

На правах рукописи

**НОВОКШОНОВ ДМИТРИЙ НИКОЛАЕВИЧ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ  
ПРОЦЕССА ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ОСОБОТОНКОСТЕННЫХ ТРУБ  
В ЛИНИИ ТРУБОЭЛЕКТРОСВАРОЧНОГО АГРЕГАТА**

Специальность 2.5.7 Технологии и машины обработки давлением

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Москва – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: Соколова Ольга Вадимовна,  
кандидат технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВО «Московский государственный  
технический университет имени Н. Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)»,  
кафедра оборудования и технологии прокатки

Официальные оппоненты: Самусев Сергей Владимирович,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский  
технологический университет «МИСиС», кафедра  
обработки металлов давлением

Акопян Карен Эдуардович,  
кандидат технических наук,  
ФГБУН «Институт металлургии и материаловедения  
им. А. А. Байкова Российской академии наук»,  
лаборатория пластической деформации металлических  
материалов

Ведущая организация: ГНЦ ФГУП «Центральный научно-исследовательский  
институт черной металлургии им. И. П. Бардина»

Защита диссертации состоится 2022 года в часов минут  
на заседании диссертационного совета 24.2.331.01 при Московском  
государственном техническом университете им. Н. Э. Баумана по адресу: 105005,  
г. Москва, ул. 2-ая Бауманская, д. 5, стр. 1.

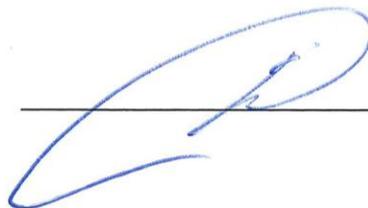
Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим  
выслать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н. Э. Баумана  
и на сайте [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru).

Телефон для справок: +7 (499) 267 09 63.

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

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат технических наук, доцент



Плохих А. И.

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Круглые и профильные тонкостенные электросварные прямошовные трубы нашли широкое применение в строительной индустрии, автомобилестроении, мебельной и других отраслях промышленности. Стремление конструкторов создавать еще более легкие и, одновременно прочные стальные сооружения и конструкции определяет перед металлургами задачу совершенствования технологии производства тонкостенных труб повышенной прочности. Возникает необходимость расширения размерного и марочного сортамента круглых труб малого и среднего диаметра (от 17 до 530 мм), а также труб квадратного и прямоугольного сечения (от 15×15 до 100×100 мм) из стальной ленты повышенной прочности.

В технологии производства труб на непрерывных трубоэлектросварочных агрегатах (ТЭСА) формовка трубной заготовки является основной операцией, определяющей конструкцию технологического оборудования и качество изготавливаемых труб. При переходе на новые марки стали и меньшую толщину исходной заготовки главной задачей технологов является разработка такой схемы формоизменения для данного ТЭСА, которая позволила бы получить необходимый профиль заготовки и, главное, обеспечить точность сведения (ориентации) кромок для последующей сварки. В значительной мере на это влияют механические характеристики заготовки, определяющие склонность к ее сужению.

Огромный вклад в развитие теории и технологии процесса непрерывной классической валковой формовки внесли известные советские и российские ученые П. Т. Емельяненко, А. И. Целиков, Ю. М. Матвеев, А. П. Чекмарев, Я. Л. Ваткин, Я. П. Осадчий, П. И. Полухин, Я. Е. Осада, Б. Д. Жуковский, Л. И. Зильберштейн, Е. М. Кричевский, Г. Я. Гун, В. А. Рымов, Ю. Ф. Шевакин, А. П. Коликов, С. В. Самусев и другие. Использование известных, хорошо зарекомендовавших себя научных достижений позволило осуществить надежное производство качественных труб с соотношением диаметра трубы к толщине стенки  $D/t \leq 50$  из стали нормальной прочности ( $\sigma_T$  от 225 до 285 МПа). Вместе с тем попытки применения известных рекомендаций при проектировании технологического процесса при освоении особотонкостенных труб с соотношением  $D/t > 50$  из стали повышенной прочности ( $\sigma_T$  от 285 до 440 МПа) приводят к снижению качества формовки трубной заготовки по геометрии поперечного профиля и точности сведения кромок.

В связи с изложенным, исследования, направленные на повышение качества валковой формовки трубной заготовки по геометрии поперечного профиля и точности сведения кромок для особотонкостенных труб с соотношением  $D/t > 50$  из стали повышенной прочности, являются актуальными.

**Объектом исследования** является процесс непрерывной валковой формовки электросварных прямошовных труб, **предметом** – напряженно-деформированное состояние трубной заготовки в процессе формоизменения.

**Цель** диссертационной работы состоит в повышении качества формовки трубной заготовки по геометрии ее поперечного профиля и точности сведения кромок в зоне сварки при производстве особотонкостенных труб из стали повышенной прочности.

Для достижения указанной цели поставлены и решены следующие **задачи**:

- анализ способов формовки трубной заготовки, применяемых на современных трубоформовочных станах различной конструкции;
- анализ напряженно-деформированного состояния полосы в процессе ее формоизменения в трубную заготовку и установление причин снижения качества формовки по геометрии профиля и точности сведения кромок;
- разработка методики расчета универсальной калибровки валков для производства широкого размерного ( $D/t$  от 6 до 70) и марочного ряда труб (из углеродистой и низколегированной стали с  $\sigma_T$  от 225 до 440 МПа);
- промышленная реализация результатов исследования.

Следующие результаты работы характеризуются **научной новизной**:

- впервые выявлено условие равномерности распределения продольных деформаций в тангенциальном направлении трубной заготовки в клетях предварительной формовки, исключающей необходимость относительного обжатия заготовки в закрытых калибрах клеток окончательной формовки при производстве труб с соотношением  $D/t$  от 6 до 70 из стали нормальной и повышенной прочности ( $\sigma_T$  от 225 до 440 МПа);
- разработан универсальный способ классической валковой формовки труб с соотношением  $D/t$  от 6 до 70 из стали нормальной и повышенной прочности ( $\sigma_T$  от 225 до 440 МПа), обеспечивающий минимальное распруживание заготовки в процессе ее сворачивания в клетях предварительной формовки;
- впервые установлены критические значения частного и суммарного обжатия трубной заготовки в закрытых калибрах клеток окончательной формовки стана точечной формовки, равные 0,9% и 1,3% соответственно. Превышение указанных значений приводит к большему пружинению поперечного профиля заготовки при производстве труб с соотношением  $D/t$  более 70 из стали повышенной прочности ( $\sigma_T$  от 285 до 440 МПа);
- впервые в технологии непрерывной классической валковой формовки труб реализован принцип шаговой формовки на всей ширине полосы, позволяющий за меньшее количество переходов обеспечить большую степень деформации поперечного изгиба трубной заготовки.

