

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
«МИСиС»

ТОВМАСЯН МАРГАРИТ АРМЕНОВНА

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЖСОЕ НА ОСНОВЕ  
КОМПЛЕКСНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ФАКТОРОВ НА  
ТОЧНОСТЬ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СВАРНЫХ ТРУБ  
БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА**

Специальность 2.6.4 – «Обработка металлов давлением»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор

Самусев Сергей Владимирович

Москва – 2022

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность работы**

Россия является ведущим поставщиком топливно-энергетических ресурсов в Европу и основным на внутреннем рынке. Важнейшей составляющей топливно-энергетического комплекса России является магистральный трубопроводный транспорт, по которому транспортируется 100% добываемого газа, 80% добываемой нефти, более 20% продукции нефтепереработки.

С появлением новых нефтегазовых проектов увеличились производственные мощности существующих предприятий и открылись новые предприятия в России и в зарубежных странах. Возрастающая конкуренция требует от производителей постоянного улучшения качества, минимизации издержек при производстве труб и разработку технологии при освоении новых видов продукции, используя современное технологическое оборудование для производства труб большого диаметра с учетом последних технических достижений в мировой практике. В результате повышаются требования к технологии изготовления готового продукта, геометрическим параметрам и механическим свойствам заготовки.

На сегодняшний день в процессе производства контроль многих технических параметров осуществляется методами, не позволяющими получить необходимую точность измерения, а отсутствие контроля геометрических параметров по всему периметру заготовки на каждом этапе формовки приводит к увеличению величины отклонения по геометрии заготовки, количества дефектов и времени производства как текущих, так и новых типоразмеров труб.

В технической литературе недостаточно исследовано влияние неравномерного распределения механических свойств исходной заготовки, а также не учтены особенности контактного взаимодействия инструмента с заготовкой для различных типоразмеров труб, что требует дополнительных экспериментальных исследований для совершенствования методов расчета формоизменения заготовок и разработки режимов шаговой формовки, позволяющих снизить

дефектообразование, с применением современных компьютерных технологий, позволяющих получить данные о форме и свойствах заготовки на каждом этапе (шаге) производства (до нагрузки, в процессе гибки или раздачи и после разгрузки) и проводить корректировку технологии

### **Цель работы**

Совершенствование технологии с учетом степени влияния основных технологических параметров на отклонение по геометрии трубной заготовки.

### **Основные задачи исследования**

Указанная цель достигается решением следующих задач:

1. Провести обзор существующих методов процесса производства труб большого диаметра дискретной формовкой;
2. Провести эксперимент в производственных условиях; разработать способы измерения геометрических параметров трубных заготовок по деформационным участкам линии в производственных и лабораторных условиях с использованием современных систем измерения, компьютерных систем повышающих точность результатов;
3. Определить влияние технико-технологических факторов на отклонение по геометрии трубной заготовки и условия возникновения дефектов на основе результатов исследования по формовочным процессам производственной линии;
4. Совершенствовать математическую модель и аналитические методы расчетов формоизменения заготовки в процессах на линии ТЭСА: подгибки кромок, шаговой формовки, доформовки профиля, сборки и экспандирования, позволяющую подготовить режимы по технологической линии ТЭСА 1420;
5. Разработать технические предложения по совершенствованию процесса производства труб по производственным участкам.
  - Подгибка кромок. Разработать техническое решение, позволяющее обеспечить заданные геометрические параметры профиля по длине и ширине;

- Формовка основного профиля. Разработать режимы формоизменения трубной заготовки с учетом неравномерного распределения механических свойств исходной заготовки и получения готового профиля с зазором кромок под сварку;
- Доформовка. Установить степень влияния предыстории нагружения и неравномерности механических свойств на геометрию заготовки после доформовки для минимизации отклонения расстояния между кромками;
- Сборочно-сварочный стан. Определить необходимую величину расстояния между кромками и диапазон допустимых отклонений по геометрии до и после сборки;
- Экспандирование. Предложить технологию экспандирования, учитывающую колебание по свойствам и геометрии трубы, снижающую нагрузку на деформирующий инструмент и обеспечивающую заданные параметры готовой трубы.

### **Научная новизна**

1. Впервые при производстве труб большого диаметра провели измерение геометрии трубной заготовки и деформирующего инструмента с помощью системы фотограмметрии и лазерного сканирования, позволившие определить координаты контура заготовки рассчитать деформацию на всех этапах формоизменения, получить трехмерную компьютерную модель деформирующего инструмента, определить характер и величину отклонения по геометрии реального инструмента.

2. Создана математическая модель формоизменения заготовки на стадии лист-труба, на базе которой проведено комплексное (аналитическое, численное и экспериментальное) исследование основных деформационных процессов при производстве труб большого диаметра по схеме JSOE и получены следующие научные результаты:

- выявлены причины переформовки/недоформовки прикромочных зон трубной заготовки при производстве труб 813x39 (40,1) мм, 1420x25,8(21,6) мм; 1220 x 17,5 мм;

- определены причины возникновения асимметрии профиля трубной заготовки и определены параметры отклонения по концам трубной заготовки после шаговой формовки 1420x21,6 (25,8) мм и доформовки 813x39/40,1мм;

- определен механизм коррекции возможного отклонения по форме трубной заготовки с раскромом в процессе доформовки, сборки и экспандирования трубы с учетом неравномерности распределения прочностных свойств исходной заготовки;

- построены зависимости распределения и определены максимальные значения удельного усилия деформирования и остаточных напряжений по периметру заготовки/готовой трубы после каждого деформационного процесса.

3. Установлена степень влияния сварочных деформаций на форму трубы;

4. Разработаны способы производства труб, учитывающие отклонение по механическим свойствам и геометрическим параметрам исходной заготовки.

### **Практическая значимость работы**

1. Разработана комплексная инженерная методика расчета технологических параметров, учитывающая неравномерное распределение механических свойств трубной заготовки и особенности работы действующего деформационного оборудования;

2. Предложены рекомендации для установления более узкого и стабильного диапазона требований к основным технологическим и геометрическим параметрам заготовки до и после исследуемых деформационных процессов;

3. Предложены способы совершенствования процесса формоизменения трубной заготовки по основным деформационным процессам линии ТЭСА 1420.

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

1. Экспериментальные исследования формоизменения заготовки в производственных условиях проводили с помощью контактных мерительных инструментов и следующих бесконтактных: фото- и видеосъемки, системы фотограмметрии AICON DPA и лазерного 3D-сканирования Handyscan 3D EXAscан, а также стационарного контрольно-измерительного оборудования после доформовки и экспандирования.

2. Измерение твердости исходных заготовок выполнили с помощью твердомера ТЭМП-2.

3. Физическое моделирование шаговой формовки выполнили на лабораторной машине MTS Landmark 250.

