭСА 30-50 с учетом конструкции клетки предложены новые схемы валкового инструмента. По разработанным методикам рассчитаны тянущие усилия формоизменения трубной заготовки, построены диаграммы распределения тянущих усилий с помощью, которых можно выбирать кинематические параметры процесса с уравновешенными тянущими усилиями по всем клетям формовочного стана ТЭСА 30-50.

5.3 Предлагаемый технологический инструмент для формовочного стана ТЭСА 219 - 406 ООО «НТС–Лидер»

Компания ООО «НТС–Лидер» – независимая российская нефтесервисная компания, разработчик и производитель автоматизированных линий по ремонту насосно–компрессорных труб (НКТ), насосных штанг, входному контролю обсадных труб, крупнейший участник рынка комплексного обслуживания труб нефтяного сортамента и повышения нефтеотдачи пластов.

В рамках расширения производственных мощностей компания осваивает высокотехнологичное производство по изготовлению прямошовных электросварных труб малого, среднего диаметра высокой прочности, которые будут использоваться в нефтяных и газовых скважинах.

Компоновка формовочного стана ТЭСА 219 - 406 для базовой трубы $\varnothing 406 \times 10$ мм класса прочности K52 с традиционным двухвалковым инструментом представлена на рисунке 5.6.

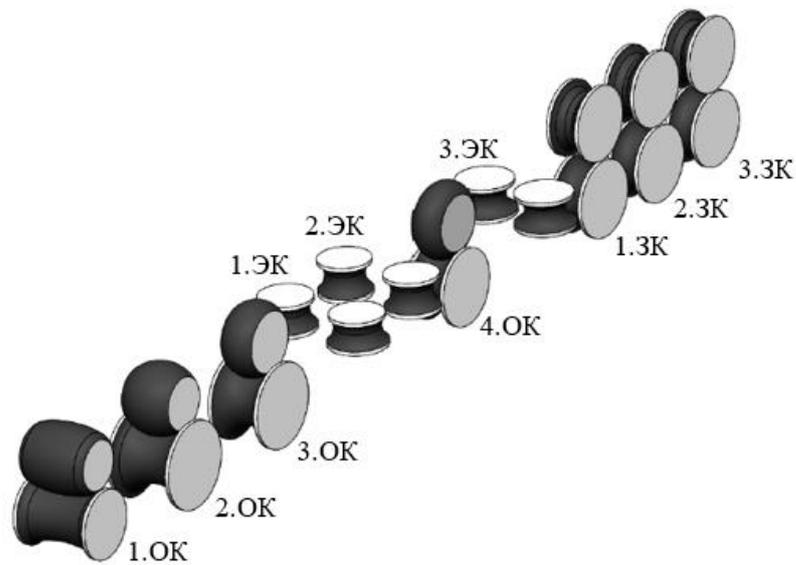


Рисунок 5.6 – Компоновка ТЭСА 219 - 406 для трубы $\varnothing 406 \times 10$ мм с традиционным двухвалковым инструментом

Радиусы и углы профиля трубной заготовки для базовой трубы $\varnothing 406 \times 10$ мм представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 - Радиусы и углы профиля трубной заготовки для базовой трубы $\varnothing 406 \times 10$ мм

№ клетки	1.ОК	2.ОК	3.ОК	1.ЭК	4.ОК	2.ЭК	3.ЭК	1.3К	2.3К	3.3К
R _ц , мм	3653,61	1149,12	627,71	463,762	367,0	310,1	277,22	248	227,6	214,9
φ, град.	15,6	49,6	90,8	122,9	155,3	183,8	205,6	229,2	249,2	263,3
Г _ц , мм	203									
α, град.	45									

Для базовой трубы $\varnothing 406 \times 10$ мм рассчитаны продольные деформаций по всему очагу сворачивания. Результаты расчета продольных деформаций представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 - Результаты расчета продольных деформаций ТЗ для базовой трубы $\varnothing 406 \times 10$ мм

№ клетки	1.ОК	2.ОК	3.ОК	1.ЭК	4.ОК	2.ЭК	3.ЭК	1.ЗК	2.ЗК	3.ЗК
$\varepsilon_{00}, \%$	-0,121	-0,124	-0,126	-0,125	-0,116	-0,115	-0,093	-0,063	-0,043	-0,031
$\varepsilon_{11}, \%$	-0,111	-0,112	-0,114	-0,106	0,110	-0,101	-0,081	-0,048	-0,041	-0,024
$\varepsilon_{22}, \%$	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
$\varepsilon_{33}, \%$	0,213	0,152	0,175	0,163	0,163	0,167	0,114	0,085	0,068	0,056

Анализ результатов расчета деформированного состояния ТЗ для базовой трубы $\varnothing 406 \times 10$ мм (таблица 5.2) показал, что значения продольных деформаций по длине формовочного стана в основном в пределах упругой деформацией $\varepsilon_{уп} = 0,172\%$. Однако, превышение деформации по кромке в первой открытой клетки (1.ОК) составило 0,041 ($\varepsilon_{33} = 0,213$). Превышение деформации по кромке в третьей открытой клетки (3.ОК) составило 0,002 ($\varepsilon_{33} = 0,175$). Таким образом для 1.ОК и 3.ОК требуется корректировка параметров профиля ТЗ.