**Практическая значимость и реализация результатов работы** заключается в разработке и внедрении технологии производства прямошовных труб малого и среднего диаметра на Выксунском металлургическом заводе (АО «ВМЗ», Нижегородская область) Объединенной металлургической компании (АО «ОМК»). Подтвержденный экономический эффект от внедрения составил 117,61 млн руб.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Условие эффективности процесса непрерывной формовки трубной заготовки, выполнение которого обеспечивает необходимое качество формовки по геометрии поперечного профиля и точности сведения кромок в зоне сварки.

2. Схема формоизменения полосы в стане классической непрерывной валковой формовки, построенная на основе принципа шаговой формовки, обеспечивающего минимальное распруживание заготовки в группе клеток с открытым профилем калибра и исключение обжатия в группе клеток с закрытым профилем калибра.

3. Калибровка валков комбинированного типа, реализующая предлагаемую схему формоизменения, и универсальная методика ее расчета, упрощающая процесс разработки технологии формовки.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: XII Международном Конгрессе Прокатчиков, Выкса (Нижегородская область), 2019; ежегодных научно-практических конференциях молодых специалистов Объединенной металлургической компании им. С.З. Афонина, Выкса, 2017–2021; Международной научно-технической конференции «Динамика, надежность и долговечность механических и биомеханических систем», Севастополь, 2019; Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России», Москва, 2019; семинаре «Развитие трубной промышленности 2019» Международной трубной ассоциации (ИТА), Москва, 2019.

**Методы исследований и достоверность результатов.** Достоверность результатов и сделанных на их основе выводов обеспечивается: применением современных методов исследования, включающих численное моделирование процесса формоизменения трубной заготовки в специализированном программном комплексе, основанном на базе решателя MSC Marc, и обратное проектирование валково-роликового инструмента ТЭСА при помощи промышленных оптических и лазерных измерительных систем 3D-сканирования и фотограмметрии, используемых, в том числе, для валидации разработанных моделей; проведением статических испытаний на растяжение для оценки комплекса механических свойств металла рулонного проката и готовых труб; положительными результатами внедрения усовершенствованной технологии производства труб посредством проведения физических экспериментов на промышленных агрегатах и серийного производства товарной продукции.

**Личный вклад автора.** Автор непосредственно участвовал в постановке работы, формулировке задач, планировании, организации и проведении исследований, разработке методик и проведении экспериментов, обработке и обобщении данных, участвовал во внедрении результатов исследований.

**Публикации.** Основное содержание диссертации изложено в 13 научных работах общим объемом 1,55 п. л., в том числе: 8 статьях в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 3 статьях в журналах, индексируемых в Scopus, и 2 патентах Российской Федерации.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов и списка литературы из 133 наименований. Объем работы составляет 138 страниц, содержит 84 рисунка и 16 таблиц.

Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю к.т.н. О. В. Соколовой за всестороннюю помощь в выполнении и написании настоящей работы, особую благодарность сотрудникам Инженерно-технологического центра АО «ВМЗ» д.т.н. Л. И. Эфрону и А. И. Юдину за ценные замечания по содержанию диссертации, а также сотруднику Управления по технологии и качеству трубного производства АО «ВМЗ» А. А. Полозову за помощь в организации и проведении физических экспериментов.

## Основное содержание работы

**Во введении** обоснована актуальность выбранной темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, определены научная новизна и практическая значимость результатов.

**В Главе 1** рассмотрены этапы развития технологии и оборудования непрерывной валковой формовки труб в условиях регулярного ужесточения требований рынка к качеству производимой продукции, а также необходимости расширения размерного и марочного сортамента.

Все разнообразие типов конструкции формовочных станов, используемых в настоящее время трубными предприятиями России и мира, автором сведено к четырем основным, характеризующим каждый из этапов развития технологии непрерывной формовки: применение валково-роликовых калибров и роликовых проводок в станах классической валковой формовки (КФ), последующий переход к станам линейной формовки неприводными роликами (ЛФ), применение точечного изгиба в станах точечной («гибкой») валково-роликовой формовки (ТФ) и калиброванных штампов (подвижных фасонных проводок) в станах «орбитальной» формовки (ОФ; не рассматривается в диссертации ввиду несопоставимо малой производительности формовочной линии). Выделены преимущества и недостатки каждой технологии. Отмечено, что основные проблемы (см. Главу 3) процесса формовки на станах современной конструкции (ЛФ и ТФ) аналогичны проблемам, возникающим на станах традиционной конструкции (КФ), однако имеют различные способы устранения.

Установлено, что конструкция участка предварительной формовки станом современной конструкции характеризуется переходом от частичного либо полного охвата поперечного профиля заготовки валками, формирующими калибр клетки стана традиционной конструкции, к условно точечному контакту с роликовым либо штамповым инструментом, обеспечивающему необходимую степень деформации заготовки созданием изгибающего момента на интересующем участке ее профиля. В связи с тем, что параметры настройки роликового и штампового инструмента зависят от особенностей его конструкции и поведения трубной заготовки при свободном изгибе, дать их обобщенный расчет не представляется возможным, на основании чего сделан вывод о неприменимости аналитического подхода к определению профилировки и пространственного положения рабочего инструмента станом современной конструкции, подобно расчету калибровки валков станом традиционной конструкции. Таким образом, совершенствование существующих и разработка новых схем формоизменения трубной заготовки требует, наряду с физическим, проведения численного эксперимента.

Рассмотрен механизм деформации заготовки в локальном очаге стана традиционной конструкции, а также сформулированы преимущества и недостатки известных типов калибровки валков. Отмечено, что с расширением размерного и марочного сортамента продукции трубных промышленных предприятий снижается эффективность технических решений, заложенных в период 1960–1980 гг. советскими учеными в технологию классической валковой формовки.

Установлено, что при расширении сортамента в сторону уменьшения толщины стенки калибровка валков станом традиционной конструкции имеет первостепенное значение в обеспечении качества формовки по геометрии поперечного профиля и точности сведения кромок в зоне сварки, определяющих стабильность качества сварного соединения. При формовке тонкостенных ( $D/t$  от 20 до 50) и особотонкостенных труб ( $D/t > 50$ ), в том числе из стали повышенной прочности ( $\sigma_T$  от 285 до 440 МПа), на всех известных типах калибровки валков наблюдается значительное распруживание поперечного профиля трубной заготовки в зонах упругой разгрузки локальных очагов формовки, что приводит к потере устойчивости кромок вследствие неблагоприятного напряженно-деформированного состояния заготовки. Сопутствующая некачественная формовка (прямолинейные участки) профиля полосы компенсируется бóльшим относительным обжатием трубной заготовки в клетях окончательной формовки, что приводит к увеличению расходного коэффициента металла.