4. Компьютерное моделирование процесса формовки труб большого диаметра по схеме JCOE выполнили с помощью специализированного инженерного программного комплекса DEFORM.

5. Обработку результатов исследования осуществляли с помощью систем автоматизированного проектирования КОМПАС -3D и Rapidform (3D Geomagic); системе электронных таблиц Microsoft Excel.

#### **На защиту выносятся следующие положения**

1. Анализ условий возникновения дефектов на основе результатов исследования особенностей формоизменения трубной заготовки по линии ТЭСА 1420;

2. Методики и анализ результатов измерения геометрии трубной заготовки и твердости листового проката;

3. Способы производства труб большого диаметра при подгибке кромок, шаговой формовке и экспандировании.

#### **Апробация результатов работы**

Результаты работы были представлены и обсуждены на XVIII Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов "Физико-химия и технология неорганических материалов" (Москва, 2021), Международном форуме «Инженерные системы» Инжиниринговой компании «ТЕСИС» (Москва, 2013 и 2014 г.г.), III и IV научно-практических конференциях молодых специалистов ОМК (Выкса, 2011 и 2012 г.г.).

**Публикации.** Основное содержание диссертационной работы опубликованы в 18 печатных работах, из них 12 статей - в научных рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, 6 в базы цитирования Scopus и 3 патента РФ.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав и выводов, изложена на 144 страницах машинописного текста, содержит 100

рисунков, 26 таблиц, библиографический список из 150 наименований и 3 приложения.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и основные задачи исследования, отражены научная новизна и практическая значимость.

**В первой главе** определены векторы развития производства труб большого диаметра с учетом состояния трубной промышленности за последнее полвека и прогноза развития на будущее десятилетие. Представлен анализ современных способов производства труб большого диаметра. Проведен литературный обзор существующих методов исследования параметров формоизменения заготовки при производстве труб большого диаметра.

**Во второй главе** представлены экспериментальные исследования формоизменения заготовки по технологии ее изготовления, состоящую из следующих этапов: опробование существующих методов проведения производственных экспериментов; разработка метода и проведения измерения геометрических параметров трубной заготовки и деформирующего инструмента. В исследованиях применялись система фотограмметрии и 3D лазерный сканер; разработка программы и проведения экспериментального исследования для установления влияния отклонения по механическим свойствам и сварочным деформациям на форму трубной заготовки в процессе производства и готовой трубы.

На первом этапе исследования формоизменения трубной заготовки в линии 1420 провели при настройке технологии производства нового сортамента трубы 813x39 (37,4) мм классом прочности K65(X80).

Исследования выполнили как с помощью фото – и видеосъемок непосредственно на прессах, так и на выходе из пресса на контрольно-измерительных стендах с помощью фотосъемки торцов заготовки. Обработанные фотографии профиля трубной заготовки, произведенные в программе КОМПАС–3D V10, позволили определить: координаты 17 точек трубных заготовок после

формовки на прессе шаговой формовки и сборки на сборочно-сварочном стане; распределение радиуса кривизны по всему периметру заготовки, контактные участки по внутренней поверхности заготовки и плоские на наружной поверхности.

В результате проведенного эксперимента установлены контактные условия взаимодействия заготовки и инструмента с учетом количества шагов при шаговой формовке. Для снижения нагрузки на деформирующий инструмент и исправления формы трубы количество шагов и длину контакта необходимо подбирать в зависимости от соотношения  $D/S$ , а при превышении нагрузки проводить экспандирование с перекрытием.

На втором этапе проводили исследования комплексом оборудования для бесконтактных измерений геометрических параметров деформируемых трубных заготовок диаметром 813x39 мм и деформирующего инструмента. В качестве измерительного оборудования использовали: систему фотограмметрии AICON DPA фирмы AICON DPA GmbH и лазерного 3D-сканирования Handyscan 3D EXAscan фирмы Creaform, Inc.

Внедренный метод измерения геометрических параметров, состоит из трех основных этапов: нанесения меток на элементы изделия; фотографирование объекта и обработка полученных фотографий. Целевой объект фотографировали с помощью цифровой камеры с разных сторон из не менее 3-х различных ракурсов. Полученные фотографии обрабатывали с помощью программы Rapidform, рассчитывающей пространственные координаты всех указанных точек (меток) (см. рис. 1).

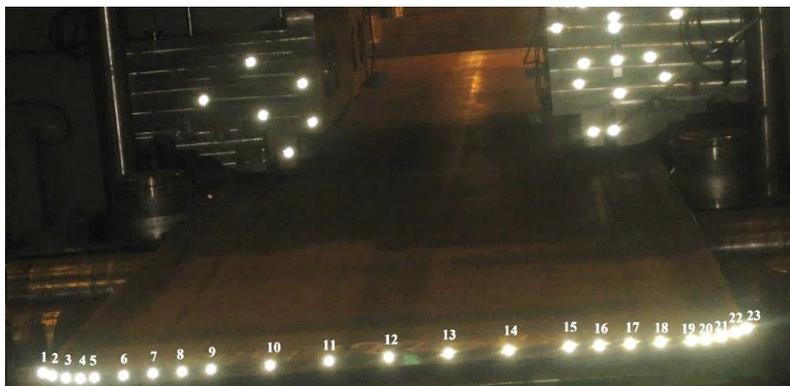


Рис. 1 – Расположение меток и адаптеров на прессе подгибки кромок и листе после деформации

Результаты измерений (координаты точек) представлены на рис. 2. Заготовка до и после подгибки кромок имеет отклонение от плоскостности (выпуклую форму) равной 12 мм. По координатам заготовки определили радиус подогнутой кромки с левой и правой стороны, где радиусы одной стороны превышал радиус второй на 20%.

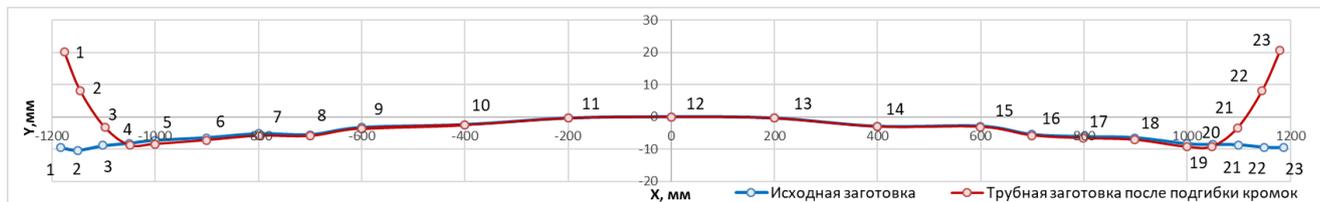


Рис. 2 – Распределение координат точек, полученных методом фотограмметрии

При шаговой формовке зафиксировали координаты 23 точек на каждом шаге после разгрузки. Трубная заготовка после формовки имела асимметрию, причем отклонение по радиусу в прикромочной области составляло 30%(рис. 3).