В результате корректировки калибровки в 1.ОК центральный угол - φ и радиус формовки ТЗ - $R_{ц}$ изменены на $\varphi = 15,33^\circ$ и $R_{ц} = 3717,96$ мм, а в 3.ОК центральный угол - φ и радиус формовки ТЗ - $R_{ц}$ изменены на $\varphi = 88,78^\circ$ и $R_{ц} = 641,99$ мм.

После произведен перерасчет деформированного состояния ТЗ скорректированными параметрами профиля ТЗ, в результате чего удалось снизить значения продольных деформаций на кромке в 1.ОК до $\varepsilon_{33} = 0,168\%$ и в 3.ОК до $\varepsilon_{33} = 0,163\%$ и добиться допустимых значений деформации по всему очагу сворачивания ТЗ.

Далее производился расчет тянущих усилий формоизменения трубной заготовки для трубы $\varnothing 406 \times 10$ мм с традиционным двухвалковым инструментом с применением разработанных методик, представленные в четвертой главе, в соответствии конфигурациям контактных площадей и фактора формы.

Результаты расчета контактных площадей, катающих диаметров и тянущих усилий формоизменения трубной заготовки для базовой трубы $\varnothing 406 \times 10$ мм с традиционным двухвалковым инструментом представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Результаты расчета контактных площадей, катающих диаметров и тянущих усилий формоизменения трубной заготовки для базовой трубы $\varnothing 406 \times 10$ мм с традиционным двух-валковым инструментом

Клеть	1.ОК	2.ОК	3.ОК	4.ОК	1.3К	2.3К	3.3К
P_i , кН	97,16	101,96	103,64	106,93	139,74	142,45	147,54
Верхние валки							
m	3,8	3,2	2,3	3,6	5,3	6,4	6,1
F_B , мм ²	26597	19343	24115	13014	36648	38678	40112
$D_{в. кат}$, мм	581,50	592,25	635,24	925,89	511,06	519,21	526,59
T_B , Н	3903,55	4197,65	3127,01	2570,54	2800,49	3108,96	3361,75
Нижние валки							
m	8,1	8,3	6,0	7,1	8,7	7,7	5,7
F_H , мм ²	41400	44417	36714	33528	45195	43433	41927
$D_{н. кат}$, мм	455,7	480,57	525,67	611,25	511,06	519,21	526,59
T_H , Н	4961,2	5830,88	5183,76	4903,52	5078,64	5242,2	5456,92
Суммарное тянущее усилие клетки							
T_{Σ} , Н	10028,5	8864,75	8310,77	7474,1	7879,13	8351,16	8818,67

Анализ результатов расчета тянущих усилий показал, что тянущие усилия формоизменения ТЗ на участке открытых калибров не уравновешены. Разница между тянущими усилиями 1.ОК и 2.ОК составляет $\Delta T = 13,1\%$, между 2.ОК и 3.ОК $\Delta T = 17,1\%$, между 3.ОК и 4.ОК $\Delta T = 10,1\%$. Такое распределение тянущих усилий может привести к недопустимому сжатию волокон ТЗ и как результат, к горообразованию и смещению профиля заготовки по клетям. На участке закрытых калибров тянущие усилия уравновешены, и разница между соседними клетями составляет $\Delta T =$ от 5,4 до 6,0 %.

К числу основных условий устойчивого процесса непрерывной формовки в линии стана, является ограничение перепада тянущих усилий между соседними клетями на уровне 10 % [34]. Таким образом, для уравновешивания тянущих усилий по клетям стана целесообразно предложили калибры с новыми многовалковым инструментом, в которых с учетом изменения границ контактного взаимодействия ТЗ с валками и изменения кинематических параметров может быть достигнуто уравновешивание энергосиловых параметров по всем клетям формовочного стана.

По результатам расчета построена компоновка калибров клеток формовочного стана ТЭСА 219-406 с многовалковым инструментом для предлагаемого варианта трубы $\varnothing 406 \times 10$ – рисунок 5.7.

Обозначения	Валок	Номер клетки									
		1.ОК	2.ОК	3.ОК	1.ЭК	4.ОК	2.ЭК	3.ЭК	1.3К	2.3К	3.3К
r_6 , мм	б	-	-	-	203,0	-	203,0	203,0	-	-	-
φ_6 , мм	б	-	-	-	45,0	-	45,0	45,0	-	-	-
$d_{вр}$, мм	б	-	-	-	505,2	-	662,18	674,2	-	-	-
$d_{нр}$, мм	б	-	-	-	559,84	-	499,23	501,12	-	-	-
$d_д$, мм	б	-	-	-	498,28	-	-	-	-	-	-

