

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

На правах рукописи

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»

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Самусев Сергей Владимирович

Москва - 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

	стр.
ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 Обзор современных способов производства сварных труб большого диаметра.....	10
1.1 Современные технологии и способы производства сварных труб большого диаметра	10
1.2 Существующие методы исследования формоизменения заготовки при производстве труб большого диаметра	16
1.3 Дефекты и несоответствия труб линии ТЭСА 1420	20
1.4 Выводы по главе.....	21
2 Экспериментальные исследования формоизменения заготовки по этапам ее изготовления.....	22
2.1 Первый этап. Проведение опробования существующих методов измерения.....	22
2.2 Второй этап. Разработка методики и измерение геометрических параметров бесконтактными методами.....	32
2.3 Третий этап. Исследование влияния неравномерного распределения по механическим свойствам и сварочным деформациям на форму трубы.....	45
2.4 Выводы по главе	51
3 Моделирование, аналитические и численные расчеты формоизменения заготовок в линии ТЭСА-1420 (схема «JCOE»)	61
3.1 Численное моделирование формоизменения трубной заготовки на основных деформационных участках.....	61
3.2 Физическое и математическое моделирование полуцилиндра.....	78
3.3 Разработка методики расчета геометрических параметров трубной заготовки...82	
4 Влияния технико-технологических факторов на отклонение по геометрии заготовки и условия возникновения дефектов.....	97
4.1 Условия возникновения исследуемых дефектов	97
4.2 Степень влияния факторов на отклонение по геометрии заготовки по основным деформационным участкам.....	99
4.3 Причинно-следственная связь отклонения по геометрии трубы.....	104
4.4 Методы и предложения по устранению.....	107

5. Совершенствование технологии JCOE при производстве сварных труб большого диаметра.....	112
5.1 Способ шаговой подгибки кромок.....	112
5.2 Способ шаговой формовки.....	117
5.3 Способ экспандирования.....	124
ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ.....	131
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	133
Приложение А.....	145
Приложение Б.....	146
Приложение В.....	147

ВВЕДЕНИЕ

На сегодня трубная продукция широко применяется в народном хозяйстве. Ведущим направлением ее использования является трубопроводный транспорт, широко используемый в нефтяной и газовой промышленности. Россия является ведущим поставщиком топливно-энергетических ресурсов в Европу и основным на внутреннем рынке, поэтому создание системы эффективно работающего трубопроводного транспорта является одним из основных условий качественного удовлетворения внутреннего спроса и выполнения международных договоренностей. Сфера применения металлических труб в наши дни чрезвычайно широка. Без них также невозможно существование автомобильного, тракторного и ряда других видов машиностроения, городского хозяйства, тепловой и атомной энергетики, освоение новых месторождений полезных ископаемых, жизненно важных для дальнейшего развития отечественной экономики.

С появлением новых нефтегазовых проектов таких, как «Сахалин–1» и «Сахалин–2», нефтепроводы «Восточная Сибирь–Тихий океан», «Варандеевский терминал», газопроводов «Сахалин–Хабаровск–Владивосток», «Южный поток», «Южный коридор», «Сила Сибири», «Северный поток–2», «Средняя Азия – Китай», «Бованенково – Ухта», «Ухта – Торжок», «Бейнеу – Шымкент», «Уренгой – Центр», увеличились производственные мощности существующих предприятий и открылись новые предприятия в России и в зарубежных странах в результате возрос как спрос, так и предложение, что привило не только к повышению требований к качеству, но и цене [1–3].

За последнее 10 – 15 лет для увеличения объема производства и расширения сортамента труб большого диаметра для магистральных газонефтепроводов диаметром до 1420 мм с толщиной стенки до 48 мм классом прочности до K80 (X100), рассчитанных на рабочее давление до 25 МПа (250 атм.), в трубоэлектросварочных комплексах России введены линии по производству прямошовных одношовных труб, с применением метода шаговой формовки по схеме JCOE и автоматической дуговой сварки под слоем флюса.

Возрастающая конкуренция требует от производителей постоянного улучшения качества, минимизации издержек при производстве 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 геометрических параметров трубных заготовок осуществляется визуально, невооруженным глазом, либо методами, которые не позволяют получить необходимую точность измерения, т.е. отсутствует контроль геометрические параметров по всему периметру заготовки на каждом этапе формовки, приводящая к увеличению величины отклонения по геометрии заготовки, количества дефектов и времени производства как текущих, так и новых типоразмеров труб.

В технической литературе мало исследованы влияние неравномерного распределения механических свойств по всему периметру на формирование дефектов при формоизменении заготовки, что требует дополнительных экспериментальных исследований для совершенствования методов расчета формоизменения заготовок и разработки режимов шаговой формовки, позволяющих снизить дефектообразование, с применением современных компьютерных технологий.

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 участкам производственной линии;

4. Совершенствовать математическую модель и аналитические методы расчетов формоизменения заготовки в процессах линии ТЭСА: подгибки кромок, шаговой формовки, доформовки профиля, сборки и экспандирования, позволяющую подготовить режимы по производственным участкам 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 неравномерность 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 JCOE 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 x17,5 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 раскроем 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 учитывающее 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 участкам 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 производственной линии;
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, 5 глав и выводов по работе, изложена на 144 страницах машинописного текста, содержит 100 рисунков, 26 таблиц, библиографический список из 150 наименований и 3 приложения.

1 Обзор современных способов производства сварных труб большого диаметра

1.1. Современные технологии и способы производства сварных труб большого диаметра

1.1.1. Современное состояние производства труб большого диаметра

За последние полвека трубная отрасль имела достаточно высокие темпы развития за счет освоения новых мощностей, модернизации и реконструкции всего производственного цикла, оснащения современным оборудованием. В 1980-х гг. после завершения строительства ранее начатых цехов на заводах, увеличились объемы производства и снизилась зависимость от импорта труб. [111]. Качество произведенной трубной продукции значительно отставало от мировых стандартов, так как в условиях существовавшей тогда хозяйственной системы объем продукции определял административный план, а не рынок, предприятия были мало заинтересованы в повышении качества. К концу 90-х гг., степень физического износа оборудования на трубных заводах России превышала 80%. Основной перспективой стало замена старых производств новыми, позволяющими соответствовать мировым требованиям по качеству и быть экологичными.

Современная экономическая ситуация требует производить конкурентоспособную продукцию, обратив внимание на переход к производству более технологичной продукции, что позволит на равных конкурировать с технологически развитыми странами. Поэтому большинство проектов и публикаций посвящены таким вопросам, как развитие производства труб, совершенствования технологии производства и реконструкции трубных предприятий [12-63].

За последние 15 лет объем производства труб в России возрос на 10 млн. т. По данным Фонда развития трубной промышленности (см. рис. 1.1), видно, что Россия является одним из крупнейших стран по производству труб в мире, и занимает второе место, поднявшись на одну позицию, а три крупнейших российских компаний входят в десятку ведущих мировых компаний по производству труб (см. рис. 1.2).

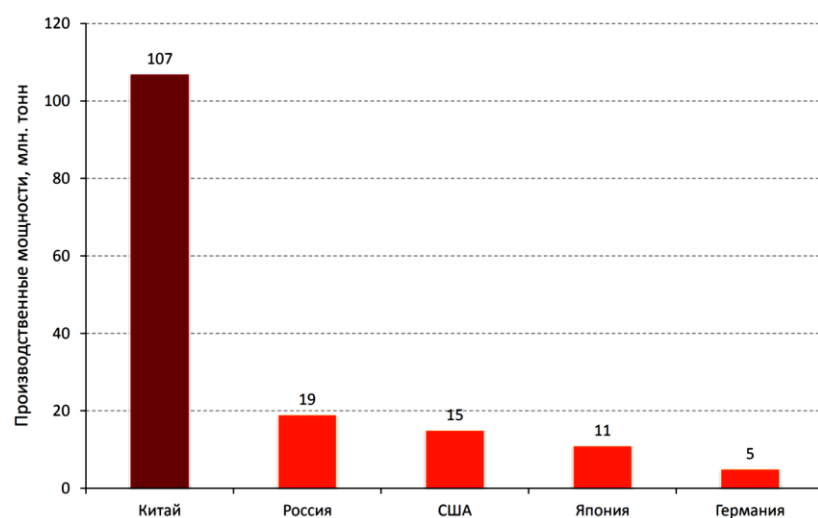


Рисунок 1.2 – Крупнейшие страны производители труб в мире

По данным департамента промышленности Минпромэнерго и департамента металлургии и материалов Минпромторга России объем производства стальных труб на ведущих металлургических предприятиях России растет высокими темпами (см. табл. 1). Например, АО «Выксунский металлургический завод» (ВМЗ) и ОАО Челябинский трубопрокатный завод (ЧТПЗ) за последние 10 – 15 лет в 2 – 2,5 раза увеличили объем производства труб различного сортамента, из которых производство труб большого диаметра составляет 60 – 70 % [6 – 18, 20].

Таблица 1.1 - Производство труб на ведущих металлургических предприятиях

Предприятие	Объем производства стальных труб, тыс. т							
	2005	2009	2011	2013	2015	2016	2017	2018
АО "ВМЗ"	1000	1500	1700	1520	2196	1766	2030	
ОАО "ЧТПЗ"	780	580	1050	1030	1296	1062	1306	1260
ОАО "ВТЗ"	995	640	1150	980	1293	1132	943	

С 2000-х г.г. на Российском рынке возрос интерес к трубам большого диаметра (ТБД), появились новые заводы и увеличились производственные мощности существующих заводов. Сегмент ТБД является одним из прибыльных, так как в объеме выручки их доля достигает 65 – 70%, несмотря на то, что в общем объеме производства в тоннаже на них приходится примерно 40 – 50%. Большинство предприятий получили возможность производить трубы диаметром до 1420 мм и прочностью до X100.

В 2003 г. на Волжском трубном заводе (ВТЗ) появился проект по выпуску спиральношовных труб, а в 2008 г. завершилась работа по расширению производства одношовных газопроводных труб толщиной стенки до 42 мм. В 2005 г. запущена линия по выпуску прямошовных ТБД на АО ВМЗ суммарной

мощностью 450 тыс. т. В 2008 г. мощности по производству труб толщиной стенки до 48 мм расширены до 950 тыс. тонн в год. В 2006 г. компания «Северсталь» ввела в эксплуатацию в городе Колпино ЗАО «Ижорский трубный завод» (ИТЗ). Мощность цеха до 600 тыс. тонн одношовных труб для нужд нефтяной и газовой промышленности. На ЧТПЗ в 2010 г. был запущен цех под названием «Высота - 239», по производству ТБД, мощностью 600 тыс. тонн [84 – 89].

После первого этапа совокупной инвестиционной программы трубной отрасли в России появится более 3 млн. т. в год мощностей по производству одношовных ТБД. В условиях сжатия внутреннего спроса Россия в 2017 году впервые стала крупнейшим в мире экспортером ТБД. Среди трубных заводов России лидером по объему производства труб большого диаметра является АО «ВМЗ». В табл. 2.2 представлен производственный потенциал российских производителей сварных труб большого диаметра [91].

