

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

ТОВМАСЯН МАРГАРИТ АРМЕНОВНА

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЛСОНА 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 предистории 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 EXAscan, 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).

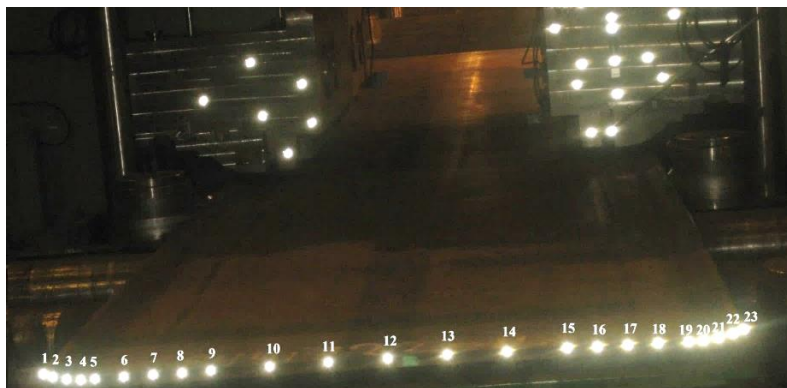


Рис. 1 – Расположение меток и адаптеров на прессе подгибки кромок и листе после деформации

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%.

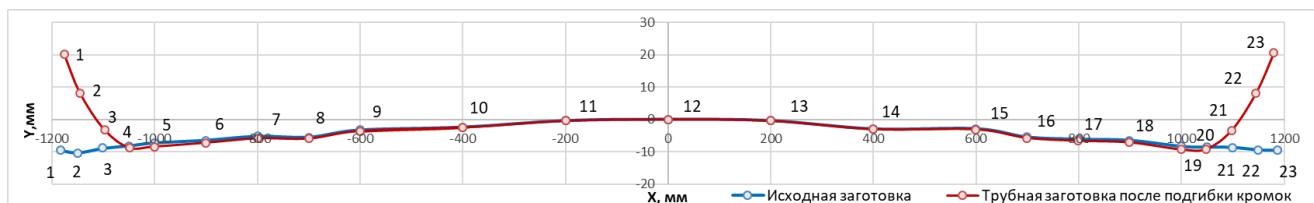


Рис. 2 – Распределение координат точек, полученных методом фотограмметрии

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).