Примечание: в – верхний валок; н – нижний валок; б – боковые валки; $R_{цв}$ - радиус центрального валка; $\varphi_{цв}$ - угол центрального валка; $D_{цр}$ - диаметр центрального валка по реборде; $D_{цд}$ - диаметр центрального валка по дну; $V_{цв}$ - ширина центрального валка; $r_{пв}$ - радиус периферийного валка; $\alpha_{пв}$ - угол периферийного валка; $D_{врп}$ - диаметр периферийного валка по внутренней. реборде; $D_{нрп}$ - диаметр периферийного валка по наружной реборде; $V_{пв}$ - ширина периферийного валка; $R_{пу}$ - радиус центрального участка; $r_{пу}$ - радиус периферийного участка; D_p - диаметр по реборде валка; $D_д$ - диаметр по реборде валка дну; b - ширина валка; $S_{ш}$, мм - ширина разрезной шайбы; r_6 - радиус бокового валка; φ_6 - угол бокового валка; $d_{вр}$ - диаметр бокового валка по верхней реборде; $d_{нр}$ - диаметр бокового валка по нижней реборде; $d_д$ - диаметр по дну бокового валка.

По разработанным методикам выполнены все технические расчеты процесса непрерывной формовки. Результаты расчета для базовой трубы $\varnothing 406 \times 10$ мм с многовалковым инструментом представлены в таблице 5.5.

Таблица 5.5 – Результаты расчета контактных площадей, катающих диаметров и уравновешенных тянущих усилий формоизменения трубной заготовки для базовой трубы $\varnothing 406 \times 10$ мм с многовалковым инструментом

Клеть	1.ОК	2.ОК	3.ОК	4.ОК	1.3К	2.3К	3.3К
P_i , кН	97,16	101,96	103,64	106,93	139,74	142,45	147,54
Верхние валки							
m	3,8	3,2	2,3	3,6	5,3	6,4	6,1
F_v , мм ²	19415,8	15281	18568,6	10671,5	36648	38678	40112
$D_{в. кат}$, мм	611,15	645,25	670,91	968,78	511,06	519,21	526,59
T_v , Н	3756,62	3577,55	3192,89	3019,47	2800,49	3108,96	3361,75
Нижние валки							
m	8,1	8,3	6,0	7,1	8,7	7,7	5,7
F_n , мм ²	27324	297595	26066,9	26487,1	45195	43433	41927
$D_{н. кат}$, мм	441,4	475,41	511,99	599,12	511,06	519,21	526,59
T_n , Н	4675,98	5343,65	5381,41	5124,63	5078,64	5242,2	5456,92
Суммарное тянущее усилие клетки							
T_{Σ} , Н	8432,6	8921,2	8574,3	8144,1	7879,13	8351,16	8818,67

Анализ перехода от традиционных двухвалковых калибров к калибрам с многовалковым инструментом показал, что контактная площадь трубной заготовки с нижним и верхним деформирующим инструментом уменьшилась на 21-31 % – с нижними валками; 18-27 % – с верхними валками, в результате чего с учетом кинематических параметров удалось добиться уравновешенных тянущих усилий по всем клетям формовочного. Интервал перепада тянущих усилий между соседними клетями составляет от 3,9 до 6,0 %.

Таким образом, предложенная схема контактного взаимодействия многовалкового инструмента с ТЗ реализует уравновешенную схему нагружения рабочих клеток формовочного стана, сохраняет полученную картину напряженно-деформированного состояния и обеспечивает высокое качество электросварных труб.

5.4 Выводы по главе

На основе разработанных методик проведен анализ распределения тянущих усилий по клетям формовочного стана. В результате исследования тянущих усилий с учетом соотношения тянущих и тормозящих усилий по валковому калибру предложены варианты схем валкового инструмента с компоновкой из нескольких деформирующих элементов.

В условия ТЭСА 219 - 406 ООО «НТС-Лидер» для трубы типоразмером $D_T \times S_T = 406 \times 10$ мм на первом этапе выполнена оценка напряженно-деформированного состояния и модернизирована базовая калибровка инструмента. Для модернизированной калибровки определены энергосиловые параметры по разработанным методикам и выполнен анализ качества продукции. Анализ показал, что для обеспечения высокого качества продукции необходимо определить новые технические параметры.

По результатам анализа, рассчитан многовалковый инструмент, предложены схемы калибров, с уменьшенной контактной площадью трубной заготовки с нижними валками в диапазоне 21-44 %; с верхними валками на 18-27 %, в результате чего с учетом измененных кинематических параметров получены уравновешенные тянущие усилия по всем клетям формовочного стана. Интервал перепада тянущих усилий между соседними клетями составляет от 3,9 до 6,0 %.

Расчет напряженно-деформированного состояния для трубы 406x10 мм показал, что по всему стану максимальные продольные деформации не превышают допустимых значений и предложенная схема контактного взаимодействия многовалкового инструмента с ТЗ с уравновешенными тянущими усилиями позволит сохранить полученную картину напряжённо-деформированного состояния и обеспечить высокое качество электросварных труб.

Общие выводы

1. Разработана расчетно-экспериментальная методика оценки параметров контактного взаимодействия полосы с валковым инструментом, позволяющая определять границы входного контакта различной конфигурации, с применением фактора формы. Методика может быть адаптирована для валкового инструмента с различной калибровкой. Границы контактной поверхности, рассчитанные по методике, хорошо согласуются с входными границами, полученными в результате эксперимента.