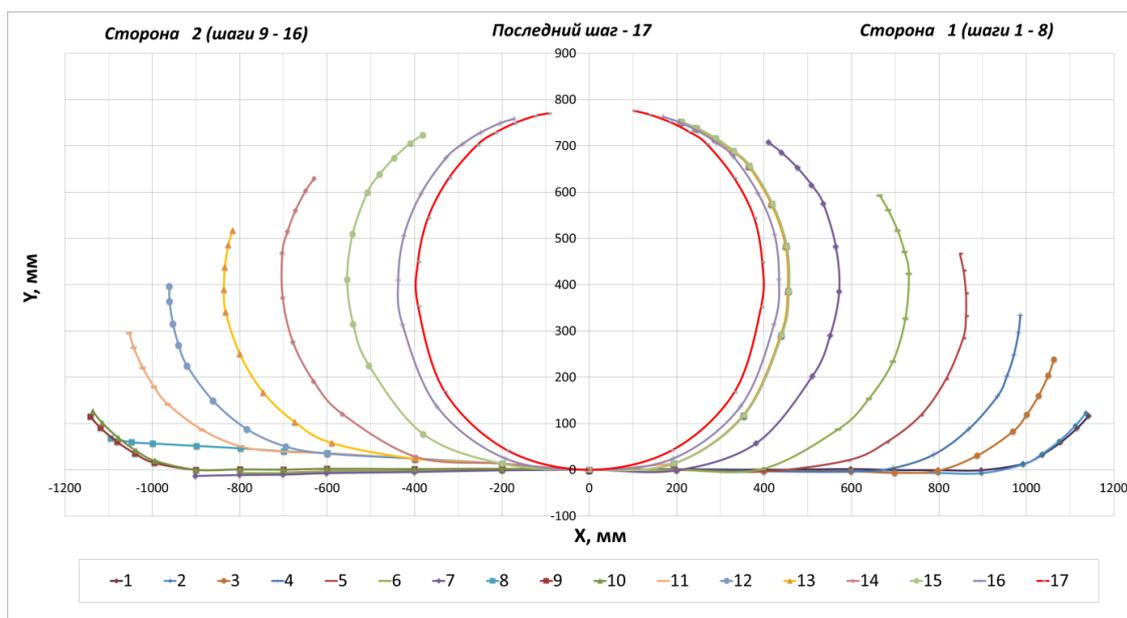


Рис. 3 – Координаты 23 точек заготовки после разгрузки, полученные методом фотограмметрии

Измерения геометрии профиля деформирующего инструмента состоит из следующих этапов: подключение 3D-сканера по интерфейсу к компьютеру, калибровка устройства, подготовка и сканирование объекта, обработка результатов. По результатам сканирования определили износ деформирующего инструмента, где середина пуансона (поверхность, окрашенная желтым цветом)

имеет минимальные отклонения; а крайние участки (выделенные синим цветом) имеет износ (рис. 8).

Результаты измерения системой фотограмметрии сравнили с результатом, полученным с помощью оптической контрольно-измерительной системой на участке доформовочного пресса. Отклонение не превышало 1 %.

На третьем этапе проводили измерение твердости исходного листа динамическим твердомером ТЭМП-2.

На рис. 4 представлено расположение точек на исходном листовом прокате для измерения твердости. При однократном прокате переднему концу соответствовала хвостовая часть, заднему – головная. На рис. 5 представлено распределение твердости однократного листа для производства трубы 1420x25,8 мм по ширине.

Наибольшее значение твердости листа в продольном направлении имеется на заднем конце (головной части), наименьшее в середине. Разброс значений поверхностной твердости листа по ширине составляет 7-15%.

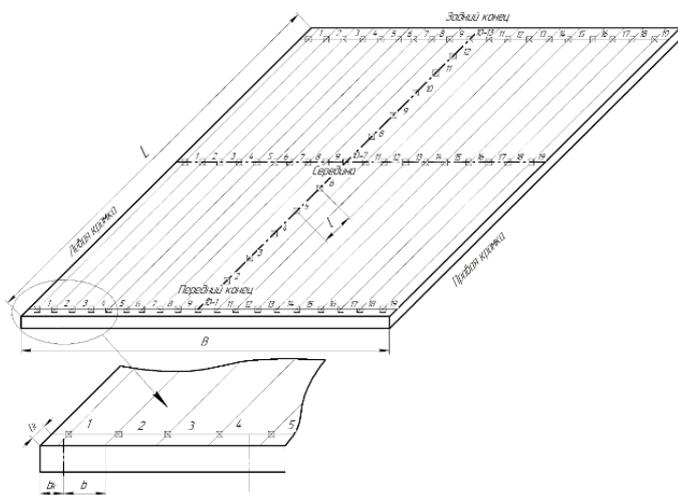


Рис. 4 – Схема расположения точек на листе для измерения твердости

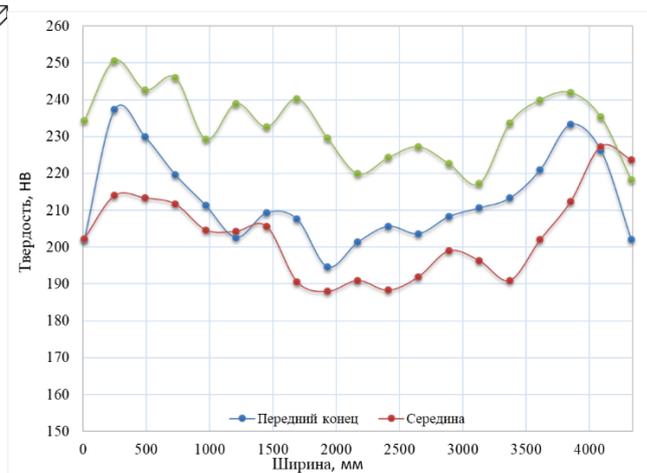


Рис. 5 – График распределения твердости листа 4340x25,8x12200 мм по ширине

Для трубы 1420x25,8 мм проведено измерение геометрических параметров заготовки с левой и правой стороны в трех точках по длине после подгибки кромок (см. рис.6), после формовки по всей ширине, сборки и сварки технологического шва (ССС), сварки внутреннего шва (СВШ), сварки наружного шва (СНШ) и экспандирования, следующих геометрических параметров:  $D_{гор}$  – горизонтальный

диаметр,  $D_{вер}$  – вертикальный диаметр, ширины раскроя  $S_p$ , смещения кромок по высоте  $C$ , а также диаметры на расстоянии  $l=100$  мм от сварного шва (см. рис. 7).

