

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

ФАДЕЕВ Виктор Александрович

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

Специальность 05.16.05 – Обработка металлов давлением

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: д.т.н., профессор С.В. Самусев

Москва 2021

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 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 трубной заготовкой, 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

уравновешивания 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 исследования 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 трубозлектросварочных 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 процессе 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 рассчитать 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 (ICMTMTE 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введение представлена и обоснована актуальность научно-квалификационной работы, поставлена цель и определены задачи для ее достижения, сформулированы научная новизна и практическая значимость.

В первой главе представлен аналитический обзор научно-технической литературы по теории и технологии непрерывной валковой формовки при изготовлении прямошовных электросварных труб малого и среднего диаметра.

Рассмотрены схемы формоизменения трубной заготовки в процессе непрерывной валковой формовки электросварных труб. Представлены экспериментальные результаты по замерам зон контакта формируемой полосы с традиционным инструментом, на основании которых в качестве формовочного инструмента предложены формирующие ролики, установленные в зонах активной формовки полосы в трубную заготовку.

В условиях контактного взаимодействия трубной заготовки с валковым

инструмент по всей линии формовочного стана одним из основных параметров является определение баланса между тянущими и тормозящими усилиями.

Для обеспечения качественной и устойчивой формовки электросварных прямошовных труб малых и средних диаметров важное значение имеет определение энергосиловых и кинематических параметров, которые определяются на контактных поверхностях трубной заготовки с валковым инструментом.

Анализ методик экспериментальных исследований контактных поверхностей показал, что при фиксировании контактных отпечатков на трубной заготовке использовали бумагу, графитовый порошок, который наносили на валки. Такой метод получения контактных отпечатков может повлиять на результат, так как контакт полосы с валками был определен через графитовый порошок и бумагу.

Анализ методик расчета границы и площади контактной поверхности показал, что в основном методики базируются на замене криволинейной (нелинейной) границы контактной поверхности хордами. Данное упрощение расчета приводит к определенным погрешностям при определении границ и площади контактной поверхности и соответственно, к неточностям вычисления энергосиловых параметров формоизменения полосы в процессах реальной формовки на действующих ТЭСА.

Поэтому актуальным является проведение физических экспериментов определения контактных поверхностей ТЗ с валками, разработка методик расчета контактных площадей и методик расчета баланса тянущих и тормозящих усилий процесса непрерывной валковой формовки трубной заготовки с учетом конфигурации контактных поверхностей.

Во второй главе рассчитаны параметры профиля трубной заготовки для трубы типоразмера $D_T \times S_T = 50 \times 1,5$ мм по трём типам калибровок: однорадиусной, двухрадиусной с постоянными периферийными участками и двухрадиусной с переменными периферийными участками. Определены геометрические параметры формоизменения очагов сворачивания трубной

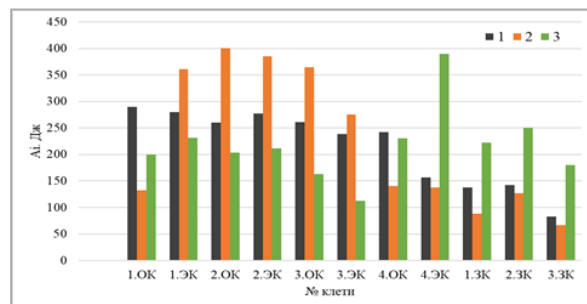
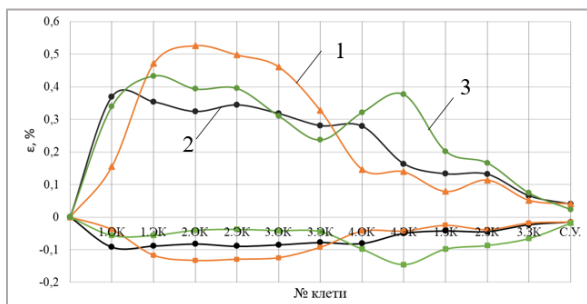
заготовки в условиях формовочного стана ТЭСА 30-50. Рассчитано деформированное состояние и работа деформации формоизменения трубной заготовки.