Выдвинута гипотеза, что обеспечением немонотонности распределения кривизны поперечного профиля полосы вдоль очага формовки возможно перераспределение напряжений по ее толщине и снижение величины распруживания трубной заготовки. Сделан вывод о необходимости более глубокого теоретического и экспериментального изучения механизма деформации особотонкостенной заготовки ( $D/t > 50$ ) из стали нормальной и повышенной прочности ( $\sigma_T$  до 440 МПа) и разработки нового типа калибровки валков с применением математического моделирования процесса формовки.

**В Главе 2** приведено описание методики определения напряженно-деформированного состояния полосы в процессе ее формовки в трубную заготовку. В качестве инструмента анализа процесса непрерывной валково-роликовой формовки труб автором выбрано численное моделирование методом конечных элементов в специализированном программном комплексе Corra FEA RollForm. Программа использует решатель MSC Marc для нелинейной упругопластической задачи и предоставляет графический интерфейс пользователя для пре- и постпроцессинга, позволяя сконфигурировать всю линию ТЭСА, задать свойства металла полосы, установить кинематические параметры и т. д., а также изучить расчетные данные о процессе: значения и направления сил и моментов, тензоры напряжений и деформаций, контактные зоны взаимодействия валков и полосы.

Для решения поставленных в настоящем исследовании задач автором в среде Autodesk Inventor созданы параметризованные геометрические модели формовочных станом (спозиционированные в пространстве твердотельные модели инструмента деформации) девяти ТЭСА предприятий АО «ОМК»:

- 12,7-60, 21-89, 40-133 («Olimpia 80», Италия); 102-220, 203-530 («ЭЗТМ», Россия); 140-245 («Nakata», Япония) – классической валковой формовки;
- 60-178, 114-245, 203-530 («Nakata», Япония) – точечной формовки.

Помимо этого, с целью проведения сравнительного анализа показателей эффективности различных технологий формовки, получивших наибольшее распространение в мировой трубной промышленности, созданы модели формовочных станом прочих трубных предприятий:

- 219-630 («Nakata», Япония) – точечной формовки;
- 219-610 («MillTech», Южная Корея) – линейной формовки.

Параметризация геометрических моделей позволила сократить временные затраты на их разработку под каждый из рассматриваемых в работе типоразмеров (~300 шт.) с  $D/t$  от 6 до 88 из углеродистых и низколегированных марок стали. Фактические значения координат положения и профиль рабочего инструмента определены посредством их бесконтактного измерения фотограмметрической системой AICON DPA и оптическим 3D-сканером Creaform ZScanner 800.

При создании конечно-элементной модели процесса валковый инструмент описан оболочечными элементами и задан абсолютно жестким виду его несоизмеримо малой деформации в процессе формовки по сравнению с деформацией полосы. Тип используемого при описании исходной заготовки элемента (№7 по классификации MSC.Marc) – объемный восьмиузловой изопараметрический элемент (гексаэдр) с трилинейной интерполяцией. Для достижения баланса между затрачиваемым машинным временем и точностью вычислений ввиду вертикальной симметрии процесса формовки относительно плоскости  $ZY$  в расчет включена половина полосы, разбитой на два элемента по ее толщине. Полоса в среднем состоит из 32000 элементов и содержит 48000 узлов. Тип контакта инструмента с заготовкой – «узел–поверхность». Применен закон трения Кулона с коэффициентом трения  $\mu$  равным 0,1.

При создании модели материала автором использовано условие текучести по фон Мизесу. Наступление текучести по данному критерию возникает при равенстве эффективного (эквивалентного) напряжения и предела текучести, измеренного для случая одноосного нагружения. Использована модель изотропного упрочнения материала, предполагающая, что центр поверхности пластичности остается неподвижным в области напряжений, но размер (радиус) поверхности пластичности увеличивается вследствие упрочнения. Для создания взаимосвязи напряжения–деформации в пластических материалах в Marc реализован закон пластического течения в формулировке Прандтля–Рейтса (закон ассоциированного пластического течения), согласно которому пластическое деформирование (течение) направлено по нормали к поверхности пластичности.

Механические свойства материала задаются реологической кривой, полученной по результатам статических испытаний на растяжение, выполненных на сервогидравлической испытательной машине MTS в лаборатории металловедения Центра исследовательских лабораторий Инженерно-технологического центра АО «ВМЗ» для всего рассматриваемого сортамента.

Адекватность модели оценивается путем сравнения формы и размеров заготовки (Рисунок 1 и 2), полученных по результатам численного и физического экспериментов по изготовлению труб  $530 \times 6$  и  $530 \times 10$  мм из стали K56 на стане точечной формовки ТЭСА 203-530 АО «ВМЗ». Измерение геометрии трубной заготовки осуществлено в период проведения предупредительно-планового ремонта оборудования в рабочем пространстве наиболее показательных с точки зрения наличия характерных особенностей формы поперечного профиля трубной заготовки участках формовочного стана при помощи лазерных трекара Leica AT960 и 3D-сканера Leica LAS. Обработка результатов измерений выполнена в программном продукте PolyWorks Inspector, сравнение – КОМПАС-3D.