Таблица 2.2 - Производственный потенциал российских производителей сварных труб большого диаметра (данные трубных компаний)

Завод изготовитель	Имеющиеся мощности (тыс. т/год)		Способ формовки
	Всего	Прямошовные диаметр 1420	
Выксунский металлургический завод	2000	950	Шаговая формовка «JCOE», U-образная формовка UOE
Челябинский трубопрокатный завод	1600	900	Шаговая формовка «JCOE», U-образная формовка UOE
Волжский трубный завод	1230	650	Спиральная формовка, Формовка в вальцах 3-RB
Ижорский трубный завод	600	600	Шаговая формовка JCOE
Загорский трубный завод	500	500	Формовка в вальцах 3-RB+шаговая формовка
Лискимонтажконструкции	120	120	Шаговая формовка JCOE
Итого:	6050	3720	

1.1.2 Анализ способов производства сварных прямошовных труб большого диаметра

На сегодняшний день десятки предприятий по всему миру производят сварные трубы большого диаметра. Способы производства на данных предприятиях в основном отличаются друг от друга, главным образом, технологией формовки (рис. 2.3). Формовку прямошовных труб большого диаметра осуществляется следующими способами: вальцах 3-RB [10, 25, 90, 91,

95], U-образная формовка UOE [25, 50 – 53, 71 – 76, 89, 90] и шаговая формовка JCOE [37 – 49, 54 – 67, 77 – 82].

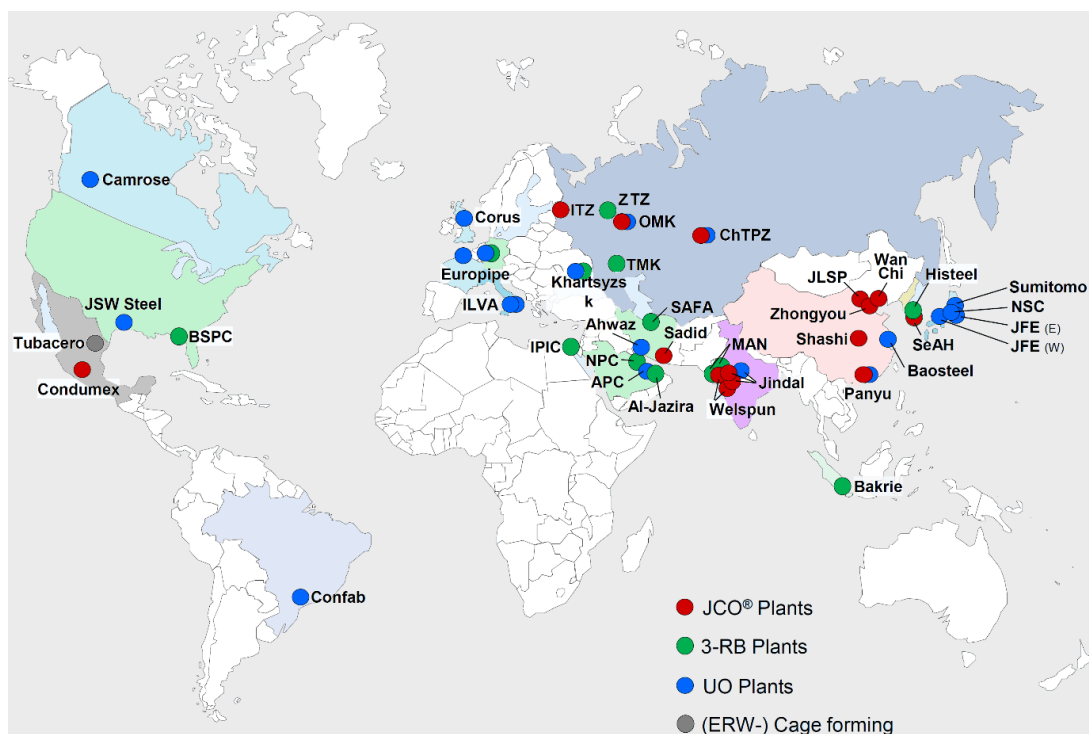


Рисунок 1.3 – Основные трубные заводы по способам производства сварных труб большого диаметра (данные SMS MEER)

Наиболее старым и простейшим способом является формовка в валках (Roll Bending). Технология валковой формовки листов в трубную заготовку включает две операции (рис. 1.4): формовку цилиндрических заготовок с плоскими прикромочными участками на листогибочной машине и последующую деформацию плоских прикромочных участков в догибочной машине. Гибка осуществляется тремя (четырьмя) валками, образующий открытый калибр. Боковые валки перемещаются горизонтально, а верхний валок вертикально для регулирования кривизны заготовки. Диаметр верхнего валка примерно в 1,5 раза больше диаметра нижних валков. После формовки основного профиля, заготовка поступает в машину доформовки кромок [25, 124]. Ведущим производителем оборудования для валковой формовки является «Haeusler». Оборудование данной фирмы используется при изготовлении прямошовных труб на ОАО ВТЗ, АО Загорском трубном заводе (ЗТЗ) [90, 91, 95].

К преимуществам способа можно отнести то, что формуемый профиль трубной заготовки прорабатывается полностью и не имеет плоских участков, но при прогибе и непараллельности валков могут возникнуть следующие дефекты:

переформованная или недоформованная середина заготовки, неравномерная формовка (кривизна) по всей длине.

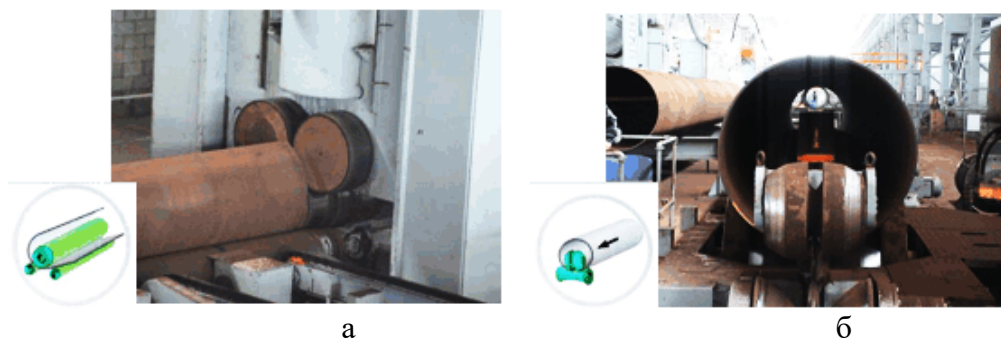


Рисунок 1.4 – Формовки трубной заготовки: (а) на трех валковой листогибочной машине, и (б) доформовка кромок трубной заготовки.

При способе «UOE» после подгибки кромок заготовка поступает на пресс, где предварительно формуется в U-образный профиль с помощью пуансона и гибочных роликов. Окончательная формовка трубной заготовки осуществляется в закрытом штампе, где удерживается и осаживается до получения О-образного профиля [25, 50 – 53, 71 – 76].

По данной технологии производятся трубы на ОАО ЧТПЗ и АО ВМЗ трубы диаметром 508 – 1067 мм длиной до 12 м. Аналогичная схема используется в фирме JFE (Япония) (рис. 2.6а) и Europipe (Германия) диаметром до 1620 мм длиной 18 м (рис. 2.6б, с) [86, 89, 93, 94].

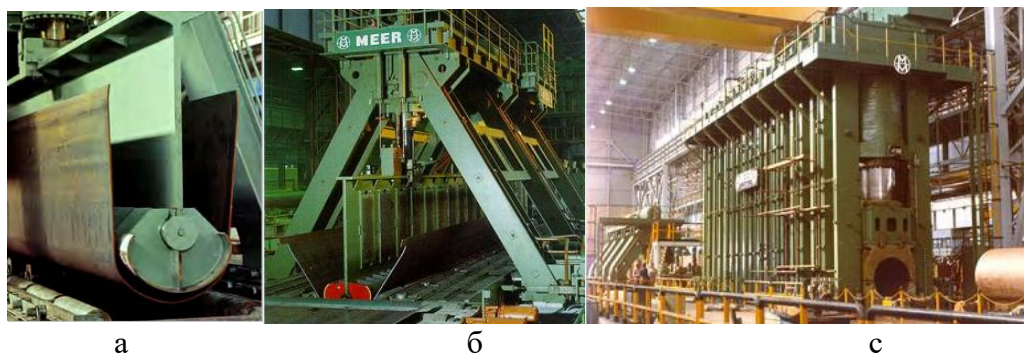


Рисунок 1.5 – Формовка трубной заготовки в (а) - U-образную форму на заводе фирмы JFE; (б) - U-образную форму и (с) - O-образную форму на заводе фирмы Europipe

Преимуществом данной технологии является возможность фиксации и управления заданными параметрами заготовки при формировании профиля трубы за счет использования рабочих штампов, а также высокая производительность. Недостатками являются высокая энергоемкость оборудования, большая масса оборудования и рабочего инструмента, низкая мобильность при переходе с одного

диаметра на другой, связанная со значительными затратами на перевалку инструмента.

В способе формовки JCOE в качестве основного агрегата используется гибочный пресс [71, 72, 94]. Процесс формовки JCOE осуществляется следующим образом: лист с подогнутыми кромками устанавливается двумя манипуляторами, с левой и правой стороны, в положение гибки и подвергается процессу поэтапной формовки по всей длине сначала только с одной стороны, в результате чего получается сечение J-образной формы, затем лист перемещается на другую сторону, и второй манипулятор устанавливает его для гибки другой стороны, таким образом, получается С-образный профиль далее, — О-образный (см. рис. 1.6).



Рисунок 1.6 – Формовка трубной заготовки в J-, С- и О - образную форму.

Трубоформовочный пресс фирмы «SMS MEER» развивает усилие максимум 65 МН и 100 МН при формовке труб длиной до 12,2 м и 18,3 м соответственно. По данной технологии производятся трубы в АО ВМЗ, ОАО ИТЗ и ОАО ЧТПЗ. В 2017 г. открылся цех фирмы ЗАО «Лискимонтажконструкции» по производству труб толщиной стенок от 7 до 60 мм (с возможностью увеличения до 80 мм) и максимальным усилием 120 МН. Данный способ позволяет получить наибольшее соотношение толщины стенки к диаметру трубы и применить при производстве толстостенных труб малого диаметра (см. рис. 2.8).

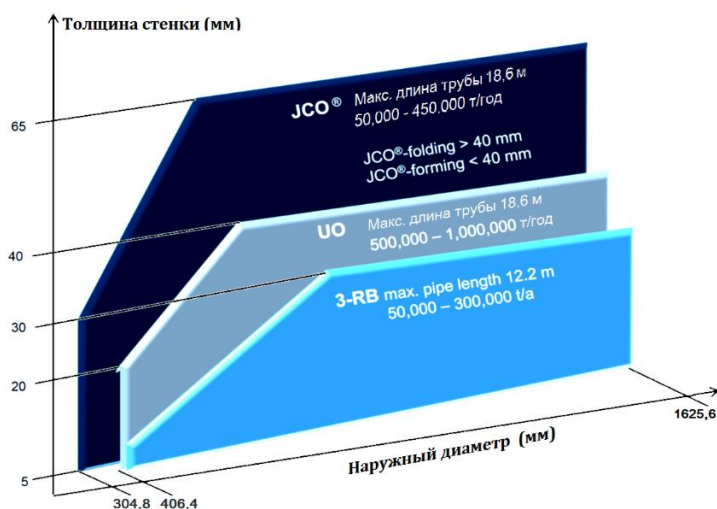


Рисунок 1.7 – Сравнение способов формовки JCOE, UOE и 3-валковой гибки (данные SMS MEER)

В отличие от указанных ранее способов, процесс формовки JCOE обеспечивает высокую степень гибкости за счет: возможности легко варьировать производственные мощности, в том числе при производстве малых партий продукции; быстрой смене инструмента; низким затратам на инструмент и техобслуживание.