Результаты расчета деформированного состояния ТЗ для трех типов калибровок – рисунок 1а показали, что поля продольных деформаций, ограничиваемые волокнами на кромке при однорадиусной схеме сворачивания максимальное значение, растягивающих продольных деформаций достигается на кромке в первой формовочной клетки ($\varepsilon_{33}=0,37\%$) далее деформация постепенно уменьшаются. Максимальное значение сжимающих продольных деформаций находящаяся по дну ТЗ, достигается в первой формовочной клетки ($\varepsilon_{33}=0,09\%$) 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 ($\varepsilon_{33}=0,52\%$) далее деформация постепенно уменьшаются. Максимальное значение сжимающих продольных деформаций находящаяся по дну ТЗ, достигается во второй формовочной и второй эджерной клетки ($\varepsilon_{33}=0,13\%$) далее деформация постепенно уменьшаются.

При двухрадиусной схеме сворачивания с переменными периферийными участками максимальное значение растягивающих продольных деформаций достигается во второй формовочной клетки ($\varepsilon_{33}=0,38\%$) далее деформация постепенно уменьшаются. Максимальное значение сжимающих продольных деформаций находящаяся по дну ТЗ, достигается во четвертой эджерной клетки ($\varepsilon_{33}=0,15\%$).

График работы деформациигиба формуемой трубной заготовки рисунок – 1б показывает, что все три калибровки не соответствуют равномерному минимуму работы деформациигиба трубной заготовки от клетки к клетке, что может привести к уменьшению устойчивости процесса формоизменения трубной заготовки.

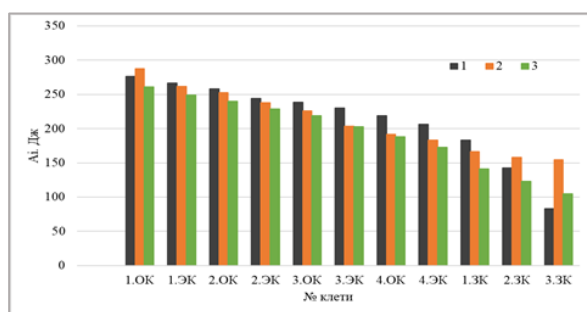
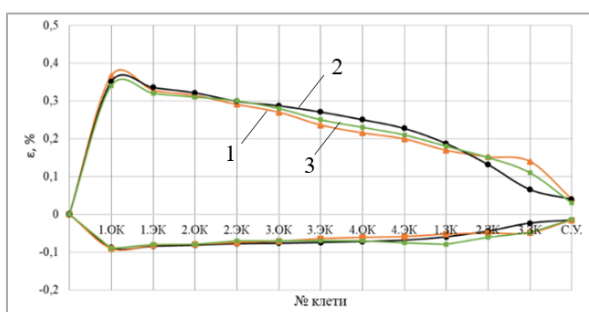


а б

Рисунок 1 – Деформированное состояние (а) и работа деформации гиба (б) трубной заготовки до корректировки углов сворачивания ТЗ:

1– однорадиусная калибровка; 2– двухрадиусная калибровка с постоянными периферийными участками; 3– двухрадиусная калибровка с переменными периферийными участками

Для того чтобы добиться минимальной работы гиба ТЗ от клетки к клетке необходимо изменить параметры калибровок путем корректировки величин углов сворачивания ТЗ. Углы сворачивания подбирали, таким образом, чтобы на участке открытых клеток работа деформации гиба уменьшалась равномерно. Результаты расчета деформированного состояния и работы деформации гиба ТЗ с учетом корректировки углов сворачивания представлены на рисунке 2.



а б

Рисунок 2 – Деформированное состояние (а) и работа деформации гиба (б) трубной заготовки после корректировки углов сворачивания ТЗ: 1– однорадиусная калибровка; 2– двухрадиусная калибровка с постоянными периферийными участками; 3– двухрадиусная калибровка с переменными периферийными участками

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

В третье главе представлены результаты экспериментального фиксирования контактных отпечатков, на которых исследовались контактные поверхности ТЗ с валками. Представлена и применена методика прямого экспериментального определения геометрических параметров контактных поверхностей трубной заготовки с валковым инструментом. Для повышенной точности измерения длин контакта трубной заготовки по ребрам валков спроектирована и изготовлена индивидуальная измерительная оснастка (шаблон-транспортиры).