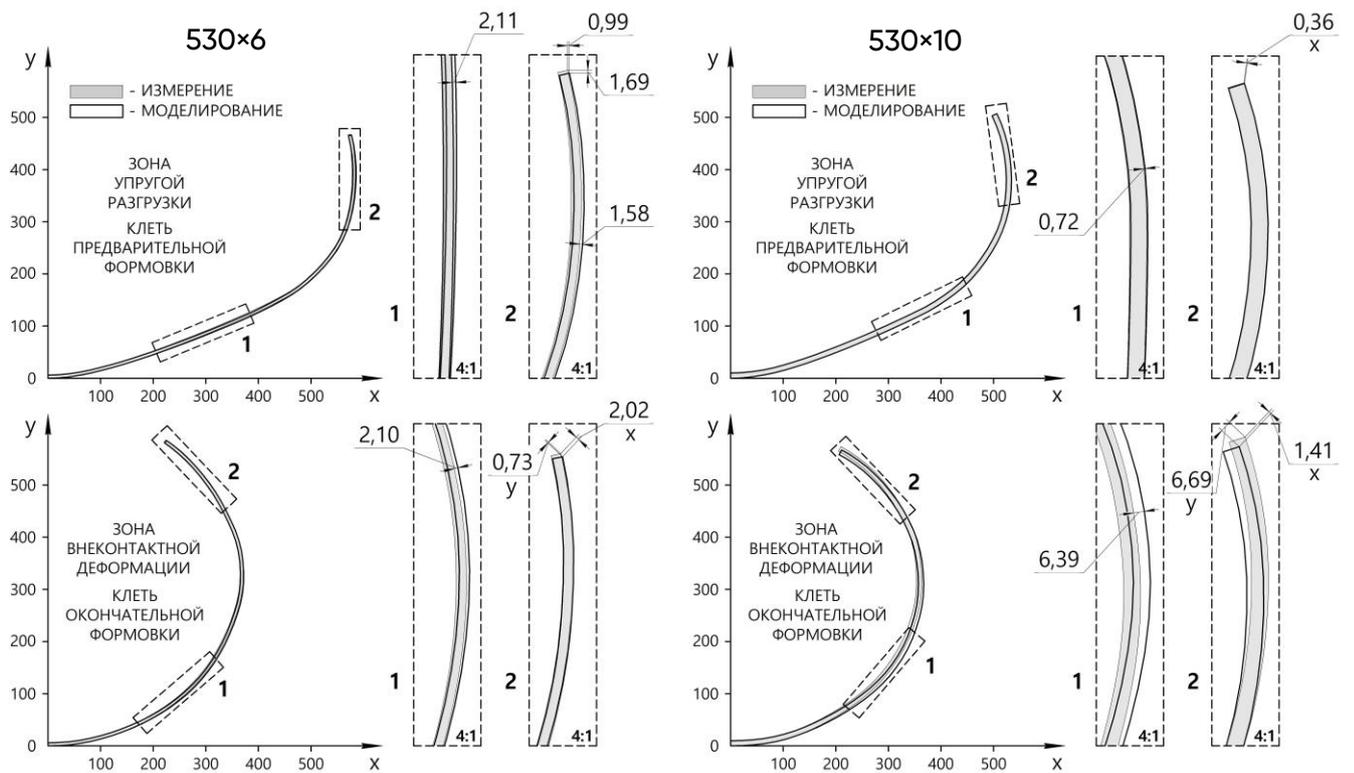
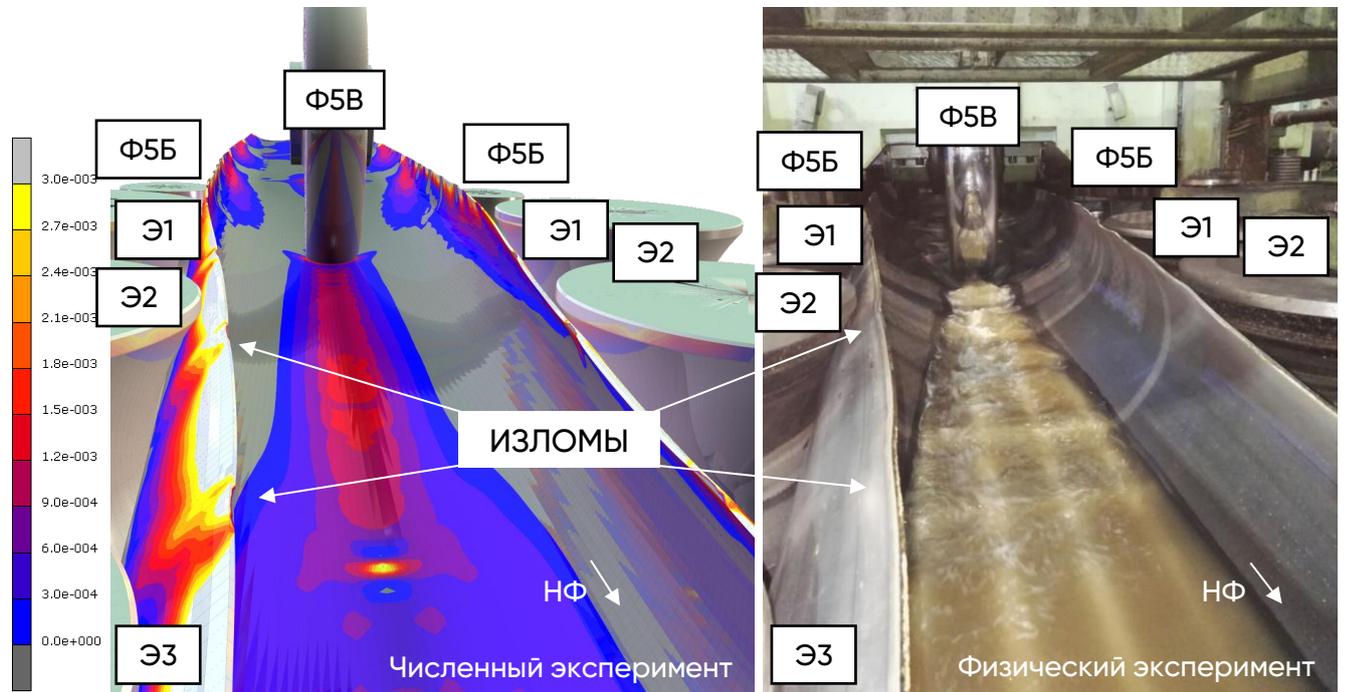


Рисунок 1. Форма и отклонения (мм) поперечных сечений трубной заготовки, полученных по результатам численного и физического экспериментов по производству труб 530×6 ( $D/t=88$ ) и 530×10 мм ( $D/t=53$ ) из стали К56 на ТЭСА 203-350 (точечная формовка)



(цветовое обозначение модели – поле распределения продольной деформации, %; Ф5В – верхний валок пятой формовочной клетки; Ф5Б – боковой валок пятой формовочной клетки; Э1-3 – валки эджерных клеток)

Рисунок 2. Внешний вид изломов кромки трубной заготовки на участке предварительной формовки ТЭСА 203-530 (точечная формовка) при производстве труб 530×6 мм ( $D/t=88$ ) из стали К56

Отмечено, что форма поперечных сечений заготовки имеет допустимое различие. Относительная ошибка модели по геометрическим параметрам профиля заготовки (расстояние между кромками) не превышает 3,1% при моделировании процесса формовки труб 530×6 мм и 0,07% – труб 530×10 мм. Сделан вывод, что по совокупности результатов выполненного сравнительного анализа формы и размеров заготовки модель адекватна объекту исследования.

**В Главе 3** приведены результаты экспериментального исследования процесса непрерывной валковой формовки, направленного на решение трех актуальных проблем: некачественная формовка поперечного профиля трубной заготовки на этапе предварительной формовки и, как следствие, невыполнение геометрии готовых труб, потеря устойчивости кромок – так называемое гофрообразование, делающее невозможным их последующую сварку и определяющее величину показателя выход годного, и нерациональность выбранного режима деформации заготовки в клетях окончательной формовки, определяющего величину расходного коэффициента металла.