Недостатками способа является сложность контроля и жесткой фиксации геометрических параметров заготовки при её формовке по шагам (в отличие от схемы формовки "UOE") из-за многопереходной свободной гибки, что может приводить к дефектам трубной заготовки, а также к недостаточной проработке кривизны заготовки, приводящие к неравномерной кривизне профиля заготовки и формированию плоских участков. При этом на экспандере требуется значительное усилие для устранения плоских участков и овальности профиля трубных заготовок.

1.2 Существующие методы исследования формоизменения заготовки при производстве труб большого диаметра

1.2.1 Методы определения деформационных параметров заготовки при дискретном способе

Теоретические основы, посвященные методам определения геометрических и силовых параметров при гибке трубной заготовки в процессе производства сварных труб, отражены в работах Матвеева Ю.М., Жуковского Б.Д., Чекмарева А.П., Шевакина Ю.Ф. и других. Данные работы в основном посвящены вопросам упругого и упругопластического изгиба [83 – 84; 105 – 108; 115 – 122].

Способы производства электросварных труб по характеру протекания процесса классифицируют на непрерывные и дискретные. Трубы большого диаметра изготавливают, в основном, дискретным способом ($D_o > 530$ мм) из отдельных листов или предварительно сваренных листов ("карт"), а также многослойные трубы из обечаек [88 – 90; 112].

Основными деформационными процессами при производстве труб большого диаметра являются: подгибка (догибка) кромок, формовка основной части профиля трубной заготовки, сборка и сварка, калибровка (экспандирование) и гидроиспытание. Все приведенные процессы действуют

при упругопластической деформации, т.е. основная сложность состоит в определении остаточной деформации [84 – 91; 112].

При решении задач, связанных с определением остаточной деформации трубной заготовки при её формоизменении, используют теорему о разгрузке А.А. Ильюшина, где момент нагрузки заготовки при изгибе равен моменту её разгрузки $M_n = M_p$ [105 – 108, 112, 114 – 135], так как после удаления внешнего усилия происходит пружинения заготовки, вследствие уравнивания моментов напряжений на внутреннем и внешнем слое.

Основным геометрическим параметром после разгрузки является остаточный радиус. В основу расчета остаточного радиуса при изгибе трубных заготовок легло известное классическое уравнение Бернулли-Эйлера $\frac{1}{R} = \frac{M}{EI}$ [104, 107, 112, 114, 128, 129].

Расчеты интенсивности напряжений при формовке трубной заготовки проводили с учетом критерия пластичности Фон Мизеса, полученного исходя из условия постоянства энергии формоизменения $\sigma_i = \sigma_t$, где интенсивность напряжений равна пределу текучести материала и рассчитывается по уравнениям, представленным в классических работах [15-18].

В основу решения задач об определении напряжений в трубе при её раздаче на участке экспандирования и гидроиспытания легло решение задачи Лямэ о нагружении цилиндра давлением. Решение задачи Лямэ представлено в работах [100, 123, 134, 137, 138], в которых дано общее уравнение для различных видов нагружения при определении радиальных и тангенциальных напряжений по толщине стенки цилиндра.

1.2.2 Методы расчета технических параметров и исследования процессов формовки по схеме JCOE

В современной технической литературе вопросам изучения процессов формовки заготовок по схеме "JCOE" уделен ряд научных статей, представленных в отечественных журналах: "Известия ВУЗов. Черная Металлургия", "Сталь", "Производство проката", "Металлург" и зарубежных статьях [30 – 35].

Производство труб по схеме JCOE состоит из следующих деформационных процессов (см. рис. 1): шаговая подгибка кромок по длине, пошаговая формовка основной части профиля, доформовка (при производстве толстостенных труб), сборка и сварка, пошаговое экспандирование по всей длине. Каждый из представленных процессов состоит из двух этапов: нагрузка трубной заготовки и разгрузка после снятия внешних сил.

Подгибка кромок. Первым деформационным процессом является подгибка кромок. Данному процессу посвящены статьи [32-35, 59-62], включающие в себя методики расчета геометрических параметров при нагрузке и разгрузке, позволяющие совершенствовать технологию формовки и оценить вероятность образования дефектов. В указанных работах не учитывается неравномерность толщины стенки и механических свойств листовой заготовки.

Шаговая формовка. Основная часть статей посвящена методикам расчета параметров очага деформации, а также поэтапное изменение кривизны трубной заготовки по шагам. В работах [39-42] представлены различные варианты схем нагружения трубной заготовки на прессе шаговой формовки, а также фрагменты расчета величины хода пуансона. Расчетные схемы упрощены и представляют большой интерес в теоретическом обзоре. В работах [52-57] не учтены особенности контактного взаимодействия инструмента с заготовкой для конкретных типоразмеров, т.е. не выявлены зависимости толщины и ширины трубной заготовки для каждого шага по всему периметру, поэтому практическая значимость предложений для остальных типоразмеров не определена. Также в работах не учитывается отличия деформационных режимов второй стороны заготовки от первой.

Доформовка. Процессу доформовки посвящены статьи, лишь описывающие технологию доформовки прикромочных участков, но сам процесс мало исследован, и поэтому предложены методы расчета лишь отдельных параметров.

Сборка и сварка. Основные публикации посвящены изучению изменения геометрических параметров в процессе сборки трубной заготовки. На базе расчетов радиусов, длин и углов определяли координаты фиксированных точек трубной заготовки в очаге деформации сборочно-сварочного стана. В работах [34, 37, 47] не

представлены исследования касаясь влияния сварочных деформаций, возникающих при сварке внутреннего и наружных швов на форму трубы.

Экспандирование. Процесс экспандирования рассматривается в статьях, включающие в себя методики расчета геометрических параметров и оценка напряженно-деформированного состояния. Расчет геометрических параметров трубной заготовки при экспандировании проводили с учетом изменения формы трубной заготовки от исходной геометрии (до экспандирования) до конечной (после разгрузки) [36 – 38, 58]. В указанных публикациях мало исследованы и не представлены расчеты, учитывающие особенности контактного воздействия деформирующего инструмента и трубы при нагрузке.

Вопросам определения и анализа остаточных напряжений в трубах большого диаметра посвящены работы [92 – 98].

При исследовании ранее указанных процессов не учтены, следовательно, не исследованы неравномерности механических свойств листа в поперечном и продольном направлениях; погрешностью в работе деформационного оборудования, отклонение по геометрии деформирующего инструмента; а также не выявлены требования к заготовке до и после исследуемого деформационного процесса.

1.2.3 Современные методы исследования формоизменения заготовки на основных деформационных участках линии ТЭСА 1420.

Экспериментальные методы. Для совершенствования технологии и разработки методик расчета формоизменения трубной заготовки, недостаточно иметь теоретические данные и общие представления о процессе. Поэтому необходимо проведения экспериментов, непосредственно на производственных участках.

Несмотря на то, что формулы и методики расчета формоизменения заготовки, должны быть подтверждены экспериментально, данному вопросу уделено небольшое количество публикаций [36 - 40].

На данный момент определения геометрических параметров заготовки при экспериментальном исследовании проводят следующими методами: 1) измерение геометрии с помощью шаблонов, рулеткой, т.е. эксперимент проводят с применением измерительных приборов и инструментов, используемых

непосредственно на производстве; 2) фото – и видеосъемки процессов с дальнейшей обработкой в Cad-системе.

Методы моделирования формоизменения заготовки. Развитие современного производства сделало компьютерное моделирование ключевым при разработке новых видов продукции металлургического производства.

При проведении эксперимента непосредственно на производственных участках не представляется возможным осуществлять более глубокие исследования, поэтому наряду с производственными экспериментами проводят математические и физические исследования.

Математическое моделирование труб большого диаметра методом конечных элементов проводят в программных комплексах Deform 2D/3D, ANSYS, LS-DYNA, Marc (Mentat) и Abaqus. Данный метод используют для оценки напряженно-деформированного состояния, исследования особенностей контакта деформирующего инструмента с деформируемой заготовкой при нагрузке и определения остаточной деформации после разгрузки [119 – 123].

Физическое моделирование выполняют в лабораторных условиях на специальных установках. С помощью физической модели проверяют правомерность использования аналитических методов и теоретических гипотез, определяют коэффициенты, отражающие особенности конкретного процесса и деформируемой заготовки [48, 115].

1.4 Дефекты сварных труб большого диаметра и методы их определения

Дефекты труб большого диаметра в соответствии с различными нормативными документами классифицируют на следующие группы: поверхностные и внутренние дефекты основного металла, поверхностные и внутренние дефекты сварного соединения; дефекты геометрии труб.

Дефекты сварного соединения и геометрии труб, возникают при производстве заготовки и имеют технологическое происхождение.

Геометрические параметры измеряют как с помощью неконтактных стационарных и мобильных устройств, так и ручными методами.

Если современное оборудование по измерению геометрии обеспечивает получение данных по всему периметру заготовки из-за визуализации данного параметра, то получение данных по механическим свойствам считается трудоемким

процессом. Для получения наиболее точных данных по механическим свойствам проводят испытания вырезанных из заготовок образцов. При использовании данного метода нет возможности получения данных о механических свойствах по всему периметру заготовки, поэтому часто используют неразрушающий метод контроля.

1.5 Выводы по главе

На основе обзора современных способов производства труб большого диаметра можно сделать вывод о том, что:

1. Обзор современного рынка магистральных трубопроводов показал, что с возрастающей конкуренцией в области труб большого диаметра повысились требования к качеству продукции и возникла необходимость снизить себестоимость продукции в том числе снижение затрат на разработку и освоение новых видов продукции.

2. Шаговая формовка по схеме JSOE является наиболее гибким способом производства труб большого диаметра, позволяющая получить высокопрочные трубы с заданным соотношением диаметра к толщине стенки.

3. Требуется совершенствование существующих методов расчета формоизменения трубной заготовки с учетом неравномерности механических свойств.

4. Необходимы методы исследования для получения более точных данных по геометрии трубной заготовки и деформирующего инструмента, позволяющие производить оценку и корректировку существующих режимов формовки.

2 Экспериментальные исследования формоизменения заготовки на разных стадиях ее изготовления

Программа проведения исследований

Исследования процесса формоизменения заготовок проводили в производственных и лабораторных условиях.

В производственных условиях экспериментальные исследования проводили в линии ТЭСА 1420 на участках пресса подгибки кромок (ППК), пресса шаговой формовки (ПШФ), доформовочного пресса (ДФП), сборочно-сварочного стана (ССС) и гидромеханического экспандера (ГМЭ).

В лабораторных условиях проводили физическое моделирование процесса шаговой формовки.

В таб. 2.1 представлена программа проведения экспериментальных исследований

2.1 Проведение первого этапа исследования

На сегодняшний день было проведено ряд исследований по установлению геометрических параметров трубной заготовки при производстве труб большого диаметра.