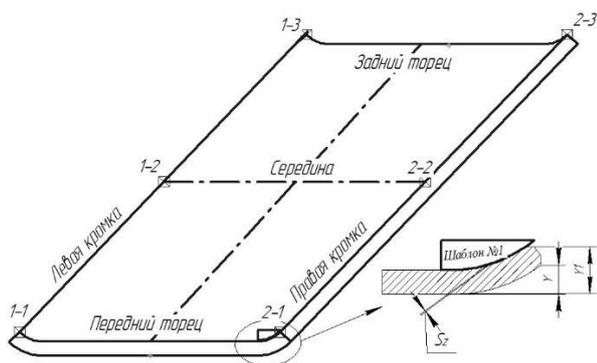


Рис.6 – Схема измерения радиуса и высоты заготовки после подгибки кромок

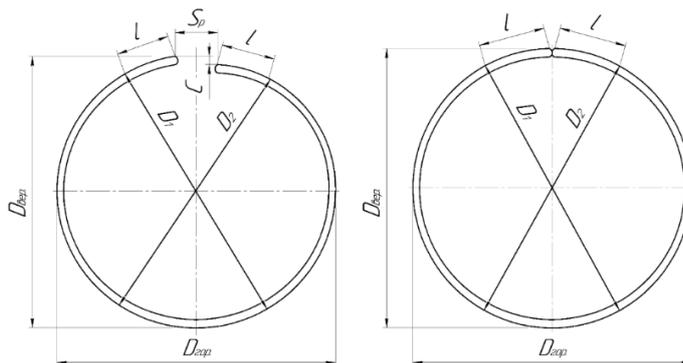


Рис. 7 – Схема измерения геометрии заготовки после формовки – экспандирования

Наибольшее расхождение по геометрии кромок трубной исследуемой заготовки наблюдалось по длине. Высота подогнутой кромки в средней части имеет значение больше концов на 2-3%, а радиус меньше на 7%. При прочности выше допустимого кромка недоформовывается, следствием чего возникает дефект крыша в прикромочной зоне, и наоборот при прочности ниже допустимой кромки переформовываются в результате образуется дефект «яблоко». Данные виды дефектов визуально заметны только после процесса сварки.

Как показали исследования, шаговая формовка первой и второй стороны заготовки с идентичным ходом пуансона для двух половин, при неравномерном распределении механических свойств в поперечном направлении, приводит к превышению значения овальности, отклонению от теоретической окружности и асимметрии трубы, а в продольном к неравномерному зазору между кромками и отклонению от прямолинейности. Асимметрия заготовки, после шаговой формовки, визуально определяется в виде смещения кромок по высоте. При отсутствии указанного отклонения данное значения можно выявить, измерив диаметры  $D_1$  и  $D_2$  на определенном расстоянии от края кромки или сварного шва после сварки.

Максимальное отклонение по пределу текучести головной части относительно середины составляет 15%, хвостовой – 13 %, причем при одинаковой величине хода относительное отклонение значения по ширине зазора по торцам

30%. Наибольшее значение ширины зазора трубных заготовок было с заднего торца, головной части листа, наименьшее - средней части двухкратного листового проката.

После сборки и сварки технологического шва, 97% труб имели горизонтальный овал, из них 10% - имели форму близкое к кругу. При сборке происходит снижение горизонтального овала трубы на 1 – 2%. Основной причиной отклонения по овальности трубы по длине является продольная деформация околошовной зоны, под влиянием которой, в процессе остывания трубы, происходит укорочение сварного шва и околошовных участков, приводящее к искривлению по верхней образующей трубы, причем наибольшее изменение происходит по торцам трубы.

В результате экспериментального исследования получена зависимость суммарного изменения овальности труб класса прочности К60 под влиянием сварочных деформаций от отношения диаметра к толщине стенки  $\Delta O = 0,26D/S + 11,5$ .

До и после экспандирования были проведены измерения по отклонению от теоретической окружности в прикромочной зоне и кривизне труб. Трубы были подразделены на две группы: имеющие форму «яблока» и «крыши» в прикромочной зоне. После экспандирования наибольшее отклонение от теоретической окружности имели трубы с формой «яблока». Наибольшее значение кривизны имели тонкостенные трубы, причем после экспандирования кривизна труб уменьшалась в 2 – 3 раза, а толстостенных – 1,5.

**В третьей** главе исследованы особенности контактного взаимодействия заготовки и с деформирующим инструментом и изменение НДС трубы на стадии подгибка кромок-экспандирование численным и аналитическими методами, а также представлены результаты физического моделирования шаговой формовки полуцилиндра по схеме JCOE.

Моделирование деформационных процессов методом конечных элементов выполнили с помощью специализированного инженерного программного комплекса Deform. В результате математического моделирования установлено, что

кромки трубной заготовки не полностью контактируют с верхним инструментом, т.е. неконтактной является середина пуансона прессы подгибки кромок, а износ пуансона является следствием трения, возникшего в результате контакта с заготовкой при нагрузке. Следовательно, прикромочная зона деформируемой заготовки имеет форму отличную от эвольвенты, так как не полностью контактирует с пуансоном (рис. 8, 9). В результате моделирования с учетом отклонения формы исходной заготовки, установлено, что прикромочная зона не доформовывается. Данное отклонение может привести к дефекту крыша и асимметрии прикромочной области (рис. 10)

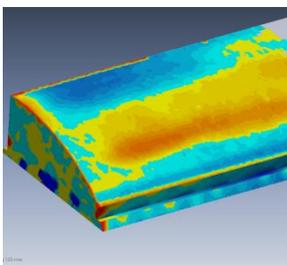


Рис. 8 – Износ инструмента прессы подгибки кромок

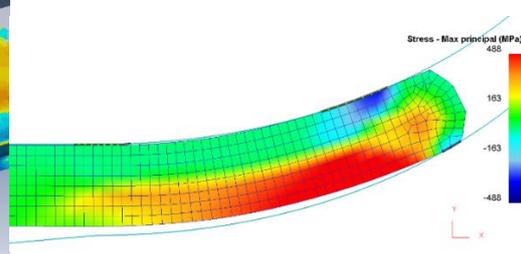


Рис. 9 – Напряжения в очаге деформации трубной заготовки при подгибке кромок

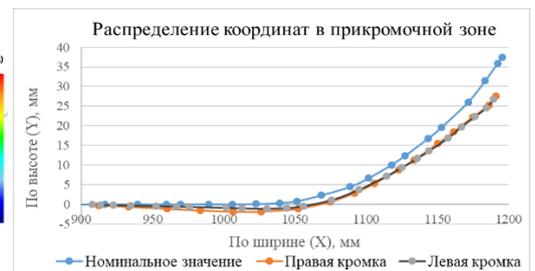


Рис. 10 Координаты точек кромок заготовки

Моделирование процесса пошаговой формовки проводилось в едином цикле с этапом подгибки кромок при непрерывной истории нагружения. При нагрузке участок заготовки не полностью контактирует с пуансоном, т.е. очаг деформации можно разделить на две основные области: контактную и неконтактную. В свою очередь контактная зона не симметрична относительно вертикальной оси 0-0 (см. рис. 11). После окончательной формовки трубная заготовка, полученная численным моделированием, имеет смещение кромок по высоте (по координате Y) равное 20 мм.