Контактные отпечатки получали для трубы размером 50x1,5 мм из стали 09Г2С класса прочности К52 в условиях научно-производственного центра кафедры ОМД НИТУ «МИСиС» на лабораторном стане ТЭСА 30-50. 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.

Результаты измерения параметров контактных отпечатков представлены в таблице №1.

Таблица №1 – Параметры входных контактных отпечатков полосы

№	Верхний валок			Нижний валок		
	$b/2$, мм	$L_{вд}^i$, мм	$L_{вр}^i$, мм	$b/2$, мм	$L_{нд}^i$, мм	$L_{нр}^i$, мм
1.ОК	80,5	2,6	1,5	80,5	3,0	23,6
2.ОК	80,5	3,0	1,6	80,5	3,0	26,7
3.ОК	50,1	3,6	2,4	72,3	3,0	29,5
4.ОК	21,7	4,0	2,0	52,1	3,0	29,9
1.ЗК	48,6	3,0	23,25	32,6	5,0	22,98
2.ЗК	44,4	3,0	21,87	35,8	4,0	22,25
3.ЗК	43,7	3,0	20,51	38,8	4,0	21,33

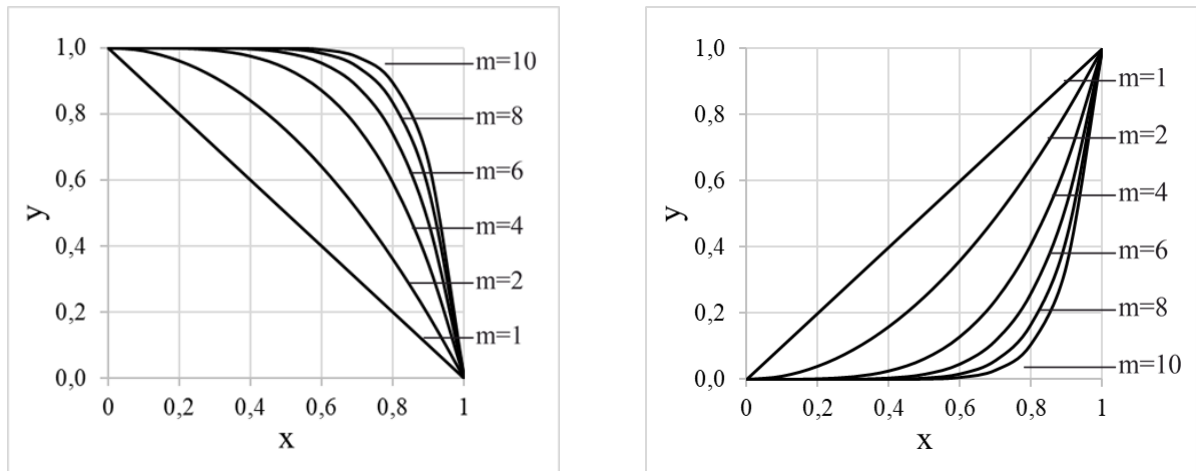
Примечание: 1.ОК; 2.ОК; 3.ОК; 4.ОК – первый, второй, третий, четвертый открытые калибры; 1.ЗК; 2.ЗК; 3.ЗК – первый, второй, третий закрытые калибры; $b/2$ – половина ширины контактного отпечатка; $L_{вд}^i$ – длина контакта ТЗ по дну верхнего валка; $L_{вр}^i$ – длина контакта ТЗ по реборде верхнего валка; $L_{нд}^i$ – длина контакта ТЗ по дну нижнего валка; $L_{нр}^i$ – длина контакта ТЗ по реборде нижнего валка.

В четвертой главе представлена методика расчета контактных площадей ТЗ с нижними и верхними валками по все линии формовочного стана. Представлена методика расчета баланса тянущих и тормозящих усилий процесса непрерывной валковой формовки трубной заготовки с учетом конфигурации контактных поверхностей

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 функции при показателе степени (m). Аналитическое описание входных границ контактных поверхностей полосы с валками представлено на рисунке 3.