В производственных условиях измерение геометрии заготовки производят следующим образом: определяют радиус прикромочной зоны, используя шаблоны; горизонтальные и вертикальные диаметры определяют с помощью рулетки; высоту подгибки кромок и зазор при помощи линейки.

Для получения данных по всему периметру заготовки авторы работ [3] проводили экспериментальные исследования, которые заключались в следующем:

- фотографирование профиля заготовки после снятия нагрузки;
- видеосъемка профиля заготовки при нагрузке;
- обработка фотографии в Cad-системе [3].

2.1.1 Измерение параметров заготовки на участке формовки

На первом этапе для исследования формоизменения трубной заготовки в линии 1420 был выбран сортамент 813x39 (37,4) мм классом прочности K60(X70), который осваивали по новой технологии. Суть новой технологии заключалось в следующем: после шаговой формовки по всей ширине проводилась доформовка прикромочных участков трубной заготовки.

Таблица 2.1 - Этапы проведения экспериментальных исследований

Этап	Цель проведения э/и	Измеряемые параметры	Оборудование и методы измерения
1	Опробование существующих методов исследования. Сбор исходных данных для математического моделирования.	Координаты точек по периметру трубной заготовки, величину зазора, горизонтальные и вертикальные диаметры	Фото–видеосъемка изменения формы заготовки по шагам и обработка в Cad, измерение шаблоном и рулеткой после деформационного процесса
2	Получение данных для верификации методики расчета (в производственных условиях)	Координаты точек по периметру трубной заготовки, профиль деформирующего инструмента	Система фотограмметрии, 3D лазерный сканер
	Получение данных для верификации методики расчета (в лабораторных условиях)	Координаты точек по периметру образца, прогиб	Штангенциркуль, щупы и измерительные приборы лабораторной машины
3	Определение и оценка факторов влияющих на образование дефектов по геометрии. Определение требований к заготовке до и после процесса формовки на каждом деформационном участке	Координаты точек по периметру трубной заготовки, величина зазора, горизонтальные и вертикальные диаметры	Измерение шаблоном и рулеткой после деформационного процесса

Так как основной сложностью при производстве рассматриваемого сортамента являлось не достаточность усилия деформационного оборудования для производства заготовок с необходимыми параметрами, то при анализе результатов исследования были собраны и использованы данные не только по геометрическим параметрам заготовок, но и по энергосиловым параметрам полученные, с приборов деформационного оборудования.

На участке формовки перед ППК нанесли разметки на торцы исходного листа от центра к краям таким образом, чтобы расстояние между разметками было равно шагу подачи (рис. 2.1). Положение разметок фиксировалось в процессе формоизменения заготовки по деформационным участкам.

При помощи программы КОМПАС–3D V10 была произведена обработка фотографий профиля трубной заготовки: до нагрузки, при нагрузке и после разгрузки по методике [4], которая включает следующие операции: перенос фотографии в Cad систему; нанесение фиксированных точек на физическую разметку заготовки; построение координатных осей на фотографии; получение координат фиксированных точек в масштабе 1:1 для наружной и внутренней поверхностей заготовки.

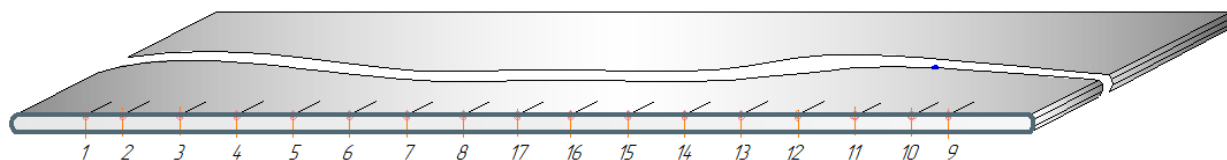


Рисунок 2.1 - Разметка исходной заготовки

Участок ППК. В цеховых условиях после подгибки кромок проводили измерения ширины и высоты подогнутой трубной заготовки. Замеры проводили по граничным точкам участков кромки. Высоту кромки Y' замеряли при помощи линейки, которую устанавливали относительно транспортирующего рольганга. При необходимости производили измерение однорадиусным шаблоном для определения отклонения по форме прикромочных участков.

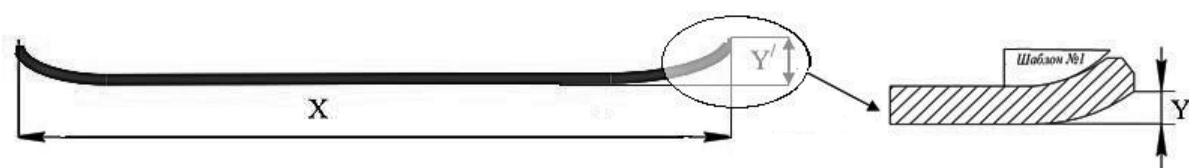


Рисунок 2.2 - Контроль основных параметров кромки после разгрузки

Для получения корректных данных по форме трубной заготовки, необходимо использовать оборудование, позволяющего проводить измерения без необходимости устанавливать параллельно оси заготовки

На участке ПШФ исследования выполнили как с помощью фото – и видеосъемок непосредственно на прессе, так и на выходе из пресса на контрольно-измерительных стендах с помощью фотосъемки торцов заготовки и замеров прикромочной области шаблоном.

Видеозапись процесса формовки на ПШФ выполнялось со стороны оператора, т.е. был зафиксирован передний торец заготовки. Обработка видео включает следующие операции: извлечение кадров с видеозаписи; получение и обработка необходимых фотографий.

При проведении фотосъемки шаговой формовки останавливали процесс формовки заготовки в начале процесса нагрузки (инструмент находится в нулевом положении); момент нагрузки, когда инструмент находился в конечном положении и разгрузки формируемого сегмента на отдельных шагах. Полученную фотографию профиля трубной заготовки переносили в программу КОМПАС 3D и отмасштабировали. На фотографии находили разметку, нанесенную специальным маркером на торцы листа, далее отмечали цифрой, соответствующей номеру шага.

При обработке фотографий, выполненных непосредственно: на прессе, начало координаты точек заготовки фиксировали относительно крайних точек бойков по оси X и оси формовочного ножа Y; на контрольно-измерительных стендах началом координаты точек являлась разметка, нанесенная на заготовке, соответствующая последнему шагу. С обработанных фотографий получили координаты фиксированных точек контура заготовки: $[X_i; Y_i]$; ширину контактных и неконтактных участков.

Алгоритм обработки фотографии в соответствии выше изложенной методикой включает: нанесение координатных осей; нанесение базовых точек на внутренний контур заготовки; перенос значений координат точек из Компас в таблицы Excel; пересчет координат точек с учетом МК в таблицах Excel; получение геометрических параметров с итогового контура.

Сравнительный анализ результатов, полученных с видео- и фотосъемок показал, что из-за низкой разрешенной способности оптической системы аппарата

при видеосъемке резкость границ, полученных с видеосъемок контура трубной заготовки значительно ниже, чем с фотографий, полученных с фотосъемок; а зона границы размытости в несколько раз выше.

Целью видео- и фотосъемки, проведенные непосредственно на ПШФ было определение данных по геометрии трубной заготовки на каждом шаге формовки в состоянии максимальной нагрузки и разгрузки. На рис. 2.3 представлены фотографии трубной заготовки на 11 шаге: при нагрузке – конечное положение деформирующего инструмента (а) и разгрузке – после отвода деформирующего инструмента (б).

При определении масштабного коэффициента учитывали толщину заготовки и размеры деформирующего инструмента (нижних бойков и пуансона). Для определения масштабного коэффициента при обработке торцов трубной заготовки на контрольно-измерительном стенде, кроме толщины стенки использовались рулетки и линейки.

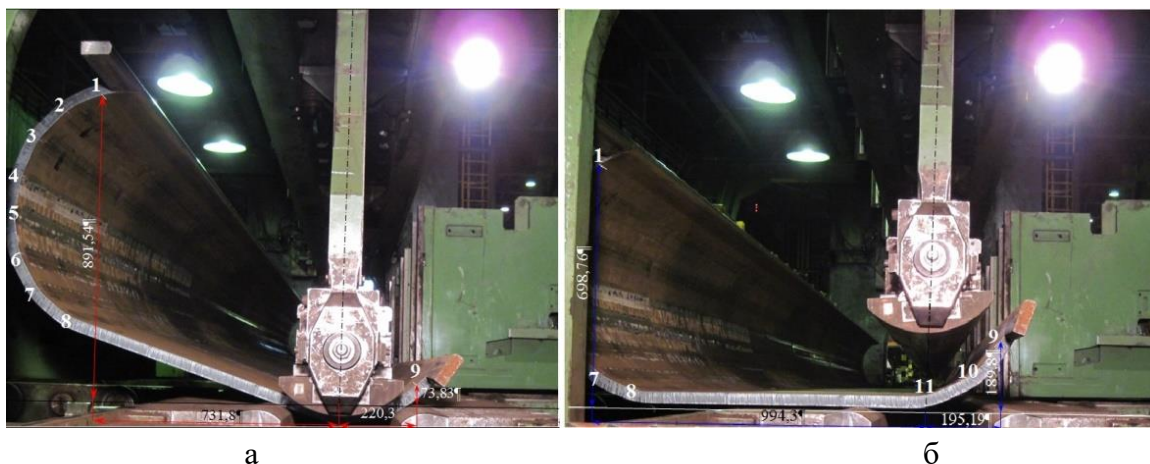


Рисунок 2.3 – Фотокадры трубной заготовки на 11 шаге формовки

После процесса пошаговой формовки (ПШФ) трубной заготовки по всей ширине, были проведены замеры геометрических параметров 5 трубных заготовок по наружной поверхности. У всех 5 трубных заготовок была измерено расстояние между кромками, величина, которой находилась в диапазоне от 140 – 155 мм. Минимальный размер шлица было у трубной заготовки 813x37,4 мм с переднего торца, максимальное значение у трубной заготовки 813x39мм с заднего торца (см. рис. 2.4).

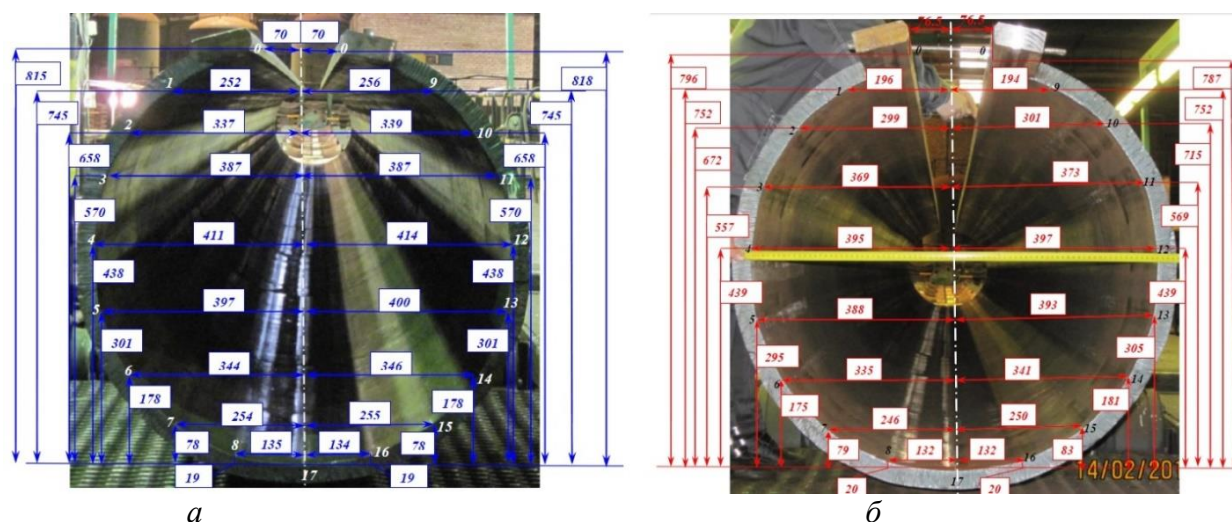


Рисунок 2.4 - Координаты точек разметки ТЗ после выхода из ПШФ: а) с минимальным расстоянием между кромок; б) с максимальным расстоянием между кромок.