На основе экспериментальных исследований и математического моделирования разработаны инженерные методы расчета геометрических параметров и НДС трубной заготовки с учетом особенности контактного взаимодействия исследуемых процессов.

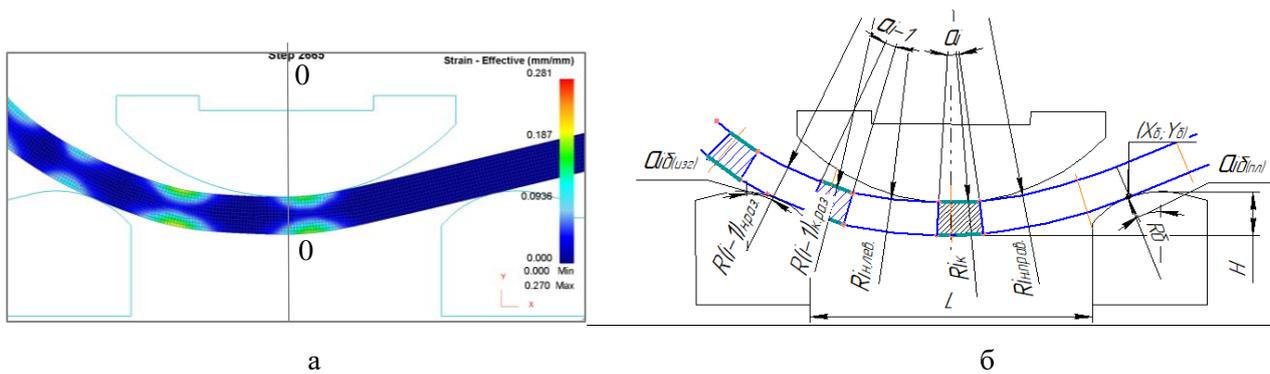


Рис. 11 – Параметры очага деформации трубной заготовки на 4-ом шаге: а – деформации по результатам моделирования Deform; б – схема и параметры для аналитического расчета.

Основные параметры процесса можно определять по инженерной методике.

Радиус заготовки при изгибе первой стороны плоской части на  $i$ -ом шаге при соотношении толщины стенки к величине хода  $S/H > 0,8$  равен  $R_{1i} = R_n$ , при  $S/H \leq 0,8$  трубная заготовка в очаге деформации отстает от пунсона, вследствие чего

меняется радиус заготовки:  $R_{1i} = R_n + 0,5(H_i + R_6 - \sqrt{R_6^2(1 + \sin^2(\alpha_i))})$ ,

Угол контакта заготовки и пуансона равен:

$$\alpha_i = \begin{cases} \arccos \frac{-\left(\frac{L}{2} + L_6\right) + \sqrt{\left(\frac{L}{2} + L_6\right)^2 - 2R_6Hi}}{R_6} + \arccos \frac{\frac{L}{2} + L_6}{\sqrt{\left(\frac{L}{2} + L_6\right)^2 + \left(\frac{Hi - S^2}{2}\right)}}, & R_n/S \leq 8 \\ \frac{\pi}{2} - \arctan \frac{\sqrt{\left(\frac{L}{2} + L_6\right)^2 - 2R_6Hi}}{R_6} - \arccos \frac{\frac{L}{2} + L_6}{\sqrt{\left(\frac{L}{2} + L_6\right)^2 + \left(\frac{Hi - S^2}{2}\right)}} \times (1.35 \div 1.45), & R_n/S > 8 \end{cases} \quad (15)$$

где  $L$  – расстояние между бойками,  $L_6$  – ширина бойков,  $R_6$  – радиус бойков,  $H$  – величина хода,  $S$  – толщина стенки заготовки.

Моделирование процесса доформовки, провели за два шага, где каждый шаг подразделяется на три основных этапа: позиционирование, догибка и разгрузка трубной заготовки (рис. 12). Моделирование проводилось в 2 этапа: моделирование с использованием реальной геометрии и режима формовки трубной заготовки на участке доформовочного пресса, но без учета остаточных напряжений, возникающих после предшествующих деформационных процессов и с учетом распределения НДС по периметру заготовки, полученные после моделирования подгибки кромок и шаговой формовки. Относительное

отклонение результатов эксперимента и расчета по геометрии трубной заготовки после процесса доформовки составляет без учета остаточных напряжений 8%, с учетом 2,5 % (см. табл.). Это объясняется тем, что общая величина разгрузки при проведении моделирования без учета напряженного состояния, возникшая на более ранних деформационных процессах, меньше, чем при учете напряженного состояния.

Таблица - Геометрические параметры трубной заготовки после доформовки

Параметры		Д <sub>вер</sub> , мм	С, мм	Д <sub>гор</sub> , мм	Sp, мм
Эксперимент		815	0,5	830	60
Моделирование в программном комплексе Deform2D/3D	Этап 1	808	4	829	55
	Этап 2	815	1,5	828	61,5

Моделирование процесса сборки выполнили в 3 этапа: устранение зазора боковыми роликами, устранение превышения кромок верхним роликом и при совпадении кромок заготовки (рис. 13).

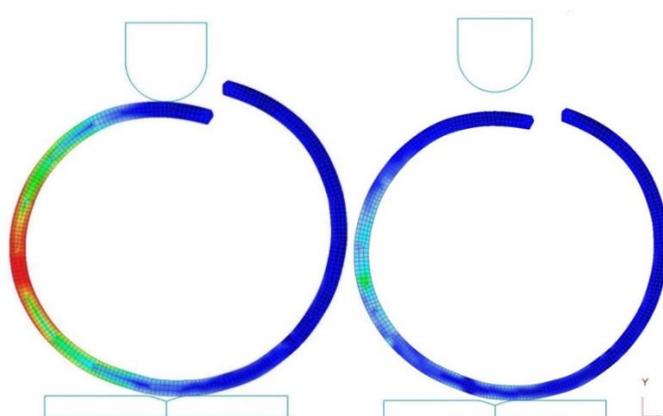


Рис. 12 – Напряжения при доформовке трубной заготовки

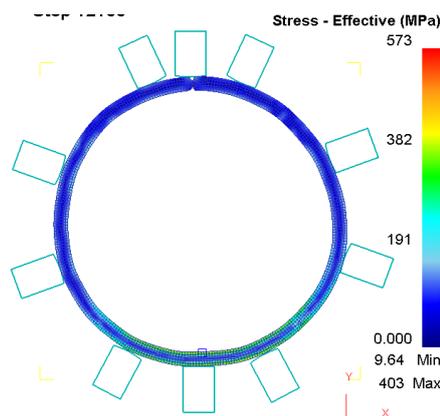


Рис. 13 – Напряжения при сборке трубной заготовки

Моделирование процесса экспандирования проводилось при непрерывной истории нагружения, состоящей из 3 этапов: устранение овальности, раздача и разгрузка трубы. В начале процесса экспандирования труба не полностью контактирует с головкой экспандера, так как имеет форму овала либо многогранника. При овальности более 2%, в начале экспандирования возникают напряжения и деформация изгиба в контактных зонах, т.е. сжимающие напряжения на внутренней поверхности и растягивающие на наружной, а зоны где отсутствует

контакт с заготовкой имеют растягивающие напряжения на внутренней поверхности (см. рис. 14).