2. Разработана методика расчета тянущих усилий формовки с учетом нелинейных границ контактных поверхностей и кинематических параметров, позволяющая выбирать режимы формовки с уравновешенными тянущими усилиями ТЗ по всем клетям формовочного стана. Диаграммы распределения тянущих усилий формовки трубной заготовки, позволяют определить тянущие усилия калибра с учетом разнонаправленных усилий формовки.

3. В результате после корректировки (уменьшение) углов сворачивания ТЗ на всем протяжении очага формовки ТЗ удалось достигнуть равномерного распределения продольных деформаций кромки по всему очагу сворачивания. Работа деформациигиба ТЗ соответствует равномерному уменьшению от начала формовки до сварочного узла, что способствует устойчивому формоизменению ТЗ. Наименьшая суммарная работа деформациигиба соответствует двухрадиусной калибровки с переменными периферийными участками.

4. Разработана и применена методика прямого экспериментального определения геометрических параметров контактных поверхностей трубной заготовки с валковым инструментом по всей линии формовки для трубы типоразмером $D_T \times S_T = 50 \times 1,5$ мм. Отмечено, что экспериментально полученные контактные отпечатки имеют криволинейный характер входных и выходных границ. Установлено, что площади внутренних контактных поверхностей меньше, чем площади наружных контактных поверхностей, соответственно на участке открытых калибров на 56,8 - 69,3 %, на участке закрытых калибров - на 3,7 - 6,5 %.

5. На основе разработанных методик проведен анализ распределения тянущих усилий по клетям формовочного стана, в результате чего возможно выбирать разрезанный валковый инструмент, состоящий из нескольких деформирующих элементов. Целесообразно выбирать (устанавливать) расположение катающих диаметров, так чтобы на контакте полосы с каждым из валков были зоны разнонаправленного несовпадения скоростей – опережение и отставание. Это позволит сбалансировать и снизить уровень сил трения скольжения.

6. В условия ТЭСА 219-406 ООО «НТС-Лидер» для трубы типоразмером $D_T \times S_T = 406 \times 10$ мм выполнена оценка напряженно-деформированного состояния и модернизирована базовая калибровка инструмента. Для модернизированной калибровки определены энергоси-

ловые параметры по разработанным методикам и выполнен анализ качества продукции. Анализ показал, что для обеспечения высокого качества продукции необходимо определить новые технические параметры.

По результатам анализа, рассчитан многовалковый инструмент, предложены схемы калибров, уменьшающие контактную площадь трубной заготовки с нижними валками в диапазоне 21-44 %; с верхними валками в диапазоне 18-27 %, в результате чего с учетом измененных кинематических параметров получены уравновешенные тянущие усилия по всем клетям формовочного стана. Интервал перепада тянущих усилий между соседними клетями составляет от 3,9 до 6,0 %.

Список литературы

1. Матвеев М.Ю., Ваткин Я.Л. Калибровка инструмента трубных станов. М.: Металлургиздат, 1951, 411 с.
2. Жуковский Б.Д. В кн.: Совершенствование производства труб высокочастотной сваркой: Науч. тр./ВНИТИ. М.: Металлургия, 1972, С.5-13.
3. Калибровка инструмента трубоформовочного стана / В.А. Рымов, И.Н. Потапов, П.М. Гаврилин [и др.] // Бюл. ин-та Черметинформация Москва. Черная металлургия.1983. №2. - 22 с.
4. Самусев С.В., Матвеев М.Ю., Рымов В. А. Алгоритмы расчета калибровки валков трубоформовочного стана. Сб. «Пластическая деформация металлов и сплавов», №118, 1979.
5. Расчет калибровки инструмента труба формовочного стана для производства труб из нержавеющей сталей / Рымов В.А., Потапов И.Н., Самусев С.В. [и др.] // Сталь. №6. С. 59-61.
6. Барабанцев Г.Е., Тюляпин А.Н., Колобов А.В., Юсупов В.С. Методика расчета калибровки валков для формовки электросварных прямошовных труб // Производство проката. 2005. №8. С. 26-29.
7. Самусев С.В., Михайлов В.К., Иванова Е.Ю. и др. Современные методы расчета калибровки валков трубоэлектросварочных станов. Учеб. – метод. Пособие. М.: МИСиС, 2004.- 114с.
8. Кричевский Е.М. Исследование калибровки валков непрерывных станов для производства прямошовных труб. Автореф. дисс. канд. техн. наук – Москва, 1963.
9. Рымов В.А., Старшинов А.В., Александрович А.И. Влияние инструмента трубоформовочного стана на деформированное состояние полосы. Изв.вузов, Черная металлургия, 1982, №11, с.64-67.
10. Барабанцев М.Г., Тюляпин А.Н., Колобов А.В., Юсупов В.С. Методика расчета калибровки валков для формовки электросварных прямошовных труб // Производство проката. – 2005. - № 8. - С.26-29.
11. В.А. Рымов П.И. Полухин, И.Н. Потапов Совершенствование производства сварных труб. М.: Металлургия, 1983. 314 с.
12. Шевакин Ю.Ф., Глейберг А.З. Производство труб. М.: Металлургия, 1968, 440 с.
13. Ваткин Я.Л., Ваткин Ю.Я. Трубное производство. М.: Металлургия, 1970, 512 с.
14. Барабанцев Г.Е., Тюляпин А.Н., Григорьев М.И., Колобов А.В., Трайно А.И., Юсупов В.С. Расчет калибровки валков стана 2-8x100-600 для формовки труб // Производство проката. – 2001. - № 8. - С.23-27.