Абсолютная величина овала трубной заготовки после прессы шаговой формовки находится в диапазоне от 0 до 43 мм. Относительная величина не превышает 6%.

Таблица 2.2 – Геометрические параметры трубной заготовки после ПШФ

№ трубы	Параметры измерений по наружной поверхности	Измерения проведенные вручную	Обработанная с помощью КОМПАС	Расхождение	
				Абсолют., мм	Относит., %
813х37,4	Ширина шлица	140	140	+0	-
	Горизонтальный диаметр	855	898	+43	5
	Вертикальный диаметр	843	840	-3	0,2
813х39	Ширина шлица	150	153	+3	2
	Горизонтальный диаметр	845	845	+0	-
	Вертикальный диаметр	845	841	-4	0,2

Зная координаты точек трубной заготовки, представленные на рис. 2.5, определили средний радиус кривизны в 17 сечениях, как радиус описанной окружности по формуле (2.1): $R = \frac{abc}{4S}$ (2.1)

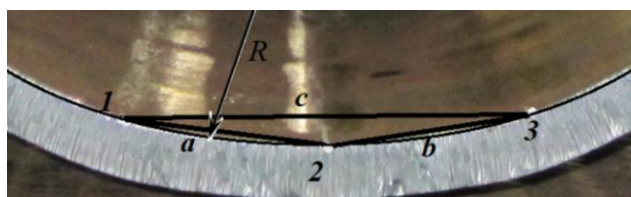


Рисунок 2.5 – Схема для определения радиуса по трем точкам

$$a = \sqrt{(x_{2i} - x_{1i})^2 + (y_{2i} - y_{1i})^2} \quad (2.2)$$

$$b = \sqrt{(x_{3i} - x_{2i})^2 + (y_{3i} - y_{2i})^2} \quad (2.3)$$

$$c = \sqrt{(x_{3i} - x_{1i})^2 + (y_{3i} - y_{1i})^2} \quad (2.4)$$

Площадь треугольника определим по формуле Герона:

$$S = \sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)} \quad (2.5)$$

где a , b , c – стороны треугольника; p – полупериметр.

На рис. 2.6 представлен график распределения среднего радиуса кривизны трубы с большим горизонтальным и вертикальным диаметром соответственно. По этим графикам можно сделать вывод о том, что трубная заготовка с горизонтальным овалом имеет меньшее или равное значение радиуса в позиции 3ч и 9ч, чем в позиции 6ч; а заготовка с горизонтальным овалом имеет большее значение радиуса в позиции 3ч (на 30%) и 9ч (5%), чем в позиции 6ч. Следовательно, при одинаковых режимах формовки трубные заготовки после ПШФ могут иметь разные геометрические параметры. Для установления причин отклонений по форме проведены экспериментальные исследования, результаты представлены в четвертой главе.

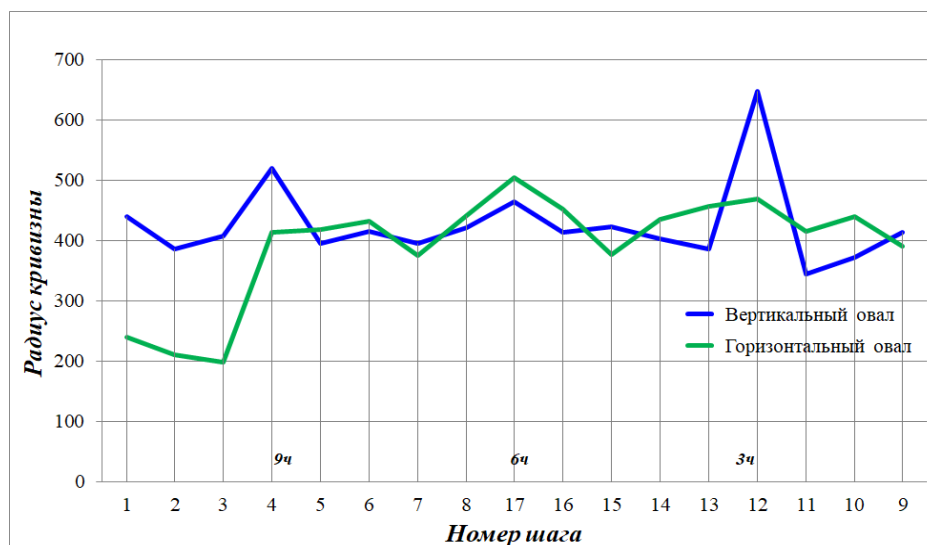


Рис. 2.6 – График распределения среднего радиуса трубной заготовки после ПШФ

На сборочно-сварочном стане ограничена возможность сборки трубной заготовки при большом значении ширины шлица. Для трубы 813 с толщиной стенки 37,4(39) мм ширина шлица не должна превышать 100 мм. Первый пресс шаговой формовки не обеспечивает заданную ширину шлица, так среди измеренных пяти трубных заготовок после первого пресса шаговой формовки минимальный размер ширины шлица равен 140 мм, поэтому после шаговой формовки трубная заготовка отправляется на второй пресс, где кромки догибаются снаружи.

2.1.2 Измерение параметров заготовки на участке сборки и экспандирования

На участке сборки и сварки технологического шва исследования выполнили с помощью фотосъемок непосредственно на прессе и на выходе из пресса на контрольно-измерительных стендах провели измерения торцов 5 трубных заготовок с помощью рулетки и шаблона, получив следующие данные: вертикальный и горизонтальный диаметры ТЗ с торцов после ССС; наружный и внутренний периметр, а также координаты точек ТЗ. Замеры вертикального и горизонтального размеров ТЗ выполняли относительно ранее фиксированных размеченных точек на выходе из ССС. На рис. 2.7а представлена фотография трубной заготовки при сборке, обработанная с помощью программы Компас.

Для оценки изменения радиуса при сборке, был произведен расчет среднего радиуса кривизны по координатам 3 точек. Данные координаты, были получены после обработки фотографии в программе КОМПАС. На рис. 2.7б представлен график распределения среднего радиуса кривизны по 17 точкам: после пресса пошаговой формовки по всей ширине; при сборке на сборочно-сварочном стане; разность среднего радиуса кривизны после пошаговой формовки по всей длине и сборки на ССС.

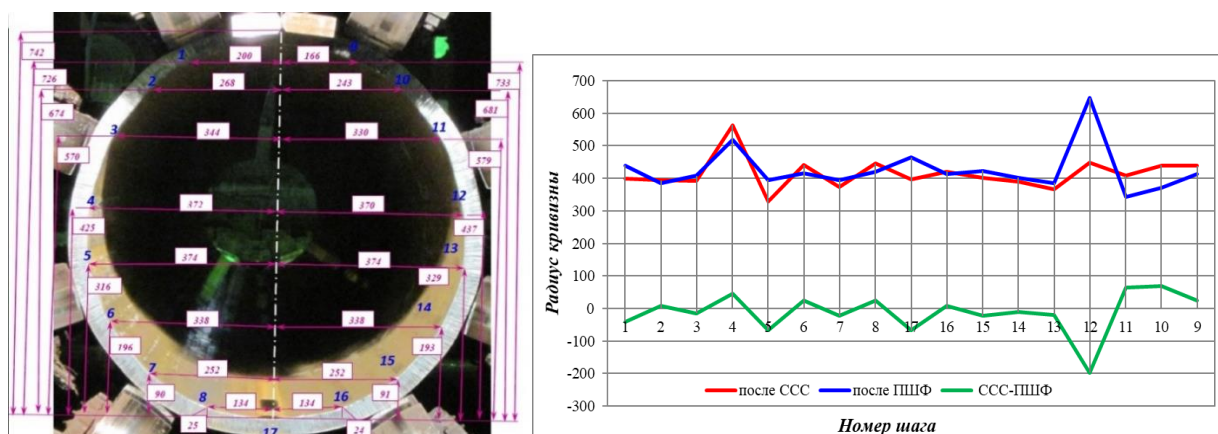


Рис.2.7 – Координаты точек разметки заготовки при сборке на ССС (а) и график распределения среднего радиуса кривизны после ПШФ и сборке ССС

Так как труба до экспандирования овальная, проводили измерение не только диаметра трубы, но и периметра. Периметр головки экспандера 2 должен быть меньше, чем периметр трубы 1, иначе головка не войдет в трубу (см. рис. 2.8).

Процесс экспандирования можно разделить на два основных этапа: получение круглого поперечного сечения (формовка) и увеличения диаметра до заданной величины (раздача). На рис. 2.9 представлена схемы поэтапного изменения формы

трубы при экспандировании: а – труба овального сечения (начало процесса формовки); б – труба круглого сечения (конец процесса формовки, начало раздачи); в – труба круглого сечения (конец процесса раздачи); г – готовая труба (после разгрузки).

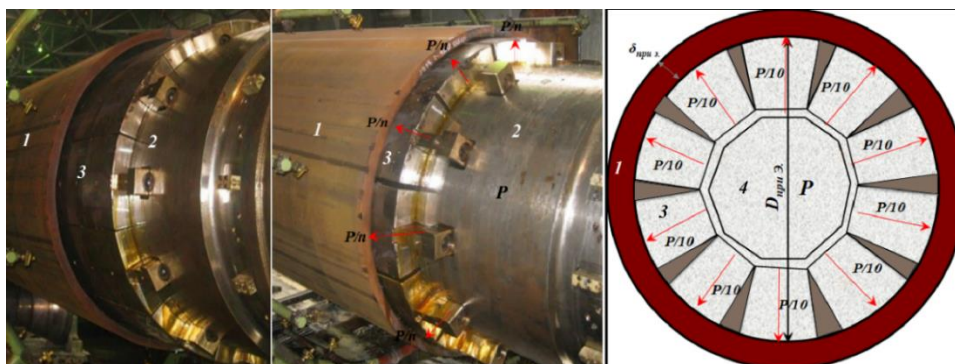


Рисунок 2.8 - Раздача трубной заготовки на участке экспандирования

Процесс экспандирования можно разделить на два основных этапа: получение круглого поперечного сечения (формовка) и увеличения диаметра до заданной величины (раздача). На рис. 2.10 представлена схемы поэтапного изменения формы трубы при экспандировании: а – труба овального сечения (начало процесса формовки); б – труба круглого сечения (конец процесса формовки, начало раздачи); в – труба круглого сечения (конец процесса раздачи); г – готовая труба (после разгрузки).