Внутренние контактные поверхности полосы с верхними валками могут быть аппроксимированы с применением убывающей степенной функции – рисунок 3а. Наружные контактные поверхности полосы с нижними валками

могут быть аппроксимированы с применением возрастающей степенной функции – рисунок 3б.



а

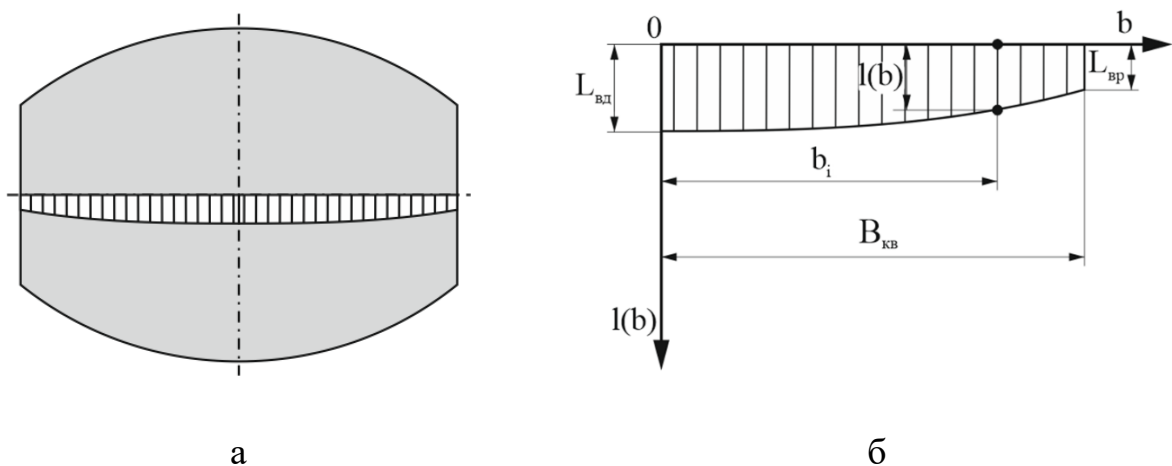
б

а – для внутренних; б – для наружных

Рисунок 3 – Аналитическое описание входных границ контактных поверхностей полосы с валками

Методика определения параметров внутренней контактной поверхности ТЗ с применением фактора формы.

На рисунке 4 представлена контактная поверхность и схема к определению границ контактной поверхности с полосы с верхним валком.



а

б

Рисунок 4 – 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:

$$l(b) = L - A \left(\frac{b}{C} \right)^m. \quad (1)$$

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:

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

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:

$$\sum_{i=1}^N \Delta_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{(l_i - l_i^{\text{эксп}})^2}. \quad (3)$$

Расчет полной площади контактной поверхности трубной заготовки с верхним валком определяется:

$$F_{\text{в}}(B_{\text{кв}}) = \left(L_{\text{вд}} - \frac{L_{\text{вд}} - L_{\text{вр}}}{m + 1} \right) \cdot B_{\text{кв}}, \quad (4)$$

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 нижнего контактной поверхности:

$$F_{\text{в}}(b_i) = L_{\text{вд}} - \left(\frac{L_{\text{вд}} - L_{\text{вр}}}{m + 1} \right) \cdot \left(\frac{b_1}{B_{\text{кв}}} \right)^m. \quad (5)$$

Методика определения параметров наружной контактной поверхности ТЗ с применением фактора формы.

На рисунке 5 представлена контактная поверхность и схема к определению границ контактной поверхности с полосы с нижним валком.