Указанные проблемы характерны трем, рассмотренным в Главе 1, наиболее широко распространенным в России и мире технологиям непрерывной формовки. В ходе исследования установлено, что решение проблемы нерациональности режима деформации в клетях окончательной формовки невозможно без обеспечения качественной формовки поперечного профиля трубной заготовки в клетях предварительной формовки и устранения гофрообразования в обеих группах клетей. В свою очередь потеря устойчивости кромок заготовки на окончательном этапе формоизменения в закрытых калибрах также вызвана неудовлетворительной формовкой профиля заготовки на предварительном этапе. Обнаружено, что локальная потеря устойчивости кромок и некачественная формовка поперечного профиля заготовки на предварительном этапе как при производстве труб из углеродистых, так и низколегированных марок стали повышенной прочности имеют общую причину – неучтенное пружинение заготовки, устранение которой способно обеспечить комплексное решение выделенных проблем.

Указанная гипотеза была подтверждена результатами анализа напряженно-деформированного состояния заготовки в процессе формовки труб из стали нормальной и повышенной прочности ( $\sigma_T$  от 225 до 440 МПа) с соотношением  $D/t$  менее 70 на станах различной конструкции. Установлено, что именно качественная формовка поперечного профиля полосы за счет минимизации ее обратного пружинения в клетях предварительной формовки обеспечивает равномерность распределения продольных деформаций по сечению заготовки, позволяющую исключить необходимость ее тангенциального сжатия в клетях окончательной формовки. При этом минимизации пружинения удалось достигнуть посредством увеличения степени деформации изгиба локальных участков поперечного профиля трубной заготовки за счет корректировки калибровки валков, либо положения инструмента деформации.

Предложенные критерии рациональности режима деформации трубной заготовки на станах точечной формовки позволили значительно уменьшить

тангенциальное сжатие заготовки в группе клетей окончательной формовки с закрытым калибром. Установлены критические значения частного и суммарного обжатия заготовки в закрытых калибрах, равные 0,9% и 1,3% соответственно. Превышение указанных значений приводит к большей неравномерности распределения продольных деформаций заготовки в тангенциальном направлении и большему пружинению ее поперечного профиля при производстве труб из стали повышенной прочности ( $\sigma_T$  от 285 до 440 МПа) с соотношением  $D/t$  более 70, что, в свою очередь, приводит к снижению устойчивости прикромочных участков.

Помимо этого установлено, что устранение прямолинейных участков поперечного профиля заготовки на входе в группу клетей с закрытым калибром станов классической и точечной формовки позволяет снизить величину продольной деформации кромок при формовке в первой клетке группы на 0,2–0,5 п.п. (процентных пунктов) за счет уменьшения относительного обжатия трубной заготовки по периметру, что значительно повышает их продольную устойчивость, а также сохраняет на более высоком уровне пластические свойства металла труб.

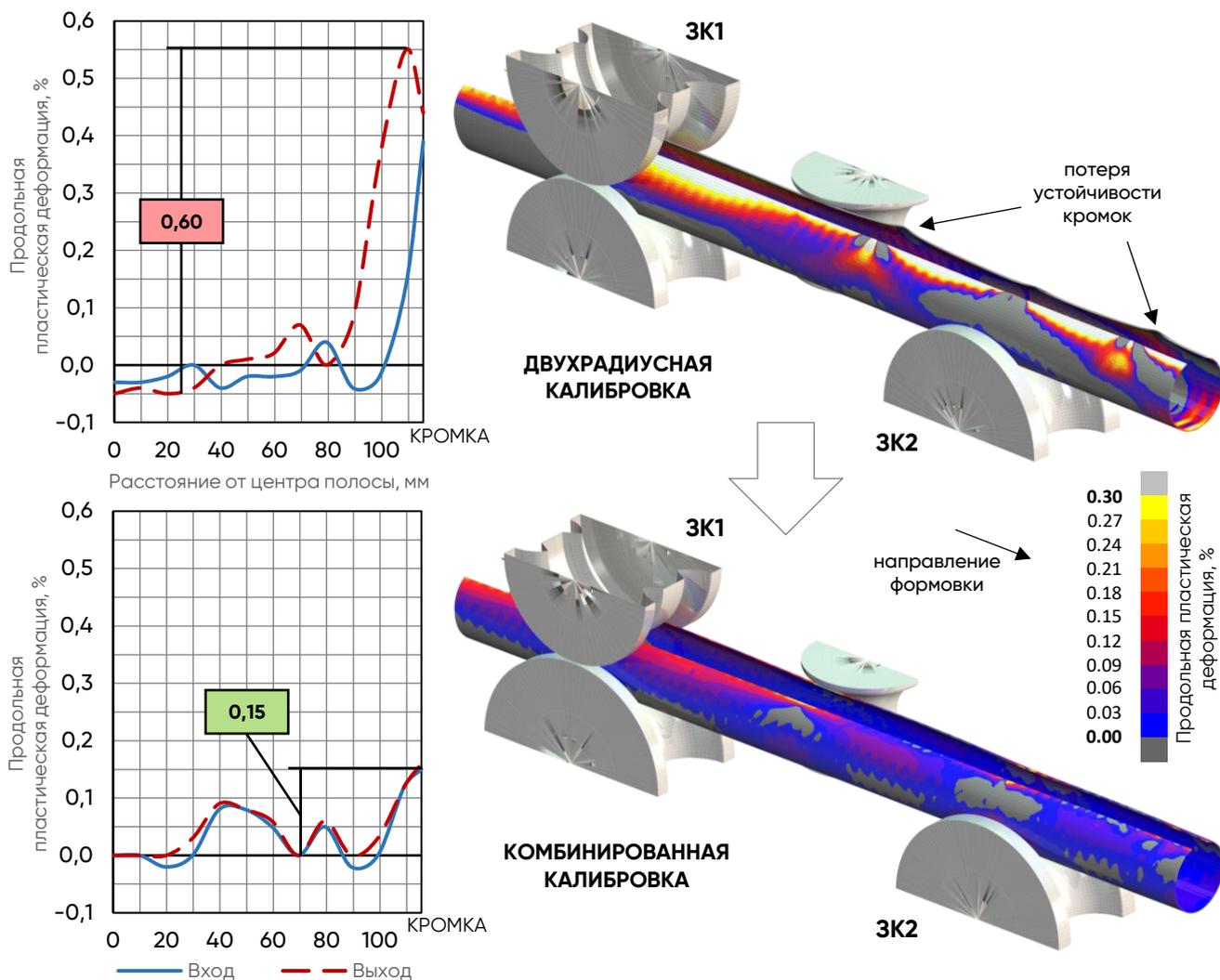
**В Главе 4** на основе анализа полученных автором результатов теоретического и экспериментального исследования процесса формовки труб на станах традиционной конструкции уточнен механизм деформации трубной заготовки, на основе которого разработаны оригинальная многорадиусная схема формоизменения и методика расчета универсальной калибровки валков.