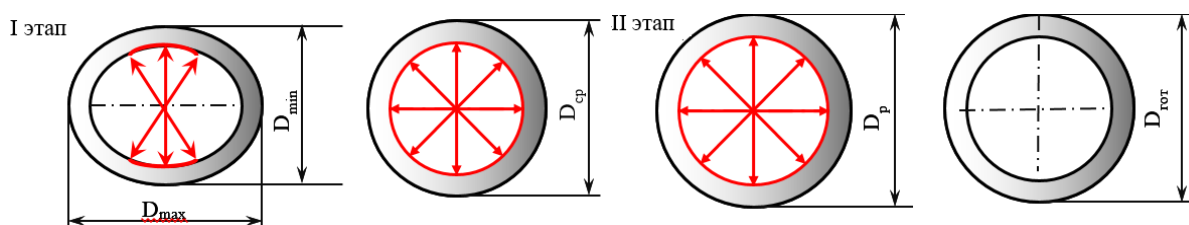


Рисунок 2.9 - Поэтапное изменение формы трубы при экспандировании: а) начало процесса формовки; б) начало процесса раздачи; в) конечная раздача (нагрузка); г) итоговый профиль (разгрузка).

На участке экспандирования по результатам измерений геометрических параметров трубы до и после экспандирования получили следующие данные: координаты точек по торцам; диаметры и периметр трубы по точкам, ранее нанесенным на исходный лист; длину трубы.

Диаметр измеряется специальной линейкой, нутромером, либо рулеткой. Периметр концов трубы измерили до $П_0$ и после $П_П$ экспандирования. При измерении периметра необходимо следить, что бы лента рулетки располагалась в плоскости перпендикулярной оси трубы.

Овальность концов трубы до калибрования не должна превышать 4% от номинального наружного диаметра трубы. Овальность после калибрования, исключая участок сварного шва должна быть не более 1 % от номинального диаметра трубы стенки до 20 мм и не более 0,8 % для труб с толщиной стенки свыше 20 мм. Овальность определяется как отношение разности значений максимального и минимального диаметров к номинальному значению

$$O_{дэ} = \frac{D_{\max 0} - D_{\min 0}}{D_{\Pi}} \times 100\% \leq 4\% \quad O_{пэ} = \frac{D_{\max 0} - D_{\min 0}}{D_{\Pi}} \times 100\% \leq 0,8 - 1\% \quad (2.6-2.7)$$

Таблица 2.3 - Параметры трубной заготовки до и после экспандирования

Параметры	До экспандирования		После экспандирования	
толщина стенки, мм	37,4	39	37,4	39
Периметр	2299,65	2293,36	2319,12	2309,07
степень остаточной деформации, %	-	-	0,85	0,68
Длина трубы уменьшилась			48 мм	24 мм
овальность концов трубы, мм	9	11	3	4
овальность концов трубы, %	1,11	1,35	0,49200492	0,37

Степень остаточной деформации металла трубы после экспандирования определяется по формуле:

$$E_{co} = \frac{\Pi_{\Pi} - \Pi_o}{\Pi_o} \times 100\% = 0,8 \div 1,2\%. \quad (2.9)$$

На основе экспериментального исследования на первом этапе можно сделать следующие выводы: в условиях цеха сложно получить точные замеры геометрических параметров, как ручным способом, так и способом фотографирования; при измерении высоты подгибки вручную погрешность может достигать 10%, так как после подгибки трубная заготовка находится на последовательно расположенных друг за другом рольгангах, что усложняет процесс измерения, вследствие невозможности определения нулевой точки (0; 0); для фиксации геометрии кромки на фотоаппарат, необходимо установить штатив параллельно торцу трубной заготовки напротив подогнутой кромки, так как доступ к трубной заготовке ограничен на участке подгибки кромок; не всегда удастся правильно расположить штатив и фотоаппарат, в результате усложняется процесс обработки фотографии и возрастает погрешность полученных данных [4,5].

Обработанные фотографии профиля трубной заготовки, произведенные в программе КОМПАС–3D V10, позволили определить длину контактных

прямолинейных участков по внутренней поверхности заготовки и плоских участков на наружной поверхности, возникшие в результате контакта с бойками (см. рис 2.10).

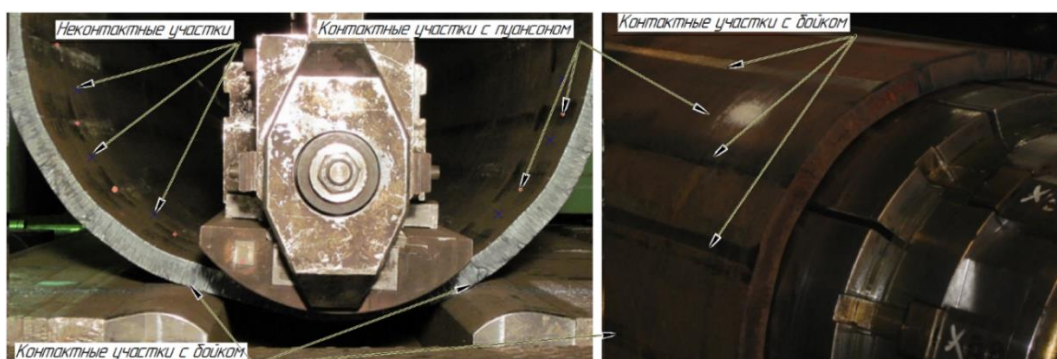


Рис. 2.10 – Контактные и неконтактные участки деформирующего инструмента с заготовкой

Длина неконтактных участков по внутренней поверхности при гибке на ПШФ равна $L_{н.к.} = (0,2-0,3)L_k$, а контактных по наружной $L_{к.бойка} = (0,08-0,1)H$, где L_k – длина контакта с пуансоном, H – величина хода.

2.2 Второй этап. Разработка методики и измерение геометрических параметров бесконтактными методами

На втором этапе проводили исследования комплексом оборудования для неконтактных геометрических измерений деформируемых заготовок и инструмента, которые должны отвечать следующим требованиям:

- продолжительность отдельных измерений не должна превышать нескольких минут, так как измерения планируется проводить не только на контрольно-измерительных стендах, но и в паузах между актами деформации, недалеко от прессов;
- измерения должны проводиться без необходимости устанавливать оборудование параллельно оси заготовки;
- результаты измерений геометрических параметров должны быть сразу представлены в цифровом формате в реальном времени;
- иметь линейную точность 20–50 мкм для тел порядка 5–10 метров (с целью последующего расчета перемещений, деформаций, отклонений);
- быть нечувствительными к вибрации;
- средства измерения должны быть компактными, мобильными и легко переносимыми вручную;

- непосредственными результатами измерений геометрических параметров объектов должны быть пространственные координаты отдельных точек обследуемых заготовок, а также трехмерное изображение поверхностей заготовок и технологического инструмента.

Как показывает обзор имеющихся на рынке средств неконтактного измерения геометрических параметров, системами, удовлетворяющими указанным требованиям, являются фотограмметрические измерительные системы в сочетании с 3D-лазерными ручными сканерами.

2.2.1 Разработка методики измерения геометрических параметров

Экспериментальные исследования процессов формоизменения трубной заготовки для трубы 813х39 мм в линии ТЭСА 1420 в качестве измерительного оборудования использовали: систему фотограмметрии AICON DPA фирмы AICON DPA GmbH и лазерного 3D-сканирования Handyscan 3D EXAScan фирмы Creaform.

Разработка методики измерения геометрических параметров системой фотограмметрии. Метод измерения геометрических параметров системой фотограмметрии состоит из трех основных этапов: нанесения меток на элементы изделия; фотографирование объекта и обработка полученных фотографий.

Для масштабирования и сшивки результатов используются маркеры (метки) различных видов, наклеиваемые на элементы изделия, которые требуются проконтролировать. Прежде всего, на объект наносятся (наклеиваются или намагничиваются) метки двух типов с разными назначениями: кодовые 1 и некодвые (простые) 2 метки. Кодовые метки предназначены для автоматического определения положения камеры при фотосъемке с разных сторон. Количество кодовых меток должно быть таковым, чтобы позволить должным образом объединять отдельные снимки, то есть в соседних снимках должно быть минимум 3 общих кодовых метки, желательно больше. Простые метки для определения координаты точек заготовки. Количество меток и их расположение относительно друг друга определяли в зависимости от режимов формоизменения и количества необходимых данных.

На рис. 2.11 представлено расположение меток на исходном листе и деформационном оборудовании. Для определения масштаба объекта один из размеров должен быть известен, данным размером является расстояние между

масштабными линейками 3, а началом координат является реверсивный крест 4. Масштабные линейки и реверсивный крест, размещааемые в окрестности объекта.

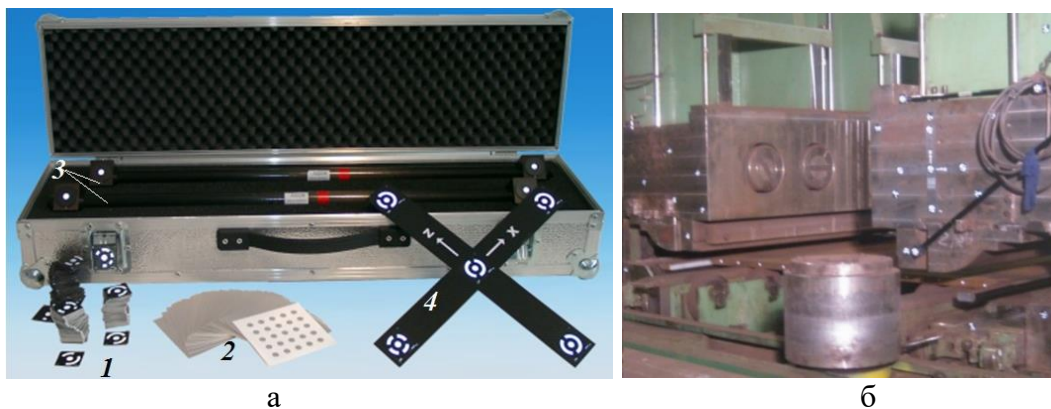


Рис. 2.11 – а - метки и адаптеры; б- расположение меток и адаптеров на прессе подгибки кромок и листе до деформации.

Целевой объект фотографируется с помощью цифровой камеры с матрицей высокого разрешения с разных сторон из не менее 3-х различных ракурсов, положения фотокамеры должны как бы описывать полусферу вокруг измеряемого объекта, так как при фотографировании необходимо получить координаты всех нанесенных меток. Следовательно, производить фотосъемку измеряемого объекта нужно так, чтобы охватить как можно больше меток, т.е. каждая метка попала на множество снимков (рис. 2.12).

Для определения перемещений фотографирование проводили до и после деформации. Полученные фотографии обрабатывали либо сразу в процессе их получения (онлайн обработка), либо после (офлайн обработка) с помощью программы Rapidform. Эта программа, работающая на обычном ноутбуке, рассчитывает пространственные координаты всех указанных точек (меток). Расчет основан на принципе пространственной триангуляции и производится полностью автоматически. Предварительная калибровка системы не требуется, так как программа использует интегрированную процедуру одновременной с замером калибровки.