15. Барабанцев Г.Е., Тюляпин А.Н., Григорьев М.И., Колобов А.В., Трайно А.И., Юсупов В.С. Расчет калибровки валков стана 2-8x100-600 для формовки труб // Производство проката. – 2001. - № 6. - С.24-33.
16. Головкин Р.В., Кричевский Е.М.. Производство прямошовных труб на непрерывных трубоэлектросварочных станах [Текст] : [Учебник для проф.-техн. учеб. заведений] /. - Москва : Металлургия, 1969. - 284 с.
17. Л.И. Петрунин, Б.Д. Жуковский, Ю.И. Макиевский, В.А. Свинолобов. Сокращения парка валков непрерывных трубоформовочных станов за счет применения новой калибровки // Производство сварных труб. Москва. Металлургия. 1973 №2, С. 5-12.
18. Патент 2498872. Российская федерация. МПК В21D 5/06 Станок с переменной линейной структурой для формирования труб: № 2009134904/02: заявл. 17.09.2009: опубл. 20.11.2013 Бюл. № 32 / Травини Ливио (ИТ), Травини Витторио (ИТ)
19. United States Patent 4,299,108. Cage-roll unit for metal pipe forming: Appl. No.: 72,844 Filed: Sep. 6, 1979 date of patent: Nov. 10, 1981 / Inventors: Masashi Kato; Hirozo Obata; Minoru Hirata, all of Kitakyushu, Hitoshi Matsukuma; Kunio Ishikawa, both of Hikari; Junichi Tanaka, Kitakyushu. Assignee: Nippon Steel Corporation, Tokyo, Japan
20. United States Patent 6,212,925 B1. Method for roll forming steel pipes, and equipment for same: Appl. No.: 09/296,411: (22) filed: apr. 23, 1999: date of patent: apr. 10, 2001 / Inventors: Feizhou Wang, Nishinomiya; Atsumu Okamoto, Kawanishi; Assignee: Nakata Manufacturing Co., Ltd.
21. United States Patent 5,673,579. Welded steel pipe manufacturing apparatus and method: Appl. No.: 662,434 Filed: Jun. 10, 1996. date of patent: Oct. 7, 1997 / Inventors: Yuuji Hashimoto, Takaaki Toyooka, Motoaki Itadani, Susumu Itadani, Tsutomu de... all of Aichi, Japan. Assignees: Kawasaki Steel Corporation; Kusakabe Electric & Machinery Co., Ltd., both of Japan
22. European patent application 0 607 430 A1. Apparatus for manufacturing welded steel pipe and method of operating thereof. Appl. No.: 90917533.3 Filed: Jun. 04.12.90. date of patent: 27.07.94 / Inventors: KAWASAKI STEEL CORPORATION No. 1-28, 1-Chome Kitahonmachi-Dori Chuo-Ku, Kobe-City Hyogo 651 (JP) © Inventor: TOYOOKA, T. Kawasaki Steel Corporation Technical Research Division 1, Kawasakicho Chiba-shi Chiba 260(JP); HASHIMOTO, Y. Kawasaki Steel Corp. Technical.
23. А.Н. Медведев, И.В. Кузнецов, И.И. Казакевич, М.С. Овчаров, А.Н. Куличенко, В.А. Коршунов, А.Х. Волков, Б.И. Горохов. Комплексное исследование трубоэлектросварочного агрегата 159-529 Новомосковского металлургического завода // Совершенствование производства труб высокочастотной сваркой. Сборник статей. 1972. С.85-98