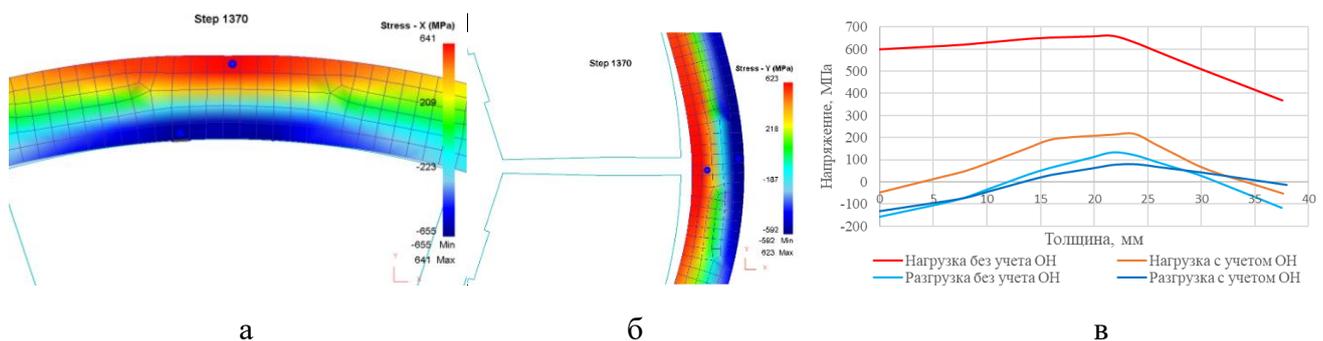


Рис. 14 – Распределение напряжений в контактных (а) и неконтактных(б) областях в начале процесса экспандирования и по толщине при раздаче и разгрузке (в)

Как и в процессе доформовки величина остаточных напряжений влияют на конечную форму трубы, так как данный параметр влияет на степень остаточной деформации  $e_n$ . Степень разгрузки  $e_{раз}$  без учета остаточных напряжений в 1,5 – 2 раза больше, чем с учетом остаточных напряжений и составляет 0,2%. Для обеспечения постоянства  $e_n$ , степень раздачи необходимо определять по формулам:  $e_k = e_n + e_{раз}$

$$e_{раз} = \frac{\beta\sigma_T - \sigma_{ост}}{E}; \quad e_k = e_n + \frac{\beta\sigma_T(1 - \ln \frac{R_k + s}{R_k}) - \sigma_{ост}}{E}$$

суммарное остаточное напряжение, возникающее в трубе после разгрузки, определяется:

$$\sigma_{ост} = \frac{\Pi}{\beta} \left( \left( \ln \frac{R_{1i} + s(1 - \eta)}{(R_{1i} + 0,5s - \eta)} - \frac{1}{2} \ln \frac{(R_{1i} + 0,5s)R_{1i}}{(R_{1i} + 0,5s - \eta)^2} \ln \frac{R_H}{R_{1i}} \right) \right)$$

где  $\sigma_T$  – предел текучести трубы на i-ом шаге, МПа;  $E$  – модуль упругости материала трубы, МПа;  $s_{i,N}$  – усредненная толщина стенки трубы по периметру в сечении, соответствующем N-ому сегменту, мм;  $\beta = 0,5 \div 0,9$  – коэффициент, учитывающий напряженное состояние, соответствующая N-ому сегменту;  $\Pi$  – модуль упрочнения материала трубы;  $\eta = 0,05-0,1$  – относительная величина смещения по толщине.

Физический модельный эксперимент провели в три этапа: произвели выбор режима формоизменения аналитическим методом, проверили режимы методом

математического моделирования и физическое моделирование на лабораторной машине MTS Landmark. Сравнительный анализ по геометрии образца после формовки показал, что относительное среднее отклонение результатов расчета и эксперимента по координатам 9 точек составляет 2,1%, асимметрия в виде смещения кромок – 4,8%, а основной причиной асимметрии трубной заготовки после шаговой формовки является отличие контактного взаимодействия второй стороны от первой

**В четвертой главе** представлена степень влияния технико-технологических факторов на отклонение по геометрии заготовки и условия возникновения дефектов на основе результатов исследования.

Для определения причин отклонения по геометрии трубной заготовки, использовали причинно-следственную диаграмму Исикавы (см. рис. 15), где взаимосвязи между решаемой проблемой и причинами, влияющими на ее возникновение, отображаются графически в виде «рыбьей кости». Для оценки количественного показателя каждой категории провели качественный и количественный анализ степени влияния на основные виды дефектов труб. На основе опытных данных определены соотношения дефектов (отклонений) по геометрии готовых труб и для каждого вида дефекта определили степень влияния каждой категории. В результате определили общий вес каждой категории  $V_k = \sum V_i N_d$ , где  $V_i$  – вес категории для рассматриваемого  $i$  – ого дефекта;  $N_d$  – количество дефекта.

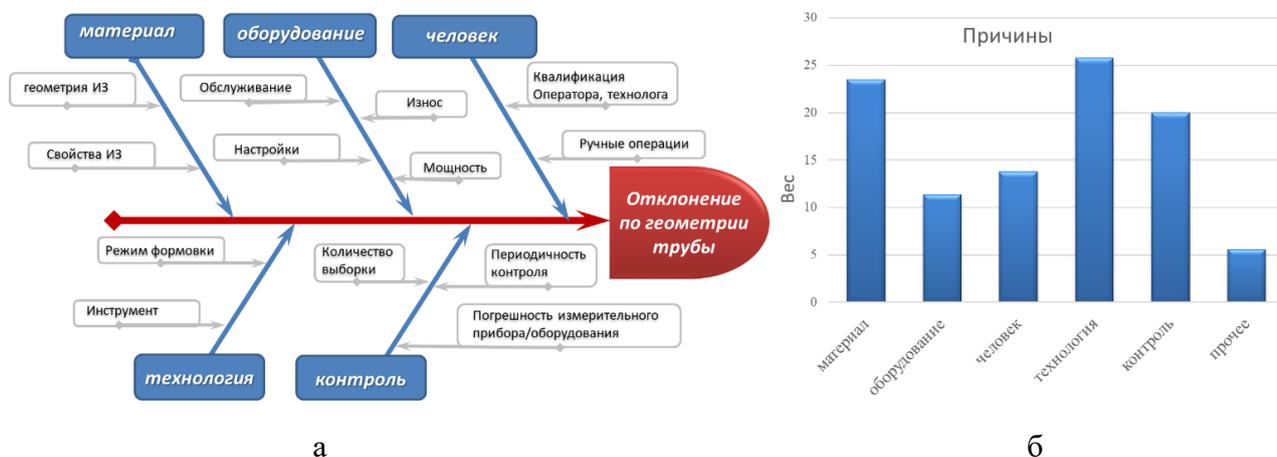


Рис. 15 – Диаграмма Исикавы в виде «рыбьей кости» (а) и вес категорий (б)