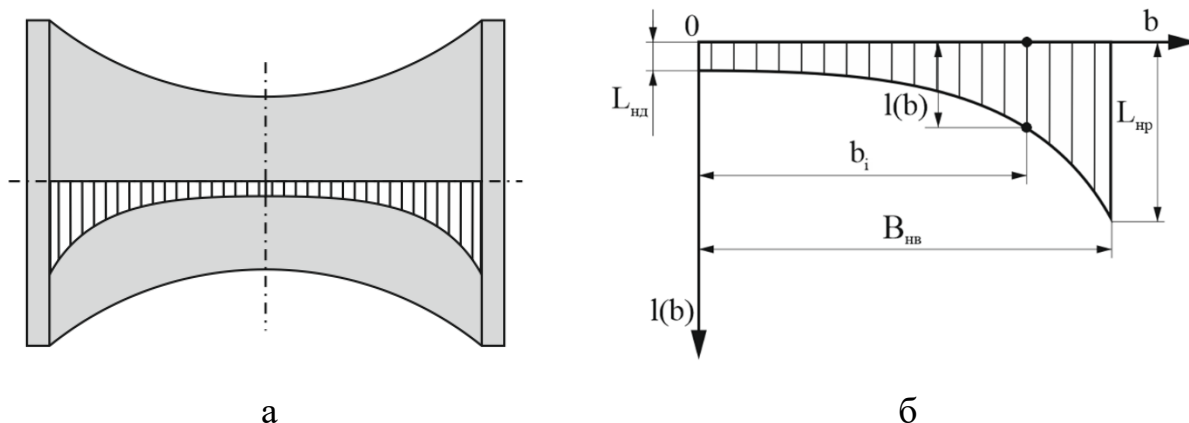


Рисунок 5 – Контактная поверхность (а) и схема к определению границ контактной поверхности полосы (б) с нижним валком (представлена 1/2 контактной поверхности)

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

$$l(b) = A \left(\frac{b}{C} \right)^m + L. \quad (6)$$

Расчет полной площади контактной поверхности трубной заготовки с нижним валком определяется:

$$F_H(B_{KH}) = \left[\left(\frac{L_{Hr} + L_{Hd}}{m + 1} \right) + L_{Hd} \right] \cdot B_{KH}, \quad (7)$$

где B_{KH} – ширина нижней контактной поверхности; L_{Hr} – 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 определяется:

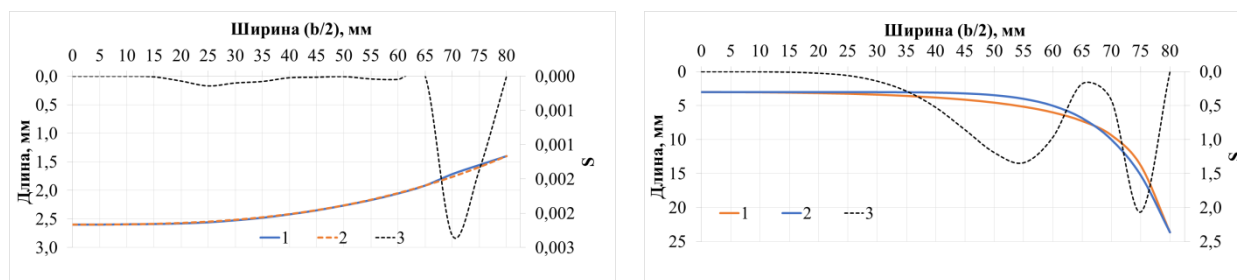
$$F_H(b_i) = \left[\left(\frac{L_{HP} + L_{HD}}{m + 1} \right) \cdot \left(\frac{b_i}{B_{KH}} \right)^m + L_{HD} \right] \cdot b_i. \quad (8)$$

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 2.

Таблица 2 – 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 6 представлены контактные поверхности полосы с нижним и верхним валками для первой формовочной клетки (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

б

а – с нижним валком 1.ОК; б – с верхним валком 1.ОК

Рисунок 6 – Контактные поверхности полосы в открытом калибре:

1 – полученные в результате эксперимента; 2 – полученные по методике;

3 – среднеквадратичное отклонение

На устойчивое формоизменение ТЗ влияют геометрические параметры деформирующего инструмента, режимы работы оборудования, энергосиловые и кинематические параметры процесса, которые определяются в зависимости от типа размера трубы. Для достижения этого условия требуется установления взаимосвязей, основой, которой является контактное взаимодействие ТЗ с деформационным инструментом с определёнными кинематическими параметрами. Поэтому разработана методика для определения и регулирования энергосиловых параметров процесса формовки, с помощью которой возможно выбирать режимы, при которых формоизменения будет, проходит стабильно и устойчиво.