24. Л.И. Зильберштейн, В.Б. Фурманов. Определение тянущих усилий и коэффициента полезного действия процесса непрерывной валковой формовки полосы // Производство труб. Москва. Металлургия. 1969 №22, С. 103-111.
25. Матвеев Ю.М. Теоретические основы производства сварных труб. М.: Металлургия, 1967, 168с.
26. Производство сварных труб : [Учеб. пособие для подгот. рабочих на пр-ве] / В. М. Друян, В. Ф. Балакин. - М. : Металлургия, 1981. - 184 с
27. Жуковский Б.Д., Мизера В. И. Анализ кинематики процесса непрерывной формовки полосы в приводных валах трубоформовочного стана // Производство труб. Сб. статей ВНИТИ. 1969 №21, С. 83-91.
28. Жуковский Б.Д., Мизера В.И. Исследование кинематики процесса формовки полос различной ширины в открытом калибре формовочного стана. В кн.: Производство труб, № 22, 1969, с. 111 – 120.
29. Пашков Н.Г. Разработка эффективных способов формоизменения прямошовных электросварных труб нефтяного сортамента в линии труботрубоэлектросварочного агрегата : диссертация ... кандидата технических наук : 05.16.05. - Москва, 2007. - 164 с.
30. В.Н. Данченко А.П. Коликов, Б.А. Романцев, С.В. Самусев Технология трубного производства. Москва: Интернет инжиниринг, 2002. 640 с.
31. Матвеев Ю.М. Пластический изгиб полосы в непрерывных трубоформовочных станах. В кн.: Производство сварных и бесшовных труб, М., 1964, с. 19-24.
32. Старшинов А.В., Цыкалов В.Ф., Сюкрин А.Я. Экспериментальное определение площади контакта формуемой трубной заготовки с рабочим инструментом // Сб. «Теория и технология ОМД», №143, 1982 сс. 42-45.
33. Самусев С.В. Повышение эффективности производства сварных труб на основе развития теории непрерывного формоизменения и создания способов и устройств компактных станков ТЭСА: Дисс. док. техн. наук. Москва. 2000. 377с.
34. Коликов А.П., Романченко В.П., Самусев С.В., Шейх-Али А.Д., Фроловичин В.В. Машины и агрегаты трубного производства. МИСиС. Москва, 1998. 541 с
35. Abeyrathna, V., Rolfe, V., Hodgson, P. et al. Local deformation in roll forming. *Int J Adv Manuf Technol* 88, 2405–2415 (2017)
36. Самусев С.В., Фортунатов А.Н., Пашков Н.Г., Фролова Н.А., Методы расчета калибровок инструмента и энергосиловых параметров процесса производства сварных труб в линии прессов и ТЭСА. Сборник задач – ВФ МИСИС, 2006 – 155 с.
37. Свид. 2020661357 Российская Федерация. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Определение геометрических параметров трубной заготовки в

клетях формовочного ТЭСА для труб малых и средних диаметров с учетом сортамента труб / С.В. Самусев, В.А. Фадеев, А.В. Кондрушин, Т.Ю. Сидорова; заявитель и правообладатель ФГАОУВО «НИТУ «МИСиС». – 2020660514; заявлена 15.09.2020; опубл. 22.09.2020, Бюл. № 10

38. Фомичев И.А., Шошин В.А. Производство труб: Науч. тр./УкрНИТИ. М.: Металлургиздат, 1962. Сб. №6, с.102-110.

39. Рымов В.А., Старшинов А.В., Александрович А.И. Влияние инструмента формовочного стана на деформированное состояние полосы. Изв. вузов, Черная металлургия, 1982, № 11, с. 64 – 67.

40. Шошин В.А. Исследование процесса непрерывногогиба заготовки при изготовлении прямошовных электросварных труб. Автореф. Дис.канд. техн. наук. Днепропетровск, 1967, -22с.

41. Полухин П.И., Карпов С.П., Рымов В.А. Продольные напряжения и деформации в металле при непрерывной валковой формовке // Изв. ВУЗов, Черная металлургия, 1963, №3, с.77-84.

42. Самусев С.В., Фадеев В.А. Анализ параметров очагов сворачивания полосы в линии формовочного стана ТЭСА 30-50 // Кузнечно-штамповочное производство. обработка материалов давлением. 2019. № 3. С. 14-18.

43. Матвеев Ю.М., Халамез Е.М., Зеленый Н.И. Энергосиловые параметры непрерывных трубоформовочных станов. Челябинск: Кн. изд-во, 1969, 108 с.

44. Матвеев Ю.М., Халамез Е.М., Зеленый Н.И., Пичурин И.Н. Производство сварных и бесшовных труб: Науч. тр./УралНИТИ. М.: Металлургия, 1969, №10, с.12-24.

45. Технология производства электросварных труб/ Матвеев Ю.М., Ружинский М.Б., Ромашов А.А., Халамез Е.М. М.: Металлургия, 1967, 123 с.

46. Халамез Е.М. Производство сварных и бесшовных труб: Науч. тр./УралНИТИ. М.: Металлургия, 1968, №8, с.16-23.

47. Халамез Е.М.. Исследование энергосиловых параметров непрерывных трубоформовочных станов : диссертация ... кандидата технических наук : 05.00.00. - Челябинск, 1966. - 140 с.

48. Производство сварных и бесшовных труб / Матвеев Ю.М., Халамез Е.М., Зеленый Н.И. [и др.] // Науч. тр. УралНИТИ. Москва. Металлургия. 1969. №10. С. 12-24.

49. Samusev S.V., Fadeev V.A. Modeling of longitudinal welded pipe forming in open rolling pass unit of electric weld pipe mill. Izvestiya. Ferrous Metallurgy. 2019;62(7):531-538.