Рис. 2.12 – Фотографирование целевого объекта с разных позиций (а, б) и обработка полученных фотографий (в)

Методика измерения геометрии профиля инструмента системой 3D лазерного сканирования. Процесс измерения геометрии профиля деформирующего инструмента состоит из следующих этапов: подключение и калибровка устройства, подготовка и сканирование объекта, обработка результатов. Подключается 3D-сканера 1 по интерфейсу к переносному компьютеру 2 и производится калибровка устройства, с помощью специальной калибровочной плиты 3 (см. рис. 2.13).



Рис. 2.13 – Подключение (а) и калибровка (б) сканирующего устройства.

В произвольном порядке наклеиваются светоотражающие маркеры (см. рис. 2.14б). Если поверхность сканирования блестящая, то перед тем, как наклеить маркеры, следует нанести на поверхность спрей (см. рис. 2.14а). Производится сканирование объекта. Программное обеспечение позволяет в режиме реального времени отслеживать ход сканирования и вносить необходимые коррективы (см. рис. 2.14в). Для получения более мелкого шага сетки модели в детализированных зонах объекта можно увеличить разрешение непосредственно в процессе сканирования.



Рис. 2.14 – Подготовка поверхности инструмента и сканирование объекта: а) нанесение спрея на поверхность объекта; б) наклейка маркеров; в) сканирование инструмента ППК

Совместимость системы фотограмметрии и лазерного 3D-сканера

При лазерном сканировании поверхности крупного тела высокая точность измерений достигается в результате совместной обработки данных фотограмметрического метода и лазерного сканирования, главным образом, за счет точной сшивки участков поверхностей этого тела, осуществляемой специальным программным обеспечением.

Совместное измерение проводится в следующей последовательности: наклеиваются некодовые и кодовые метки, реверсивный крест и масштабные линейки; производится фотографирование измеряемого объекта с помощью системы фотограмметрии с разных сторон и сканирование объекта. Лазерный сканер производит сканирование по меткам, координаты которых измерены системой фотограмметрии (см. рис. 2.15а).

Совмещение результатов измерения производят системами AICON DPA и Handyscan 3D EXAscan, обработка данных производится Rapidform (3D Geomagic), позволило получить трехмерную геометрическую модель инструмента ППК (см. рис. 2.15б).

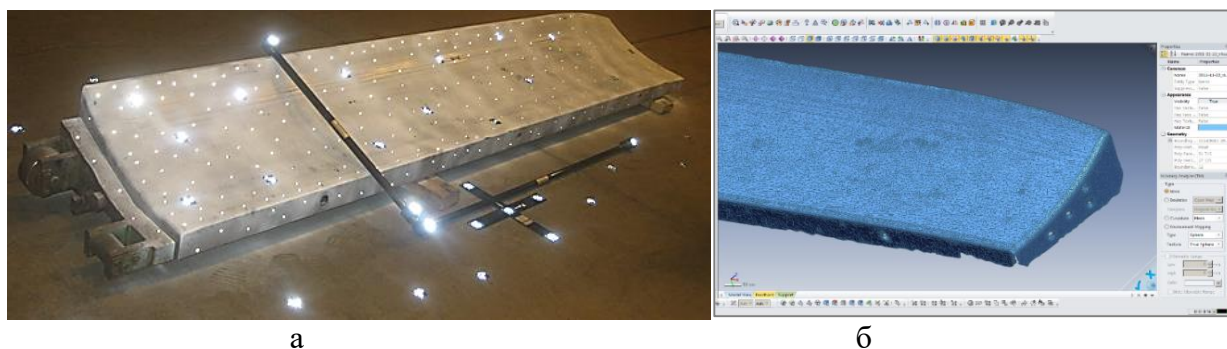


Рис. 2.15 – Матрица ППК: а) с нанесенными метки, реверсивным крестом и масштабными линейками; б) Созданная поверхность по сетке в программе Rapidform

2.2.2 Измерение параметров заготовки на участке формовки

Подгибка кромок. Перед деформацией на торцы исходного листа нанесли метки с нумерацией фиксированных точек от центра листа на расстояние шага подачи. Для получения более точных данных в прикромочной области были нанесены дополнительные метки. Положение ранее нанесённых меток фиксировалось в процессе формоизменения заготовки по участкам формовки. На рис. 2.16 представлены расположение меток на заготовке после подгибки кромок.



Рис. 2.16 – Расположение меток на заготовке после подгибки кромок

Результатом измерений методом фотограмметрии являются координаты 23 точек. Координата каждой точки соответствует координате центра каждой метки, нанесенной на заготовку. При обработке данных с помощью программного обеспечения выдаются координаты точек в трех направлениях (X;Y;Z), расположенные относительно центра реверсивного креста, т.е. центр креста является началом координат (0;0;0).

Для дальнейшего анализа результатов эксперимента перевели систему координат относительно трубной заготовки, где началом координат является середина заготовки. Для определения координаты точек трубной заготовки в новой системе координат произвели: перенос начала координат и поворот осей координат. На рис. 2.17 видно, что исходная листовая заготовка и трубная заготовка после подгибки кромок имеет выпуклую форму, т.е. координата точки 12 по оси Y находится выше координат точек 5 и 19. Отклонение от плоскостности по ширине листа образовывается при прокате на листопрокатных станах. Данный факт учтен при дальнейшем исследовании и представлен в главах 3 и 4.

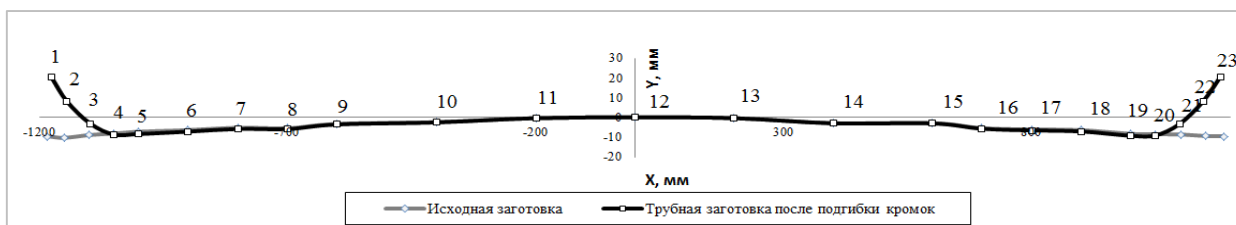


Рис. 2.17 – Распределение координат точек, полученных методом фотограмметрии

В таб. 2.4 сведены данные по результатам экспериментально-аналитических исследований в прикромочной зоне методом фотограмметрии.

Таблица 2.4 – Координаты точек ТЗ в прикромочной зоне до и после ПК

Точка	С левой стороны					С правой стороны					Ось
	До подгибки		После подгибки			До подгибки		После подгибки			
	X	Y	X	Y	R	X	Y	X	Y	R	
5	999,45	-8,32	999,36	-9,32		-1000,43	-7,30	-1000,29	-8,43		19
4	1048,86	-8,60	1048,29	-9,19	430	-1050,26	-8,20	-1049,48	-8,76	401	20
3	1099,45	-8,66	1097,11	-3,47	409,3	-1100,35	-8,96	-1097,69	-3,18	408,2	21
2	1149,91	-9,41	1144,89	8,07	409,1	-1150,28	-10,36	-1145,04	8,11	290	22
1	1187,50	-9,57	1179,92	20,56		-1183,81	-9,57	-1175,96	20,3		23

После подгибки кромок вручную замерыли высоту подгибки кромки с правой стороны и зафиксировали на фотоаппарат, результаты измерений представлены в табл. 2.5.

Таблица 2.5 - Высота подгибки кромок

Метод измерения	Высота, мм	Погрешность	
		мм	%
Фотограмметрический	74,88	0	0
Ручной	80	5,12	6,8
Фотографирование и обработка Cad	73,5	1,38	1,7
Аналитический расчет	76,7	1,82	2,4

На рис. 2.18 представлена оценка величины износа пуансона по результатам сканирования, где поверхность окрашенная: желтым цветом, имеет минимальные отклонения; а синим цветом имеет максимальный износ. Участки, имеющие отклонение «-» указывают на то, что данные участки имеют контакт с заготовкой при нагрузке, т.е. между ними возникает трение, которое приводит к износу инструмента. На средней поверхности контактные участки либо малы, либо отсутствуют. Следовательно, прикромочная зона после деформации имеет форму отличную от эвольвенты.

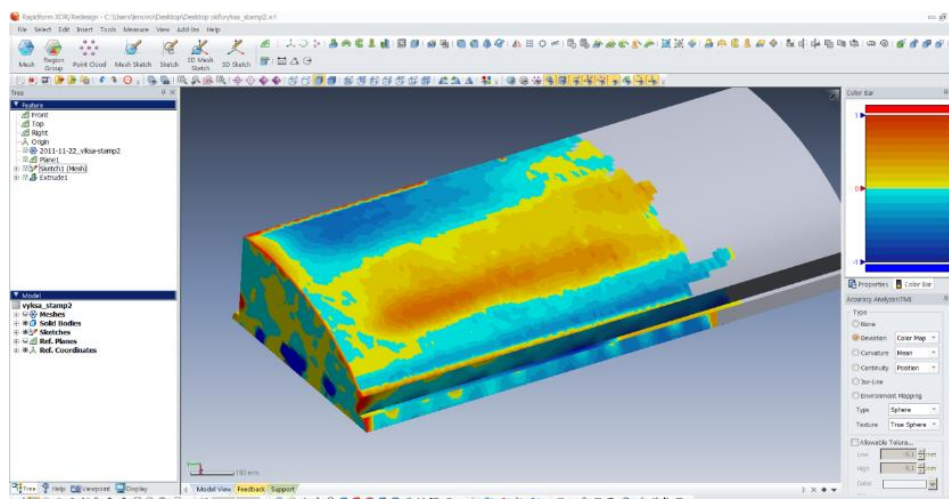


Рис. 2.18 – Оценка величины износа пуансона в программе Rapidform

Шаговая формовка. Фотографирование торца заготовки на ПШФ выполняли с помощью системы фотограмметрии, на расстояние 1–3 м от объекта съемки для охвата всех меток, нанесенных на трубную заготовку.

В результате эксперимента были получены координаты точек трубной заготовки после формовки каждого шага. Началом системы координат являлся реверсивный крест, расположенный на ноже ПШФ. Для упрощения дальнейшего анализа полученных данных перевели систему координат относительно середины трубной заготовки.

На рис. 2.19 представлены координаты точки в системах ZOX_0 и XO_1Y . Обозначим через A и B координаты нового начала O , по старой системе, через φ —угол поворота координатных осей и, наконец, через Z , X_0 и X , Y —координаты произвольной точки M старой и новой систем соответственно.