Наибольшее отклонение трубы имеют по овальности 17%, в основном связанное с режимами шаговой формовки основного профиля до 45%, с отклонением в прикромочной области и продольной кривизной, возникающие в процессе гибки до 21-35% и сварки продольных швов 7-10%. Также на овальность влияет асимметрия трубы, т.к. асимметрия возникает в результате недоформовки второй стороны при шаговой формовке, вследствие отсутствия учета неравномерного распределения механических свойств и особенности контактного взаимодействия. Из-за неравномерного распределения механических свойств труба имеет отклонение по периметру, что приводит к отклонению по прямолинейности по всей длине.

**В пятой главе** представлено предложение по совершенствованию процесса производства с учетом влияния дополнительных технологических и технических факторов для предотвращения возникновения дефектов сварных труб.

Предложено осуществлять шаговую подгибку кромок с учетом отклонения формы исходной заготовки и неравномерности механических свойств листа в поперечном и продольном направлениях, при этом до подгибки кромок листа производят комплексное измерение геометрии бесконтактным и механических свойств неразрушающими методами по всему периметру исходной заготовки [9].

Данный способ способствует сокращению количества дефекта по овальности трубы на 17%, за счет снижения величины отклонения от теоретической окружности прикромочной области и смещения кромок (асимметрии) на 15-20%, при этом остановка процесса не только при достижении заданного усилия, но и по величине перемещения при отклонении по геометрии и механическим свойствам заготовка позволяет предотвратить переформовку околошовной области и снизить количество дефектов сварного соединения, связанные с геометрией зоны сварки на 27%. На рис. 16 представлена величина хода инструмента пресса подгибки кромок на каждом шаге при производстве трубы 813x39 мм, произведенного из четырехкратного листового проката. Гибкая технология подгибки кромок максимально предотвращает отклонение в прикромочной области по длине трубы и дает возможность получить равное

значение по высоте и радиусу подогнутой кромки, тем самым обеспечив устойчивое расстояние между кромками в продольном направлении.

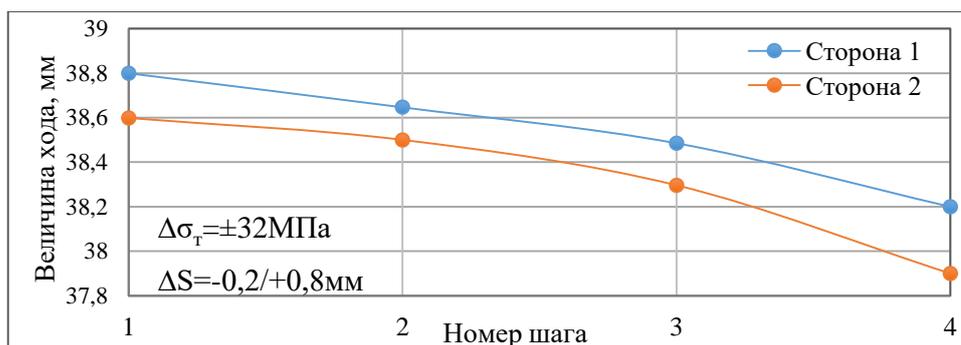


Рис. 16 - Величина хода при подгибке кромок с учетом отклонения по параметрам  $\sigma_{\tau}$  и S

Шаговая формовка осуществляется с учетом отличия деформационных режимов второй стороны от первой и неравномерности механических свойств листа в поперечном и продольном направлениях. Новые решения для шаговой формовки [8] обеспечивают снижение асимметрии по геометрии труб на 35-50%, отклонения расстояния между кромками по длине до 50 мм и увеличения производительности за счет сокращения времени настройки оборудования до 2 раз.

Для снижения отклонения по периметру и прямолинейности трубы предложен способ экспандирования, при котором раздачу трубы осуществляют до получения участков с постоянным периметром по длине с учетом данных полученных при измерении механических свойств исходной заготовки. На основе измерения вводят ограничение по перемещению и усилию деформирования на каждый сегмент. После наступления пластической деформации и получения круглой формы производят поворот трубы на угол  $\alpha_m$ , обеспечивающий перекрытие неконтактных зон [10]. Данный способ позволяет снизить величину остаточных напряжений на локальных участках и отклонения по округлости по периметру трубы, предотвратить превышения значения периметра и кривизны по длине трубы в процессе экспандирования.

## ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Исследованы существующие методы и приведены результаты проведения эксперимента и расчета параметров формоизменения заготовки при производстве труб большого диаметра.

2. Разработана схема и проведены измерения геометрических параметров трубных заготовок с использованием комплексной системы фотограмметрии на участке формовки, позволившая оценить погрешность измерений; получить данные по деформациям и перемещениям заготовки при различных деформационных процессах, провести верификацию методик расчета формоизменения трубной заготовки; повысить точность замеров; получить новые экспериментальные параметры; использовать данные при моделировании и разработке режимов.

3. Проведены измерения технологического инструмента по производственным участкам линии, которые показали характер и величину отклонения по геометрии реального инструмента, контактные условия при производстве труб и в дальнейшем использованы при математическом моделировании.

4. Разработана математическая модель процессов подгибки кромок, шаговой формовки, сборки и экспандирования на базе программного комплекса Deform. Модель позволила: определять деформацию заготовки; проводить численные эксперименты с учетом контактного взаимодействия и коррекцию отклонения по форме заготовки; определять ограничения по усилию и величин остаточных напряжений по периметру заготовки/готовой трубы.

5. Разработана методика, проведены экспериментальные исследования и определены факторы, влияющие на образование дефектов по геометрии труб на стадии лист-труба и установлены отклонения по геометрии заготовки.

6. Разработана методика расчета геометрических параметров и напряжений при нагрузке и разгрузке процессов: подгибка кромок, шаговой формовки, доформовки и экспандирования. Данная методика позволяет определять радиус, угол, длину контактных и неконтактных зон с учетом особенности контактного взаимодействия, предыстории нагружения, колебание по свойствам и применять при разработке режимов формоизменения.