50. Самусев С.В., Алещенко А.С., Фадеев В.А. «Моделирование процесса непрерывной формовки сварных прямошовных труб на базе «ТРЕНАЖЕРА–ТЭСА 10-50». Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2018;61(5):378-384
51. Sun, B.-F., Jin, Y.-H. Simulation analysis of shaping process of high frequency longitudinal electric resistance welded pipe. Journal of China University of Petroleum. // 2010. No. 34 (4). P. 123-126
52. Cheng, J., Cao, J., Zhao, J., Liu, J., Zhao, R., Liu, S. The flower pattern and rolls design for ERW pipes with the different specification in the flexible roll forming process // Thin-Walled Structures. September 2020, Vol.154, № 106809.
53. Хлыбов О.С., Новокшенов Д.Н., Соколова О.В., Лепестов А.Е. Моделирование процессов валковой формовки труб АО «Выксунский металлургический завод» // Сталь. 2015. № 5. С. 67-70.
54. Акопян К.Э. , Колобов А.В., Селезнев М.С., Трусов В.С., Федотов Е.С., Юсупов В.С., Родичев Д.А. Математическое моделирование профилирования круглой сварной стальной трубы в квадратный профиль в четырехвалковых калибрах // Металлы. - 2012. - № 3. - С. 25-30.
55. Акопян К.Э., Юсупов В.С., Колобов А.В., Васенин А.Г., Тюляпин А.Н. Математическое моделирование процесса профилирования труб в неприводных валках // Машины, технологии, материалы. - 2007. - № 2. - С.119-120.
56. Шелест А.Е., Акопян К.Э., Юсупов В.С., Перкас М.М. Моделирование процесса непрерывного холодного безоправочного редуцирования электросварных труб в калибрах // Производство проката. – 2014. - № 9. - С. 21-27.
57. Новокшенов Д.Н., Соколова О.В., Лепестов А.Е. Оптимизация схемы формоизменения трубной заготовки путем моделирования // Сталь. 2016. №2 7. С. 53-56.
58. Hong, S.M., Kim, D.S., Yoon, H.J., Kim, N., 2000. Development of roll forming simulation program. In: Transactions of the Korean Society of CAD/CAM Engineers Annual Meeting, pp. 417-423.
59. Han, Z.-W., Liu, C., Lu, W.-P. etc. Experimental investigation and theoretical analysis of roll forming of electrical resistance welded pipes // Journal of Materials Processing Technology. 2004. No.145 (3). P. 311-316."
60. <http://fablab.moscow> (дата обращения: 10.05.2021)
61. Полухин П.И., Рымов В.А. Упругий контакт металла с инструментом в открытых клетях трубоформовочных станков. Изв. Вузов, Черная металлургия, 1969, №1, с.23-25.
62. Рымов В.А., Горбунов В.В., Осинский Г.И. Новый процесс ведения формовки и сварки труб. Сб. «Теория и технология ОМД», №12 9, 1980.

63. Рымов В.А., Самусев С.В. Потапов И.Н. и др. Унификация технологического инструмента трубозлектросварочных агрегатов Московского трубного завода. Ж. «Сталь», №2, 1981.
64. Самусев С.В., Пашков Н.Г., Зелова Л.В., Соловьев Д.М. Разработка эффективных режимов калибровки прямошовных сварных труб малого и среднего диаметра. Известия ВУ-Зов. Черная металлургия, № 9, 2006.
65. Горбунов В.В. Исследование процесса непрерывного формообразования трубной заготовки и разработка новых схем формовки для производства прямошовных электросварных труб: Дисс. канд. техн. наук. Москва.1978. 171с.
66. Производство и применение гнутых профилей проката: Справочник/Под ред. Тришевского И.С. М.: Металлургия, 1975. 534с.
67. Шкабатур К.И., Мизера Р.И., Жуковский Б.Д., Бураковский В.Н. Методика расчета длины контакта кромок трубной заготовки с поверхностью валков при непрерывном процессе формовки // Производство сварных труб. №2, Москва, Металлургия, 1973, С. 16-21
68. <http://totpmisis.ru> (дата обращения: 10.05.2021)
69. Samusev S.V., Fadeev V.A. Study of the contact interaction of a strip with work rolls during continuous scelping of welded pipes in a TESA line // Chernye Metally. Vol. 2020. Is. 2, P.41 – 46.
70. Samusev S.V., Fadeev V.A. Improvement of method for estimation of parameters of contact interaction of billet with roll tool in lines of continuous electric pipe-welded mills // Chernye Metally. 2021 Vol. 2021. Is 4. P.14 – 19.
71. Свид. 2021661483 Российская Федерация. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Расчет контактной площади поверхности трубной заготовки с валковым инструментом с применением фактора формы при формоизменении прямошовных электросварных труб/ С.В. Самусев, В.А. Фадеев, А.С. Будников, Г.И. Салиба; заявитель и правообладатель ФГАОУВО «НИТУ «МИСиС». – 2021660474; заявлена 02.07.2021; опубл. 12.07.2021, Бюл. № 7
72. Юсупов В.С., Колобов А.В., Акопян К.Э., Селезнев М.С., Соминин М.А. Совершенствование технологии производства электросварных прямошовных труб (сообщение 2) //Сталь. 2015. № 12. С. 39-41.
73. Потапов И.Н., Коликов А.П., Данченко В. Н. и др. Технология производства труб. М.: Металлургия, 1994, 528 с.
74. Полухин П.И., Рымов В.А. Старшинов А.В. Деформированное состояние полосы в зависимости от кинематических условий непрерывного формообразования трубной заготовки.