Тянущее усилие валков определяется следующим образом:

– для верхнего валка:

$$T_{\text{в}} = \frac{P_i}{F_{\text{п}}^{\text{в}}} \cdot (F_{\text{от}}^{\text{в}} - F_{\text{оп}}^{\text{в}}) \cdot f - \tau_{\text{п}} \cdot \left(\frac{S_{\text{т}}}{2R_i} - \frac{S_{\text{т}}}{2R_{(i-1)}} \right) \cdot B_{\text{к}} \cdot \frac{S_{\text{т}}}{2}, \quad (9)$$

– для нижнего валка:

$$T_{\text{н}} = \frac{P_i}{F_{\text{п}}^{\text{н}}} \cdot (F_{\text{от}}^{\text{н}} - F_{\text{оп}}^{\text{н}}) \cdot f - \tau_{\text{п}} \cdot \left(\frac{S_{\text{т}}}{2R_i} - \frac{S_{\text{т}}}{2R_{(i-1)}} \right) \cdot B_{\text{к}} \cdot \frac{S_{\text{т}}}{2}, \quad (10)$$

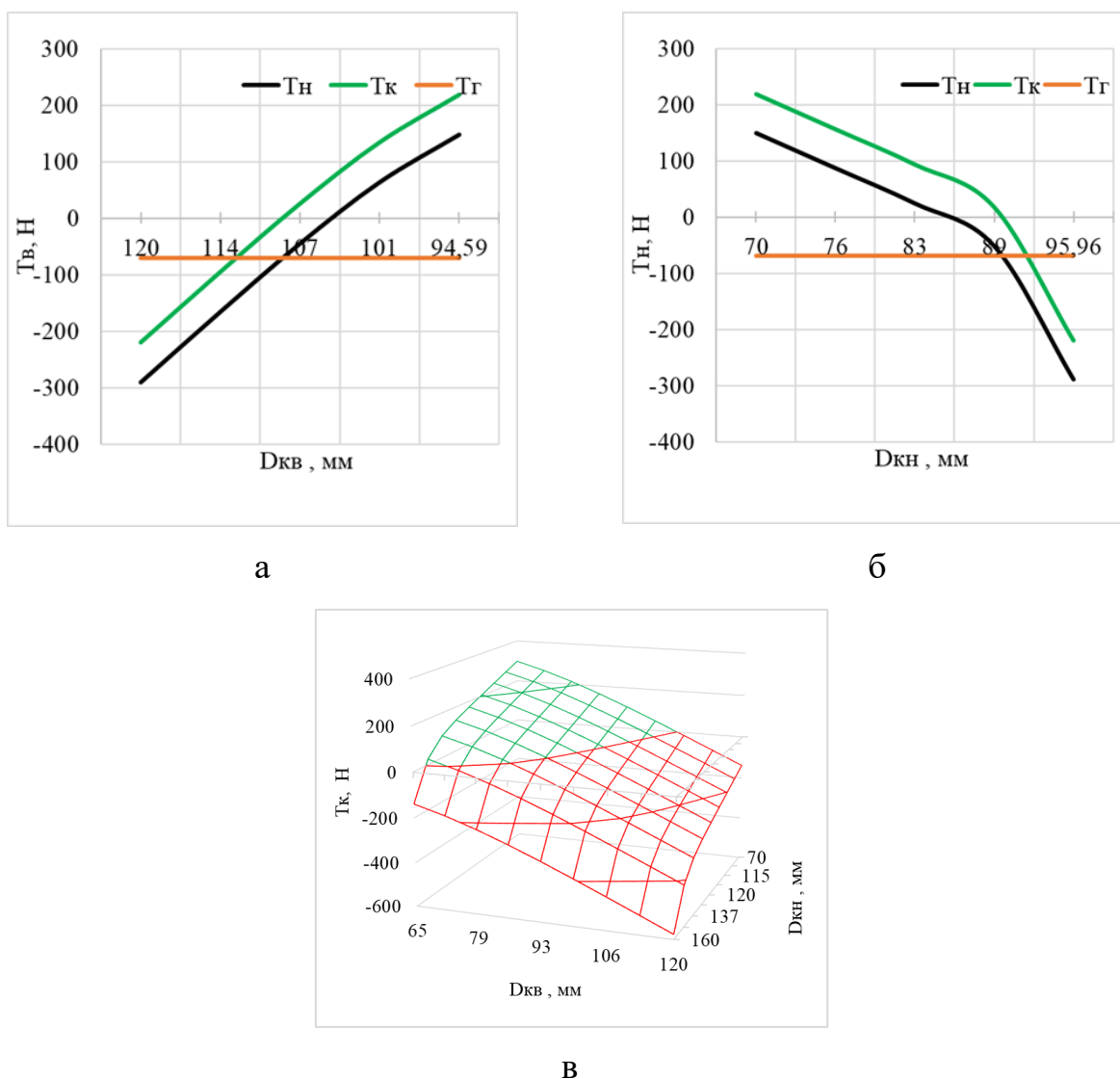
где P_i – усилие формовки в клети; $F_{\text{п}}^{\text{в}}$, $F_{\text{п}}^{\text{н}}$ – полные площади контактной поверхности полосы с верхним и нижними валками; $F_{\text{оп}}^{\text{в}}$, $F_{\text{от}}^{\text{в}}$ – площади контактной поверхности полосы с верхним валком в зоне опережения и отставания; $F_{\text{оп}}^{\text{н}}$, $F_{\text{от}}^{\text{н}}$ – площади контактной поверхности полосы с нижним валком в зоне опережения и отставания; f – коэффициент трения (0,08–0,12); $\tau_{\text{п}}$ – касательное напряжение на поверхности заготовки ($\tau_{\text{п}} = \sigma_{\text{т}}/\sqrt{3}$); $S_{\text{т}}$ – толщина стенки трубы; R_i – радиус формовки в клети; $R_{(i-1)}$ – радиус формовки в предыдущей клети; $B_{\text{к}}$ – ширина контакта площади полосы с валком.