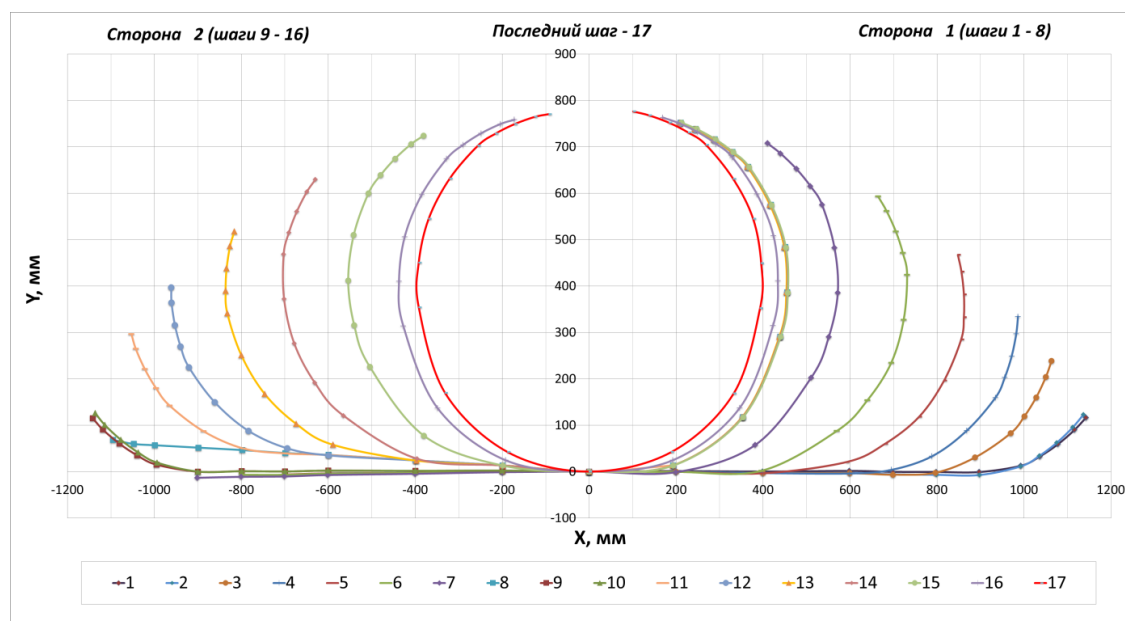


Рис. 3 – Координаты 23 точек заготовки после разгрузки, полученные методом фотограмметрии

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%.

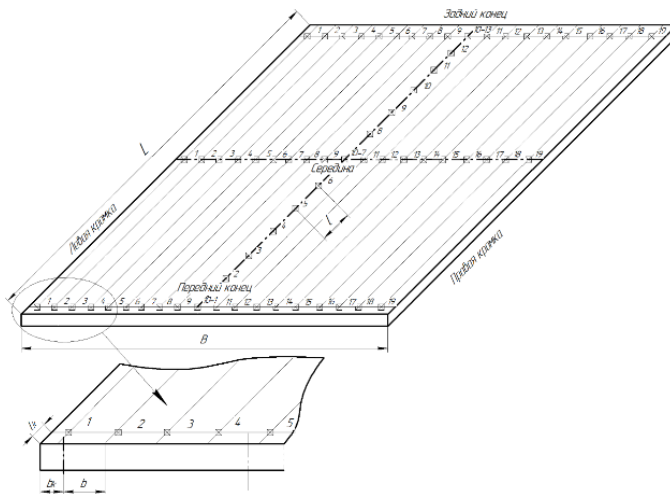


Рис. 4 – Схема расположения точек на листе для измерения твердости

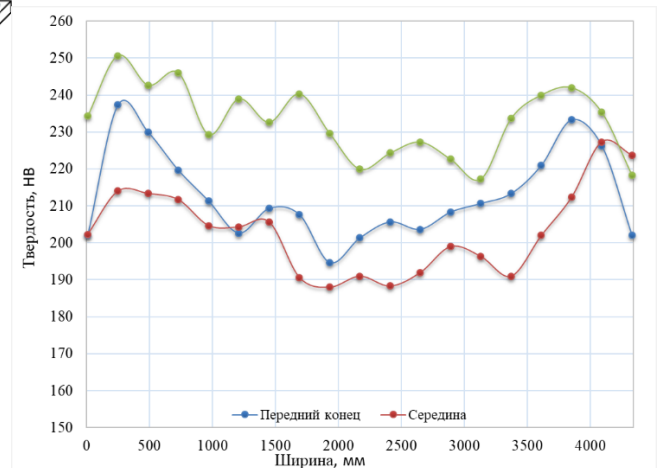


Рис. 5 – График распределения твердости листа 4340x25,8x12200 мм по ширине

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).