Установлено, что при производстве тонкостенных и особотонкостенных труб с  $D/t > 20$ , в том числе из стали повышенной прочности, применение классической одно- и двухрадиусной калибровки валков в клетях с открытым калибром приводит к неравномерности распределения продольных напряжений по сечению трубной заготовки вследствие большого угла пружинения участков поперечного профиля полосы большой ширины в зонах упругой разгрузки локальных очагов (калибров). Установлено, что минимизация пружинения является ключевым условием эффективности процесса формовки. Распружинивание заготовки приводит к появлению прямолинейных промежуточных участков поперечного профиля, увеличению его высоты и, как следствие, оваллизации концов готовых труб при порезке на мерные длины, а также потере устойчивости кромок заготовки по причине наличия в них нежелательных продольных сжимающих напряжений в зонах упругой разгрузки группы клетей с закрытым калибром.

Учитывая выявленное условие, предложена оригинальная многорадиусная схема формоизменения трубной заготовки стана традиционной конструкции, разработаны новая оригинальная калибровка валков комбинированного типа, реализующая предлагаемую схему чередованием двух- и трехрадиусных калибров, и универсальная методика ее расчета, что позволило увеличить выход годного на 1,87% в среднем по сортаменту ТЭСЦ-2 АО «ВМЗ», а также снизить расходный коэффициент металла на 9 кг/т в среднем по сортаменту.

В отличие от известных способов формовки, согласно которым распределение кривизны поперечного профиля заготовки по клетям стана осуществляется по традиционным эмпирическим формулам, не учитывающим пружинение металла в межклетевых промежутках формовочного стана, предлагаемая схема формоизменения полосы в клетях предварительной формовки с открытым калибром обеспечивает бóльшую степень деформации поочередного

по переходам локального поперечного изгиба центрального и промежуточных участков профиля (по принципу шаговой формовки), обеспечивая равномерность распределения продольных деформаций по ширине полосы (Рисунок 3) и уменьшение угла пружинения ее профиля в зонах упругой разгрузки локальных очагов формовки, тем самым снижая величину продольной деформации кромок в зонах контактной деформации и, следовательно, неравномерность распределения остаточных напряжений по толщине кромок, определяющую их устойчивость.



(ЗК1 и ЗК2 – первый и второй по направлению формовки закрытые калибры)  
 Рисунок 3. Распределение продольной пластической деформации по периметру трубной заготовки (на графиках: распределение по среднему по толщине волокну на входе и выходе из калибра ЗК1)

Схема формоизменения (Рисунок 4), реализованная в новом комбинированном типе калибровки валков, предполагает поочередный и последовательный по переходам поперечный изгиб прикромочных ( $I_{ПК}$ ), промежуточных ( $I_{ПР}$ ) и центрального ( $I_{Ц}$ ) участков полосы, соответствующих периферийным, промежуточным и центральной частям калибров. Ширина прикромочных участков полосы и половины ширины центрального равны значению радиуса  $R_1$ . Выполнение данного условия значительно упрощает расчёт многорадиусной калибровки валков.

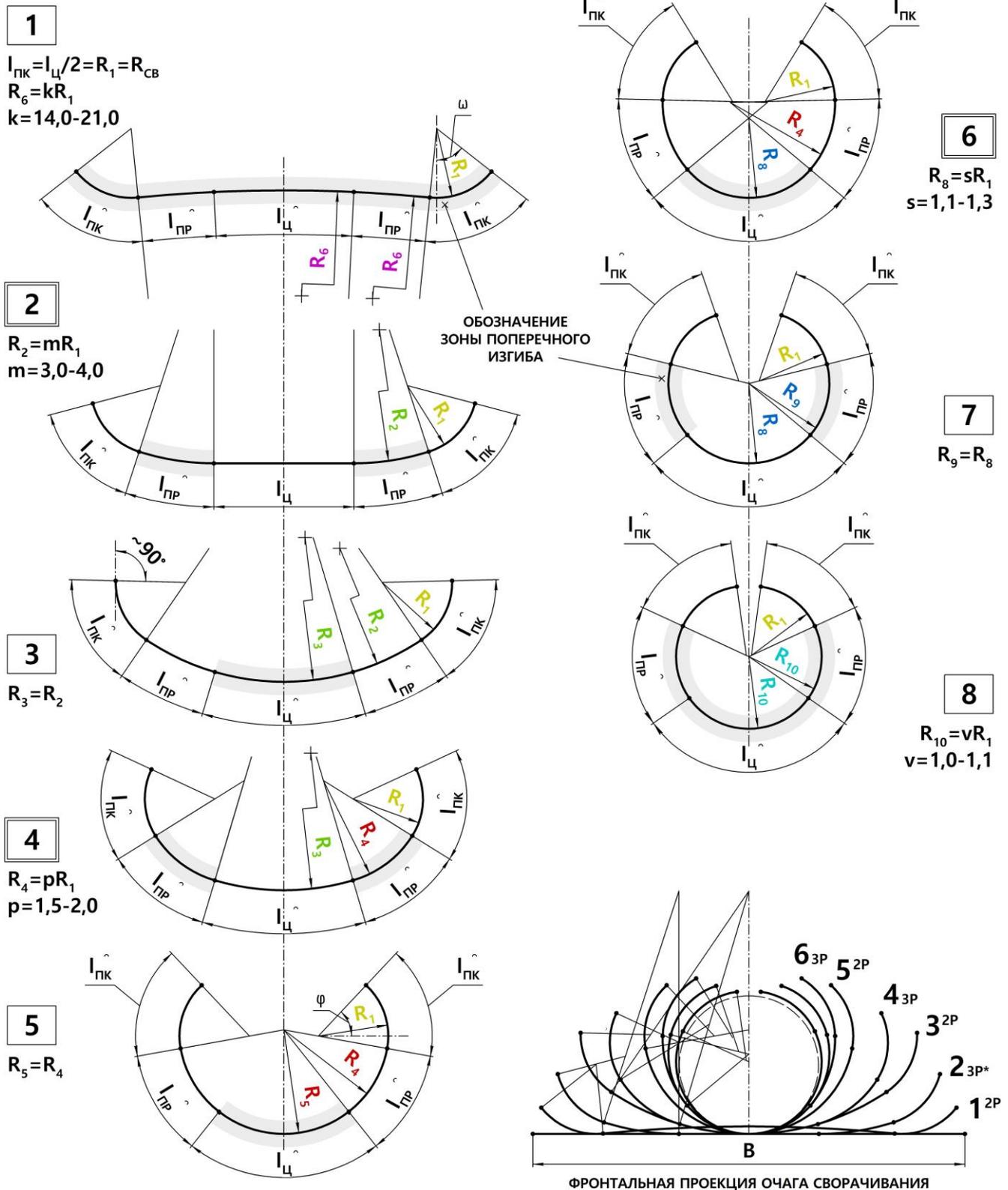
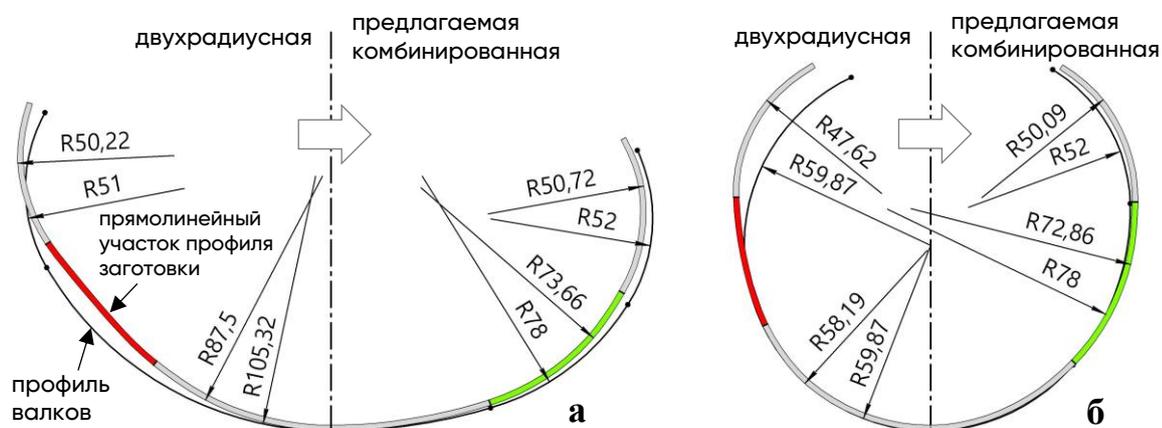