Тянущие усилия калибра рассчитываются путем сложения тянущих усилий верхнего и нижнего валков.

Результаты расчетов по всем калибрам формовочного стана ТЭСА 30-50 представляются виде графиков и диаграмм распределения тянущих усилий

соответственно для каждого валка и калибра в целом.

Графики и диаграмма распределения тянущих усилий по валкам и калибру для первой формовочной клетки представлены на рисунке 7.



а – для верхнего валка; б – для нижнего валка;
в – диаграмма распределения тянущих усилий калибра
Рисунок 7 – Тянущие усилия формоизменения полосы

В пятой главе представлен анализ распределения тянущих и тормозящих усилий и схемы валкового инструмента для ТЭСА 30-50. В условия ТЭСА 219-406 ООО «НТС-Лидер» для трубы типоразмером $D_t \times S_t = 406 \times 10$ проведен анализ распределения тянущих усилий и предложен многовалковый инструмент с уравновешенными тянущими усилиями.

На основе экспериментальных данных и разработанных методик расчета контактного взаимодействия и тянущих усилий процесса формоизменения, предложены схемы валкового инструмента, состоящие из нескольких деформирующих элементов.

В условия ТЭСА 219-406 ООО «НТС-Лидер» для трубы типоразмером $D_T \times S_T = 406 \times 10$ класса прочности K52 мм выполнена оценка деформированного состояния ТЗ и модернизирована базовая калибровка инструмента. Для модернизированной калибровки определены энергосиловые параметры по разработанным методикам и выполнен анализ качества продукции.

Радиусы и углы профиля трубной заготовки для базовой трубы $\varnothing 406 \times 10$ мм представлены в таблице 3.

Таблица 3 – 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.ЗК	2.ЗК	3.ЗК
R_c , 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
Γ_n , мм	203									
α , град.	45									

Для базовой трубы $\varnothing 406 \times 10$ мм рассчитаны продольные деформаций по всему очагу сворачивания.