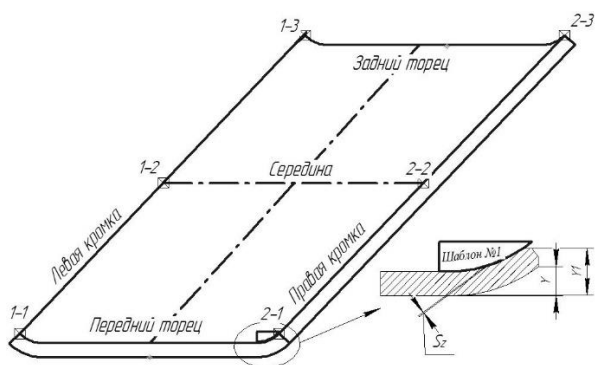


Рис.6 – Схема измерения радиуса и высоты заготовки после подгибки кромок

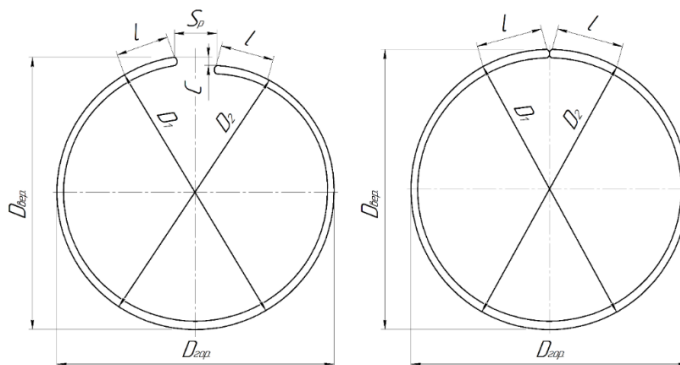


Рис. 7 – Схема измерения геометрии заготовки после формовки – экспандирования

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 меньшее 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 K60 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)

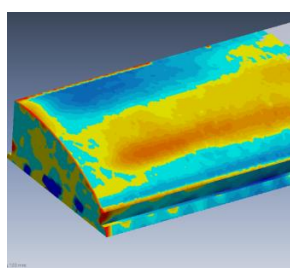


Рис. 8 – Износ инструмента прессы подгибки кромок

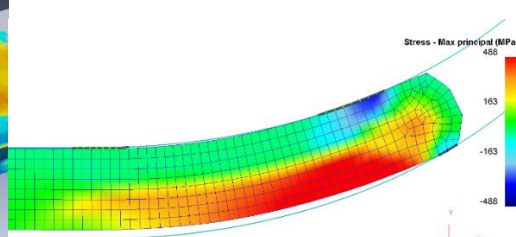


Рис. 9 – Напряжения в очаге деформации трубной заготовки при подгибке кромок



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.

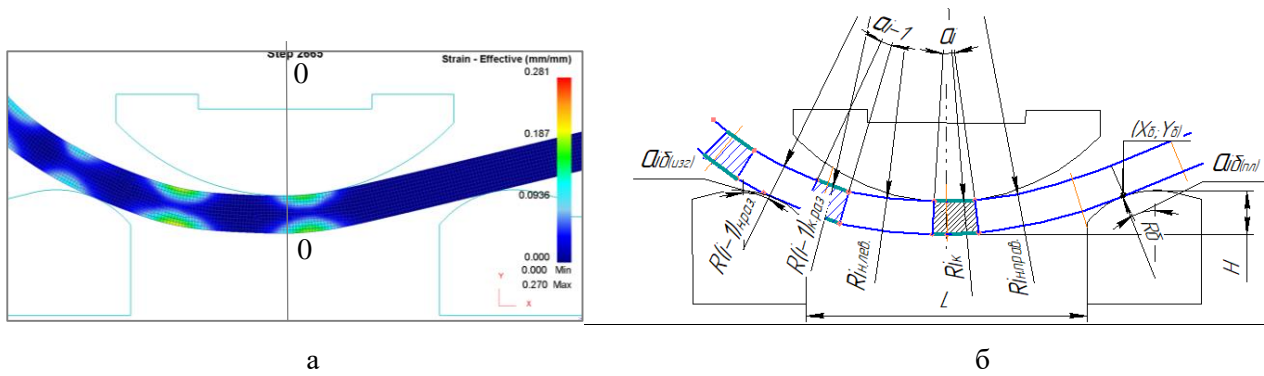


Рис. 11 –Параметры очага деформации трубной заготовки на 4-ом шаге: а –деформации по результатам моделирования Deform; б – схема и параметры для аналитического расчета.