– В кн. Теория и технология обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1982/ Науч. тр. МИСиС, № 142, с. 5-8.

75. Барабанцев Г.Е., Тюляпин А.Н., Дозорцев Ю.К., Колобов А.В., Трайно А.И., Юсупов В.С. Способ изготовления электросварных прямошовных труб // Патент РФ № 2240882. Бюл. - № 33. – 4 с.

76. Самусев С.В., Захаров Д.В., Пашков Н.Г., Иванова Е.Ю., Терентьев В.В., Методика определения геометрических параметров очага сворачивания при непрерывной формовке заготовки для получения труб малого и среднего диаметра. Изв. ВУЗов ЧМ, 2006, № 2.

77. Самусев С.В., Пашков Н.Г., Зелова Л.В., Фортунатов А.Н. Разработка калибровки технологического инструмента, обеспечивающего идентичные усилия в приводных клетях формовочного стана ТЭСА. Известия ВУЗов. Черная металлургия, № 11, 2006.

Приложение 1



ООО «НТС-Лидер»
 тел./факс: +7 (495) 317-55-55
 141407, РФ, Московская область,
 г. Химки, Нагорное шоссе, д. 4, пом. 202
 e-mail: info@nts-leader.ru
 www.nts-leader.ru

АКТ

о промышленной применимости результатов диссертационной работы В.А. Фадеева на тему: «Совершенствование процесса непрерывной валковой формовки на основе исследования контактных условий трубной заготовки с инструментом»

В 2019 ООО «НТС-Лидер» и НИТУ «МИСиС» заключили договор (№24х-19 от 22.03.2019) на выполнение научно-исследовательской работы (НИР) по теме: «Разработка технологии производства сварных прямошовных труб в линии «ТЭСА 219 – 406» с расчетом и анализом основных технических параметров процесса формоизменения трубной заготовки».

В рамках НИР выполнен комплекс работ по исследованию процесса формоизменения трубной заготовки в условиях, монтажа основного оборудования трубоэлектросварочного агрегата ТЭСА 219-406. Для двух компоновок формовочного стана выполнен анализ напряженно-деформированного состояния трубной заготовки (ТЗ), определены энергосиловые параметры процесса. Оценка процесса формовки всего диапазона электросварных труб ТЭСА 219-406 по энергосиловым параметрам показала, что значения усилий сопротивления тянущих и вертикальных усилий по всем деформационным клетям обеспечат качественную и устойчивую формовку ТЗ по всем клетям формовочного стана, при условии освоения пусковой технологии, установки режимов настройки и производства. Для освоения производства и дальнейшего улучшения качества продукции необходимо освоить и внедрить методику регулирования тянущих усилий и применение валкового инструмента с отдельными валками для конкретного сортамента труб.

Изложенные в диссертационной работе В.А. Фадеева методика расчета тянущих усилий процесса формовки, с учетом конфигурации контактных поверхностей ТЗ с валковым инструментом представляют практический интерес для ООО «НТС-Лидер». Предложенные варианты исполнения валкового-роликового инструмента, удачно вписываются в действующую компоновку ТЭСА и позволяют оптимизировать тянущие усилия формовочного стана и повысить качество труб в линии ТЭСА 219-406.

Директор
 Дирекции по общему управлению бизнесом
 ООО «НТС-Лидер»



Е.О. Калинин



Сертификат № СДС.ТЛ.СМ.14690-20 на соответствие
 ГОСТ Р ИСО 9001-2015 (ISO 9001:2015); ГОСТ Р ИСО 14001-2016 (ISO 14001:2015); ГОСТ Р 54934-2012 (OHSAS 18001:2007)

Приложение 2

УТВЕРЖДАЮ



Проректор по образованию

А.А. Волков

2021 г.

АКТ

**о внедрении результатов диссертационной работы Фадеева В.А.
в учебный процесс на кафедре ОМД НИТУ «МИСиС»**

Настоящий акт подтверждает использование в учебном процессе результатов диссертационной работы Фадеева В.А. на тему «Совершенствование процесса непрерывной валковой формовки на основе исследования контактных условий трубной заготовки с инструментом», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Изложенные в диссертационной работе методика расчета и оценки параметров контактного взаимодействия полосы с валковым инструментом, позволяющая определять границы входного и выходного контакта различной формы, с применением фактора формы, и методика расчета баланса тянущих и тормозящих усилий при процессе непрерывной формовки полосы с учетом контактных и кинематических параметров, позволяющая определять схему калибров с уравновешенными тянущими усилиями полосы по всем клетям формовочного стана, использованы в учебном процессе на кафедре «Обработки металлов давлением» при подготовке бакалавров и магистров по направлениям «Металлургия» и «Технологические машины и оборудования».

Заведующий каф. ОМД

А.С. Алещенко