Анализ результатов расчета деформированного состояния ТЗ для базовой трубы $\varnothing 406 \times 10$ мм 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) и кромке в третьей открытой клетки (3.ОК), составило на 0,041 ($\varepsilon_{зз} = 0,213\%$) и на 0,003 ($\varepsilon_{зз} = 0,175\%$). 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 - $R_{\text{ц}}$ изменены на $\varphi = 15,33^\circ$ и $R_{\text{ц}} = 3717,96$ мм, а в 3.ОК центральный угол - φ и радиус формовки ТЗ - $R_{\text{ц}}$ изменены на $\varphi = 88,78^\circ$ и $R_{\text{ц}} = 641,99$ мм. В результате чего удалось снизить значения продольных деформаций на кромке в 1.ОК до $\varepsilon_{\text{зз}} = 0,168 \%$ и в 3.ОК до $\varepsilon_{\text{зз}} = 0,163 \%$ 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 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 4.

Таблица 4 – Результаты расчета контактных площадей, катающих диаметров и тянущих усилий формоизменения трубной заготовки для базовой трубы $\varnothing 406 \times 10$ мм с традиционным двухвалковым 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
$F_{\text{в}}$, мм ²	26597	19343	24115	13014	36648	38678	40112
$D_{\text{в. кат}}$, мм	581,50	592,25	635,24	925,89	639,06	650,21	661,59
$T_{\text{в}}$, 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
$F_{\text{н}}$, мм ²	41400	44417	36714	33528	45195	43433	41927
$D_{\text{н. кат}}$, мм	455,7	480,57	525,67	611,25	639,06	650,21	661,59
$T_{\text{н}}$, 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 до 10 %. Таким образом, для уравновешивания тянущих усилий по клетям стана предложили калибры с 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.

Результаты расчета для базовой трубы $\varnothing 406 \times 10$ мм с многовалковым инструментом представлены в таблице 5.

Таблица 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.ЗК	2.ЗК	3.ЗК
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
$D_{v.кат}$, мм	611,15	645,25	670,91	968,78	639,06	650,21	661,59
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
$D_{n.кат}$, мм	441,4	475,41	511,99	599,12	639,06	650,21	661,59
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 ТЗ и обеспечивает высокое качество электросварных труб.

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 применять многовалковый инструмент. 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 условиях ТЭСА 219-406 ООО «НТС-Лидер» для трубы типоразмером $D_T \times S_T = 406 \times 10$ мм выполнена оценка напряженно - деформированного состояния ТЗ 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 получены данные для расчета многовалкового инструмента, предложены схемы калибров, с уменьшенной контактной площадью 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 публикаций по диссертационной работе

1. Самусев С.В., Фадеев В.А. Физическое моделирование процесса непрерывной формовки сварных прямошовных труб на участке открытых валковых калибров ТЭСА // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2019. Т. 62. № 7. С. 531-538.
2. Самусев С.В., Фадеев В.А. Исследование контактного взаимодействия полосы с рабочими валками при непрерывной формовке сварных труб в линии ТЭСА // Черные металлы. 2020. № 2. С. 41-46.
3. 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.
4. 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. Т. 61. № 5. С. 378-384.
5. Самусев С.В., Фадеев В.А., Сидорова Т.Ю. Разработка эффективных калибровок формовки листовой заготовки для производства прямошовных электросварных труб малого и среднего диаметров // Металлург. 2020. № 7. С. 55-59.
6. 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.
7. 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.

8. Самусев С.В., Фадеев В.А. Исследование многорадиусных схем сворачивания трубной заготовки при непрерывном формоизменении в валковых калибрах формовочного стана ТЭСА // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2020. № 3. С. 20-25.

9. Самусев С.В., Фадеев В.А., Сидорова Т.Ю. Анализ процесса формоизменения трубной заготовки в линии формовочного стана ТЭСА 30-50 // Сталь. 2020. № 8. С. 39-41.

10. Самусев С.В., Фадеев В.А. Оценка влияния величины подъема среднего волокна и кривизны трубной заготовки на качество формуемых труб на ТЭСА 30-50 // Производство проката. 2019. № 12. С. 19-22.

11. 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.

12. Самусев С.В., Фадеев В.А. Исследование процесса непрерывной формовки трубной заготовки в различных компоновках формовочного стана ТЭСА // Производство проката. 2019. № 5. С. 3-8.

13. Самусев С.В., Фадеев В.А. Конструкция трубоэлектросварочного агрегата 30-50 и определение кинематических и силовых параметров процесса формовки прямошовных сварных труб // Механическое оборудование металлургических заводов. 2019. № 1 (12). С. 81-88.