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:

$$\alpha_i = \begin{cases} \arccos \frac{-\left(\frac{L}{2} + L_6\right) + \sqrt{\left(\frac{L}{2} + L_6\right)^2 - 2R_6H_i}}{R_6} + \arccos \frac{\frac{L}{2} + L_6}{\sqrt{\left(\frac{L}{2} + L_6\right)^2 + \left(\frac{H_i - S}{2}\right)^2}}, & R_n/S \leq 8 \\ \frac{\pi}{2} - \arctan \frac{\sqrt{\left(\frac{L}{2} + L_6\right)^2 - 2R_6H_i}}{R_6} - \arccos \frac{\frac{L}{2} + L_6}{\sqrt{\left(\frac{L}{2} + L_6\right)^2 + \left(\frac{H_i - S}{2}\right)^2}} \times (1.35 \div 1.45), & R_n/S > 8 \end{cases} \quad (15)$$

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 прессы, 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		D _{ввр} , мм	C, мм	D _{гор} , 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).

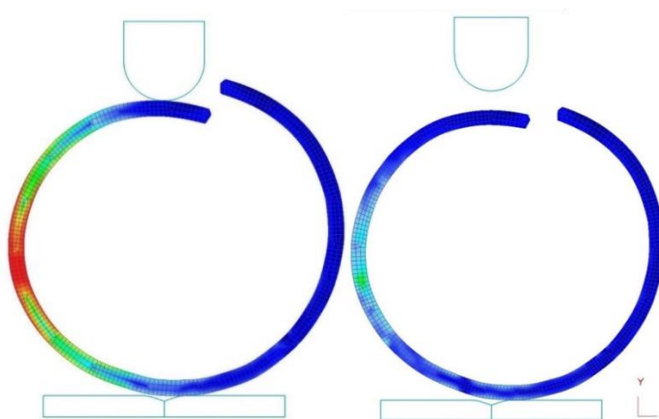


Рис. 12 – Напряжения при доформовке трубной заготовки

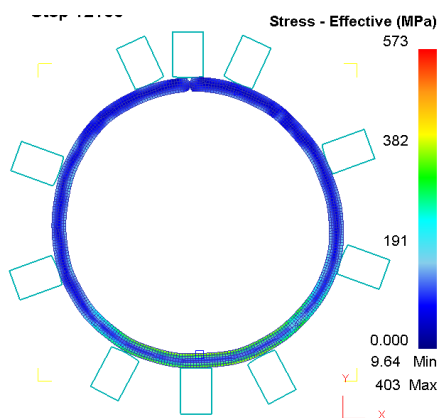


Рис. 13 – Напряжения при сборке трубной заготовки

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).

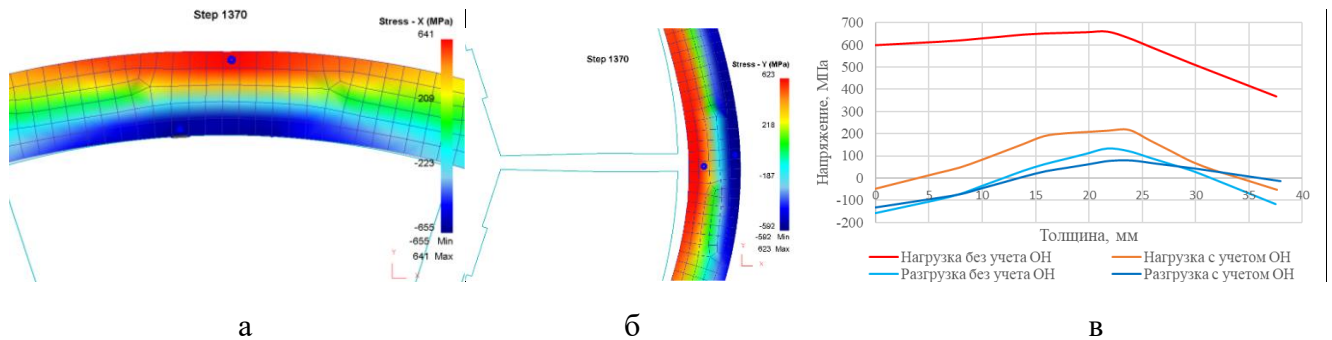


Рис. 14 – Распределение напряжений в контактных (а) и неконтактных(б) областях в начале процесса экспандирования и по толщине при раздаче и разгрузке (в)

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:

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

где σ_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; Π – 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.