Рисунок 4. Предлагаемая схема формоизменения трубной заготовки

Согласно схеме, в первом переходе изгибаются прикромочные участки полосы радиусом  $R_1$ , причем  $R_1$  равен радиусу ( $R_{СВ}$ ) сварочного калибра. Схема формоизменения предполагает сохранение кривизны прикромочных участков, полученной после первого перехода, до момента ее редуцирования в калибровочном стане. Изгиб центрального участка заготовки, задействующий в сворачивании всю ширину полосы, предложено осуществлять при суммарных

углахгиба заготовки в области  $180^\circ$  и  $270^\circ$  (переходы № 3, 5, 6), характеризующихся низкой устойчивостью кромок. Данное решение необходимо для увеличения зоны внеконтактной деформации локального очага формовки и, следовательно, уменьшения величины способствующих гофрообразованию сжимающих напряжений в кромках. Изгиб проблемных промежуточных участков трубной заготовки предложено осуществлять в переходах № 2, 4, 7. Такая схема формоизменения устанавливает минимально-необходимое количество калибров открытого типа, равное пяти, обеспечивающее качественную формовку (Рисунок 5) промежуточных участков заготовки радиусом до  $1,5R_{CB}$  с суммарным угломгиба не менее  $270^\circ$ . Помимо этого, для обеспечения качественной формовки промежуточных участков заготовки во всем диапазоне толщин стенок изготавливаемых труб предложено спрофилировать соответствующие калибры под минимальное значение из диапазона толщин, для формовки прикромочных и центрального участков полосы – под максимальное значение.



(а – зона упругой разгрузки четвертого калибра предварительной формовки;  
б – зона внеконтактной деформации первого калибра окончательной формовки)

Рисунок 5. Поперечный профиль трубной заготовки при производстве труб  $102 \times 1,8$  мм ( $D/t=57$ ) на ТЭСА 40-133 на различных калибровках валков

**В Главе 5** представлены результаты промышленной реализации результатов исследования. Отражены результаты апробации разработанной калибровки валков в условиях ТЭСЦ-2 АО «ВМЗ», в частности при изготовлении особотонкостенных профильных труб  $60 \times 60$  мм профилированием круглых труб диаметром 76 мм с толщиной стенки 1,3 мм ( $D/t=58$ ) из стали 20, а также при изготовлении труб диаметром 102, 108, 114 и 133 мм с толщиной стенки от 1,8 до 4,3 мм ( $D/t=57 \div 24$ ) из конструкционной низколегированной стали 09Г2С. При изготовлении труб всего указанного сортамента поперечное сжатие заготовки в закрытых калибрах не осуществлялось, гофрообразование отсутствовало. Качество труб соответствовало техническим требованиям и стандартам.

Приведено подробное описание результатов разработки и освоения пяти новых видов продукции (НВП) при расширении размерного ряда тонкостенными (Дн 51;  $D/t=20-22$ ), нормальными (Дн 38;  $D/t=9,5-19$ ) и толстостенными (Дн 10;  $D/t=6$ ) трубами малого диаметра, а также марочного ряда нормальными (Дн 114;  $D/t=19$ ) и тонкостенными (Дн 133;  $D/t=30$ ) трубами из стали 09Г2С.

Показано, что внедрение результатов исследования в период с 2016 по 2020 г. позволило при производстве круглых и профильных труб на агрегатах ТЭСЦ-2 снизить расходный коэффициент металла на 9 кг/т и увеличить выход годного на 1,87% в среднем по всему сортаменту. Суммарный объем произведенных труб с использованием разработанных способов составил более 400 тыс. тонн. Внедрение разработанных карт настройки агрегатов позволило сократить время их переналадки с 8 до 3,5 часов. Внедрение результатов на рассматриваемом сортаменте (325×5, 377×5, 530×6 мм) ТЭСЦ-3 позволило увеличить выход годного на 27% и снизить расходный коэффициент более чем на 4 кг/т.

Оптимизация технологии производства особотонкостенных труб из стали повышенной прочности за счет улучшения качества формовки заготовки по геометрии ее поперечного профиля и точности сведения кромок в зоне сварки позволила повысить эффективность работы формовочных станков классической и точечной формовки до значений, соответствующих гораздо более дорогостоящим станам линейной формовки. Этим подтверждается достижение цели данного исследования.

### **Основные выводы**

1. На основе анализа результатов теоретических и экспериментальных исследований процесса формовки трубной заготовки на станах различной конструкции установлено, что с расширением размерного и марочного сортамента продукции трубных промышленных предприятий в сторону уменьшения толщины стенки и повышения прочностных характеристик производимых труб снижается эффективность технических решений, заложенных советскими учеными в технологию классической валковой формовки.