7. Разработана методика физического моделирования шаговой формовки полуцилиндров на лабораторной машине MTS Landmark 250 и определены

основные параметры формовки и выводы, полученные в результате численных решений.

8. Анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований выявил причины образования следующих дефектов: отклонение от теоретической окружности прикромочной зоны; асимметрию трубы; кривизну; овальность и дефекты сварного шва.

9. Проведена оценка влияния основных технико-технологических факторов, предложены рекомендации по совершенствованию технологии и определены требования к параметрам исходной и трубной заготовки до формовки, форме трубы и околошовной зоны перед сборкой, сваркой и экспандированием.

10. Разработаны режимы формоизменения заготовки с учетом степени влияния технологических факторов на точность геометрических параметров труб и получены три патента по способам подгибки кромок, шаговой формовки и механического экспандирования, позволяющие повысить качество труб за счет снижения отклонения по геометрии, остаточных напряжений в трубах и увеличить производительность за счет сокращения времени настройки оборудования.

#### ПЕРЕЧЕНЬ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основное содержание работы отражено в следующих публикациях:

1. Товмасын М.А., С.В. Самусев. Анализ изменения формы труб большого диаметра в процессе сборки и сварки //Черные металлы № 3. 2022. С. 33-38. DOI: 10.17580/chm.2022.03.06 (Scopus, ВАК)

2. Товмасын М.А., С.В. Самусев. Исследование процесса доформовки трубной заготовки при производстве толстостенных труб большого диаметра//Технология металлов № 4. 2022. С. 50-56. DOI: 10.31044/1684-2499-2022-0-4-50-56 (ВАК)

3. M. A. Tovmasyan, S. V. Samusev. Effect of the Nonuniform Distribution of the Mechanical Properties of Rolled Sheets on the Shape of a Round Billet after Forming in Making Large-Diameter Pipes // Russian Metallurgy (Metally), May, 2020, No. 5, pp. 589–

596. DOI: 10.1134/S0036029520050158 (Scopus, Web of Science переводная статья из журнала *Металлы*, №3, 2020 г.(ВАК)).

4. M. A. Tovmasyan, S. V. Samusev. Experimental study of the change in ovality of large-diameter pipes taking into account the welding deformations effect// *Chernye Metally*. № 9. 2019. pp.43-48 (Scopus, ВАК)

5. Samusev S.V., Tovmasyan M.A. Development of determining methods for the parameters of billets at edge bending on the TESA 1420 line. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017;60(3):187-151doi.org/10.17073/0368-0797-2017-3-187-151. (Scopus, ВАК).

6. M.A. Tovmasyan, S.V. Samusev, V.A. Sazonov. Study of the Formation of Large-Diameter Pipes with the Use Modern Computer Systems// *Metallurgist*, February, 2016, Volume 60, No. 2, pp. 54–58 (Scopus, Web of Science, переводная статья из журнала *Металлург*, №2, 2016 г.) DOI:10.1007/s11015-016-0270-2

7. С.В. Самусев, М.А. Товмасын. Математическое и физическое моделирование процесса шаговой формовки по схеме JCOE на лабораторной машине ЦИЛ ИТЦ АО "ВМЗ"//*Производство проката* № 11. 2014. С. 16-21. (ВАК).

8. S.V. Samusev, M.A. Tovmasyan, O.S. Hlybov. Shaping of pipe blanks in the edge-bending press of the TESA 1420 pipe-electrowelding line//*Steel in Translation*. 2014, Volume 44, No.8, pp. 329-332. DOI: 10.3103/S096709121405012X (Scopus, Web of Science, переводная статья из журнала *Изв. ВУЗ Черная металлургия.*, №5, 2014г.).

9. С.В. Самусев, М.А. Товмасын, О.С. Хлыбов, Л.В. Дроздов. Применение фотограмметрии и лазерного 3D-сканирования для измерения профиля инструмента кромкогибочного прессы линии ТЭСА 1420 ОАО "Выксунский металлургический завод" // *Производство проката* № 2. 2014. С. 40-42 (ВАК)

10. Патент № 2763079 РФ, МПК В21D 31/04, В21С 37/30 (2006.01) Способ экспандирования труб/ Товмасын М.А., Самусев С.В.– заявл. 03.12.2019 г., опуб. 27.12.2021, Бюл. № 36 – 9 с. (ВАК)

11. Патент № 2740368 РФ, МПК В21С 37/00 (2006.01) Способ шаговой гибки кромок плоского проката, способ и устройство автоматической коррекции режимов гибки на участке кромкогибочного прессы/ Товмасын М.А.– заявл. 04.03.2019 г., опуб. 13.01.2021, Бюл. № 2 – 9 с. (ВАК)

12. Патент № 2702666 РФ, МПК В21С 37/06 (2006.01) Способ шаговой формовки труб большого диаметра/ Товмасын М.А., Самусев С.В. – заявл. 25.07.2018 г., опуб. 09.10.2019, Бюл. № 28– 9 с. (ВАК)

13. М.А. Товмасын. Комплексное исследование процесса формовки прикромочной области плоского проката при производстве труб магистральных трубопроводов с помощью современных методов расчета и измерений. XVIII Российская ежегодная конференция молодых научных сотрудников и аспирантов "Физико-химия и технология неорганических материалов" (с международным участием). Москва. декабрь 2021 г./Сборник трудов. – М: ИМЕТ РАН, 2021, 362 с

14. М.А. Товмасын Современные методы исследования геометрических параметров при производстве сварных труб большого диаметра // Технические науки – от теории к практике: сб. ст. по матер. XLVI Международной научно-практической конференции № 5(42). – Новосибирск: СибАК, 2015

15. С.В. Самусев, М.А. Товмасын, О.С. Хлыбов. Математическое моделирование основных деформационных процессов линии 1420 при производстве труб большого диаметра // Инженерные системы: Труды Международного форума. Москва. Инжиниринговая компания "ТЕСИС". - М.: МАКС Пресс, 2014 - 144 – 149 с.

16. М.А. Товмасын. Математическое моделирование и экспериментальные исследования формоизменения модельного образца при шаговой формовке по схеме JSOE на лабораторной машине // Инженерные системы: Труды Международного форума. Москва. Инжиниринговая компания "ТЕСИС". - М.: МАКС Пресс, 2013 - 199 – 204 с.

17. Товмасын М.А. Математическое моделирование и экспериментальные исследования формоизменения трубной заготовки при производстве труб большого диаметра. Научно-практическая конференция молодых специалистов ОМК. Сборник докладов конференции, 2012

18. Товмасын М.А. Научно-практическая конференция молодых специалистов ОМК. Исследование режимов формоизменения трубной заготовки при шаговой формовке по схеме JSOE в линии ТЭСА 1420.Сборник докладов конференции, 2011