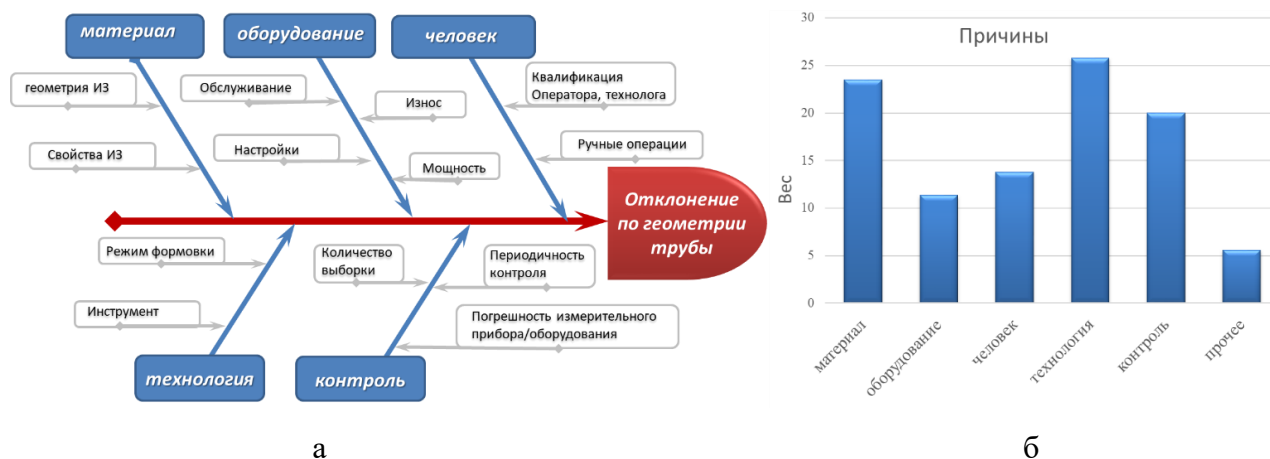


Рис. 15 – Диаграмма Исикавы в виде «рыбьей кости» (а) и вес категорий (б)

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 813х39 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.

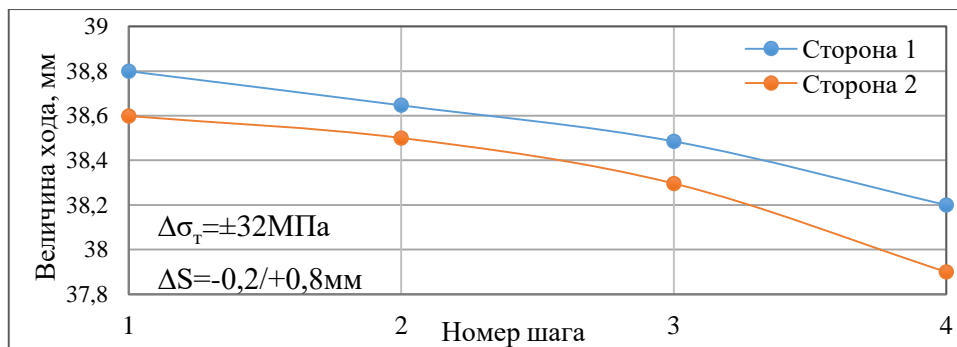


Рис. 16 - Величина хода при подгибке кромок с учетом отклонения по параметрам σ_t и S

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 кромок 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 α_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. Товмасян 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, BAK)

2. Товмасян 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 (BAK)

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.(БАК)).

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, БАК)

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, БАК).

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. (БАК).

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 (БАК)

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. (БАК)

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. (БАК)

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