2. На основе анализа напряженно-деформированного состояния полосы в процессе ее сворачивания в трубную заготовку впервые установлено, что основным условием эффективности процесса формовки является обеспечение минимального обратного пружинения полосы при ее гибке в группе клетей предварительной формовки.

3. Разработана оригинальная многорадиусная схема формоизменения трубной заготовки, обеспечивающая минимальное распружинивание полосы в процессе сворачивания и позволяющая производить на станах классической валковой формовки трубы требуемого качества из стали нормальной и повышенной прочности ( $\sigma_T$  от 225 до 440 МПа) с соотношением  $D/t$  от 6 до 70. Оригинальный принцип построения схемы формоизменения полосы позволил уменьшить неравномерность распределения продольных деформаций в тангенциальном направлении трубной заготовки, тем самым повысить качество формовки ее профиля и устойчивость кромок, а также уменьшить величину относительного обжатия заготовки в клетях окончательной формовки.

Установлены критерии рациональности режима деформации заготовки при производстве труб из стали повышенной прочности ( $\sigma_T$  от 285 до 440 МПа) с соотношением  $D/t$  более 70 на станах точечной формовки, позволяющие значительно уменьшить, либо полностью исключить тангенциальное сжатие

заготовки в группе клетей окончательной формовки с закрытым калибром, а также установлены критические значения частного и суммарного обжатия трубной заготовки в закрытых калибрах, равные 0,9% и 1,3% соответственно.

Разработана универсальная оригинальная формула, позволяющая с высокой точностью определять ширину штрипса и наружный периметр трубной заготовки на каждом этапе сворачивания. Режим деформации, описанный данной формулой, позволил на станах точечной формовки уменьшить расходный коэффициент на 4 кг/т, а также увеличить значение показателя выход годного на 27% при производстве особотонкостенных труб среднего диаметра (325×5, 377×5, 530×6 мм). Разработанный способ формовки защищен патентом РФ (пат. 2677558) и внедрен на агрегатах ДНППТ АО «ВМЗ».

4. Разработаны калибровка валков комбинированного типа, реализующая предложенную схему формоизменения, и методика ее расчета. Применение новой калибровки позволило увеличить выход годного на 1,87% в среднем по всему сортаменту труб малого диаметра (до 133 мм) ТЭСЦ-2 АО «ВМЗ», а также снизить расходный коэффициент металла на 9 кг/т в среднем по сортаменту цеха. Разработанный способ изготовления электросварных прямошовных труб защищен патентом РФ (пат. 2763696) и внедрен на АО «ВМЗ».

5. Результаты расчетов по разработанным математическим моделям позволили снизить издержки на проведение физических экспериментов на реальном оборудовании как при совершенствовании действующей технологии производства, так и при разработке и освоении пяти новых видов продукции размерного и марочного сортаментного ряда толстостенных и особотонкостенных труб, в том числе из стали повышенной прочности. В результате внедрения разработанных мероприятий получены сопоставимые с современными станами линейной формовки значения показателей эффективности работы станов классической и точечной формовки, что соответствует задачам импортозамещения, поставленным руководством страны.

Подтвержденный экономический эффект от реализации предложенных мероприятий в период с 2017 по 2020 г. при производстве труб малого диаметра от 17 до 133 мм на станах классической формовки составил 99,03 млн руб., среднего диаметра от 140 до 530 мм – 18,58 млн руб.

#### **Основное содержание работы изложено в следующих публикациях:**

1. Novokshonov D. N., Sokolova O. V. Preforming quality of tube billets as an efficiency criterion for the fabrication of longitudinally welded tubes // Steel in Translation. 2021. № 8. P. 569-575. (0,44 / 0,22 п. л.)

2. Способ изготовления электросварных прямошовных труб: пат. 2763696 РФ / Д. Н. Новокшонов; заявл. 31.05.21; опубли. 30.12.21. Бюл. № 1.

3. Новокшонов Д. Н., Соколова О. В. Качество предварительной формовки трубной заготовки как критерий эффективности процесса производства электросварных прямошовных труб // Сталь. 2021. № 8. С. 37-43. (0,44 / 0,22 п. л.)

4. Novokshonov D. N., Sokolova O. V. Critical degree of billet deformation in closed gauges of a tube forming mill // Steel in Translation. 2020. № 3. P. 185-191. (0,44 / 0,22 п. л.)

5. Новокшенов Д. Н., Соколова О. В. Критическая степень деформации заготовки в закрытых калибрах трубоформовочного стана // Сталь. 2020. № 3. С. 41-47. (0,5 / 0,25 п. л.)

6. Новокшенов Д. Н., Соколова О. В., Лепестов А. Е. Разработка рационального режима деформации трубной заготовки при непрерывной валково-роликовой формовке // Заготовительные производства в машиностроении. 2020. № 3. С. 119-124. (0,38 / 0,13 п. л.)

7. Novokshonov D. N., Sokolova O. V., Lepestov A. E. Improving the deformation of tube billet in continuous roll forming // Steel in Translation. 2019. № 5. P. 345-349. (0,31 / 0,1 п. л.)

8. Способ производства прямошовных труб диаметром от 10 до 530 мм на непрерывных трубоэлектросварочных агрегатах: пат. 2677558 РФ / Д. Н. Новокшенов; заявл. 07.03.18; опубл. 17.01.19. Бюл. № 2.

9. Новокшенов Д. Н., Соколова О. В., Лепестов А. Е. Разработка рационального режима деформации трубной заготовки при непрерывной валково-роликовой формовке // Сталь. 2019. № 5. С. 33-36. (0,25 / 0,08 п. л.)

10. Новокшенов Д. Н., Соколова О. В., Лепестов А. Е. Обеспечение устойчивости кромок трубной заготовки при непрерывной валковой формовке // Сталь. 2017. № 9. С. 43-45. (0,19 / 0,06 п. л.)

11. Новокшенов Д. Н., Соколова О. В., Лепестов А. Е. Оптимизация схемы формоизменения трубной заготовки путем моделирования // Сталь. 2016. № 7. С. 53-56. (0,38 / 0,13 п. л.)

12. Соколова О. В., Лепестов А. Е., Новокшенов Д. Н. Анализ калибровки валкового инструмента при непрерывной валковой формовке труб // Производство проката. 2016. № 5. С. 25-27. (0,19 / 0,06 п. л.)

13. Моделирование процессов валковой формовки труб АО «Выксунский металлургический завод» / О. С. Хлыбов [и др.] // Сталь. 2015. № 5. С. 67-70. (0,25 / 0,08 п. л.)