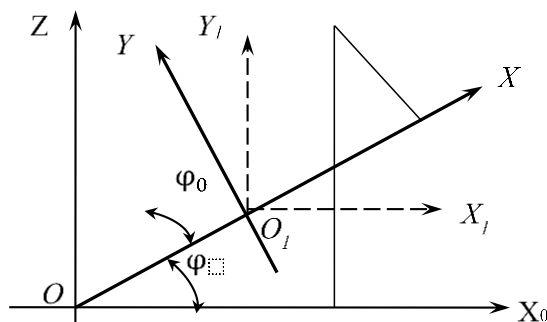


Рис. 2.19 – Координаты точки в системах ZOX_0 и XO_1Y

Чтобы выразить Z , X_0 и X , Y введем вспомогательную систему координат $X_1O_1Y_1$, начало которой поместим в новом начале O_1 , а направления осей возьмем совпадающими с направлениями старых осей. Пусть X_1 и Y_1 обозначают координаты точки M относительно этой вспомогательной системы. Переходя от старой системы координат к вспомогательной:

$$X = X_1 + A, \quad Y = Y_1 + B. \quad (2.10-2.11)$$

Далее переходим от вспомогательной системы координат к новой:

$$X_1 = X_0 \cos \varphi - Z \sin \varphi, \quad Y_1 = X_0 \sin \varphi + Z \cos \varphi \quad (2.12-2.13)$$

Заменим X_1 и Y_1 в формулах (2.12-2.13) выражениями из формул (2.14-2.15):

$$X = X_0 \cos \varphi - Z \sin \varphi + A, \quad Y = X_0 \sin \varphi + Z \cos \varphi + B \quad (2.14-2.15)$$

Координаты точек для i -го шага определяем по формуле:

$$X_i = X_{0i} \cos \varphi - Z_i \sin \varphi + A_i, \quad Y_i = X_{0i} \sin \varphi + Z_i \cos \varphi + B_i. \quad (2.16-2.17)$$

В таб. 2.6 сведены данные по результатам экспериментально-аналитических исследований методом фотограмметрии последнего шага до и после формовки.

Таблица 2.6-Координаты точек с торца трубной заготовки на 17 шаге до и после формовки

Точка	Исходная система координат						Новая система координат			
	До формовки			После формовки			До формовки		После формовки	
	X ₀	Y	Z	X ₀	Y	Z	X	Y	X	Y
23	-49,9	68,8	-697,2	-97,8	66,3	-983,9	-172,0	758,4	-92,7	770,4
22	-78,1	69,6	-714,8	-130,3	66,2	-990,9	-203,9	749,1	-125,4	764,3
21	-115,4	70,9	-746,1	-176,1	66,1	-1007,7	-248,4	729,1	-171,6	748,9
20	-148,7	72,5	-781,4	-219,4	66,4	-1029,7	-290,0	704,2	-215,6	728,2
19	-177,1	73,9	-820,7	-259,4	66,7	-1057,1	-327,9	674,0	-256,4	702,0
18	-211,3	77,2	-910,4	-321,9	68,0	-1130,0	-385,1	596,9	-321,1	631,1
17	-224,4	79,8	-1008,5	-367,5	69,1	-1217,9	-424,3	506,1	-369,3	544,6
16	-210,9	82,5	-1104,7	-387,4	71,1	-1312,9	-437,5	409,9	-392,1	450,2
15	-175,4	84,5	-1194,4	-384,4	72,9	-1409,3	-427,6	313,9	-392,0	353,8
14	-51,5	86,4	-1343,6	-318,3	76,4	-1591,7	-348,8	136,6	-331,6	169,5
13	129,5	86,2	-1409,2	-170,3	80,1	-1714,9	-192,4	24,4	-187,4	41,9
12	321,3	83,5	-1380,6	18,2	81,9	-1751,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11	499,7	78,7	-1305,0	205,4	82,4	-1703,4	192,2	24,4	188,6	41,9
10	617,5	73,2	-1154,4	345,2	80,7	-1572,7	346,4	137,4	332,3	168,3
9	642,9	67,9	-962,6	400,3	77,7	-1387,2	422,9	315,1	392,9	352,0
8	627,5	65,3	-867,0	400,0	75,7	-1290,4	434,0	411,3	395,6	448,8
7	591,4	62,5	-776,3	378,5	72,9	-1195,3	423,8	508,4	377,0	544,6
6	530,6	61,2	-700,5	330,4	71,0	-1110,9	385,8	597,8	331,4	630,4
5	455,0	60,1	-639,8	265,2	68,8	-1039,1	329,6	676,8	268,5	704,1
4	410,3	60,2	-621,5	224,0	68,1	-1014,0	291,5	706,5	228,1	730,5
3	362,9	60,4	-608,8	179,1	67,5	-994,1	249,3	731,6	183,8	751,8
2	314,2	60,9	-601,7	132,1	66,9	-979,5	204,3	751,6	137,3	767,7
1	277,0	61,3	-600,3	95,6	66,5	-972,3	168,9	763,1	101,0	776,1

На рис. 2.20 представлены геометрия трубной заготовки 17 шагов после разгрузки, построенная по координатам 23 точек, полученные методом фотограмметрии. Трубная заготовка на 16 шаге имеет смещение кромок по высоте равное 3,1 мм; а на 17 – 5,7 мм. Следовательно, на последнем шаге контактная зона заготовки с инструментом со стороны 1, больше чем со стороны 2.

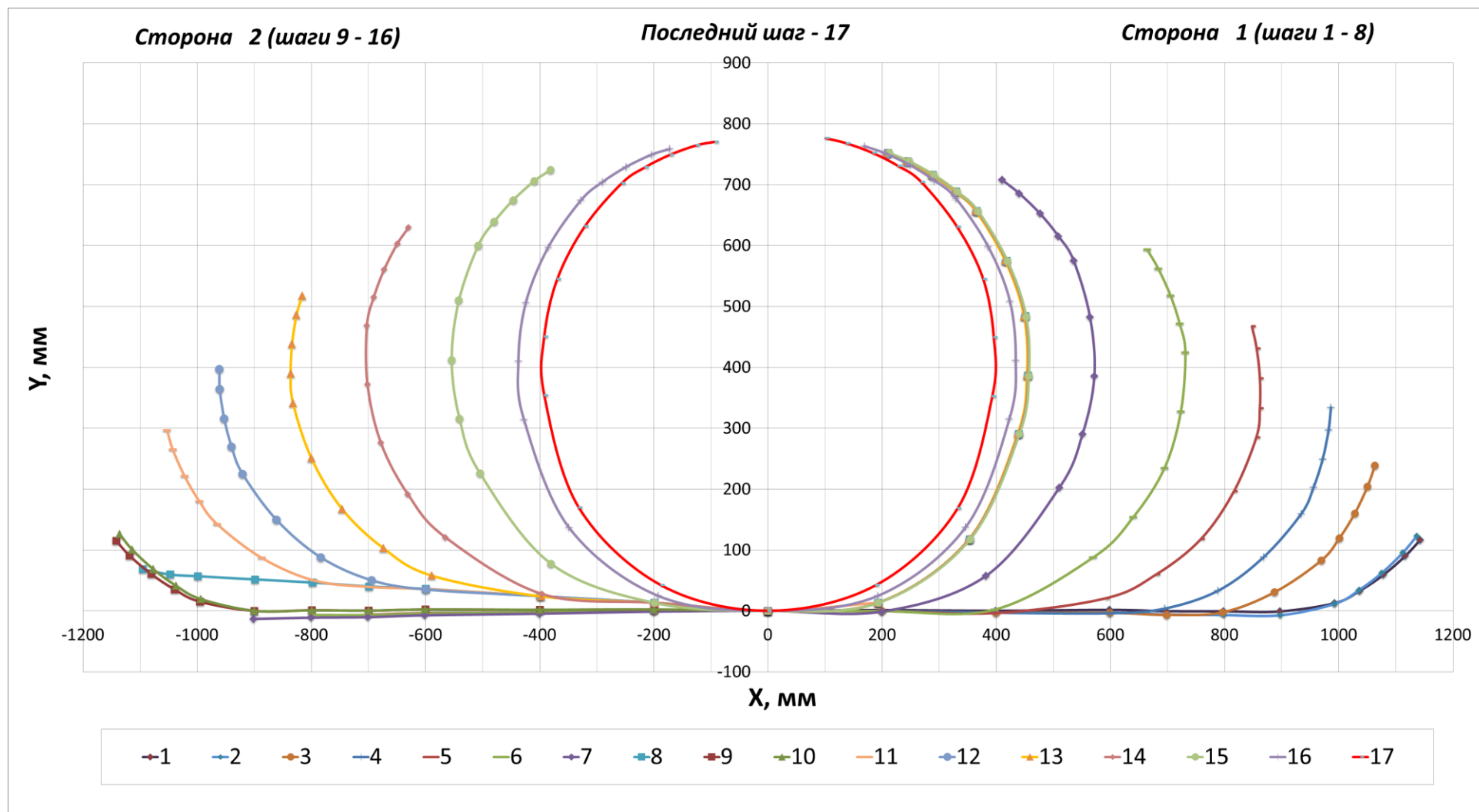


Рис. 2.20 – Координаты 23 точек заготовки 17 шагов после разгрузки, полученные методом фотограмметрии

Результатом измерения является геометрия трубной заготовки по внутренней поверхности со стороны пульта управления, которая выводится на экран монитора в графическом виде; а также величина расстояния между кромками, горизонтальные и вертикальные диаметры в цифровом виде. На рис. 2.22 представлена геометрия трубной заготовки до и после доформовки, построенная по координатам 23 точек, полученная методом фотограмметрии с заднего торца и КИО с переднего торца.

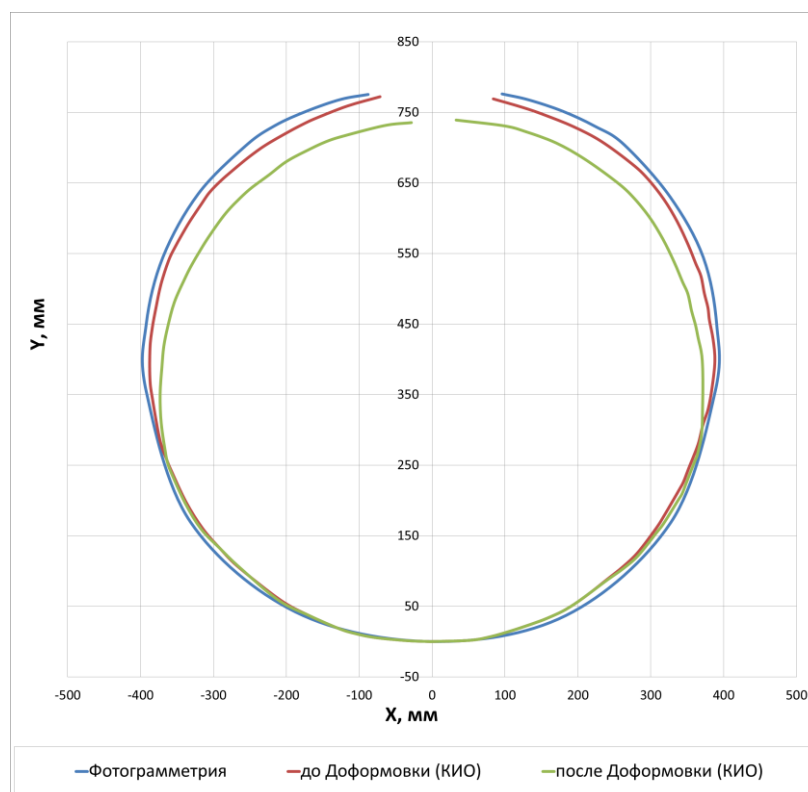


Рис. 2.22 – Координаты 23 точек заготовки до и после доформовки

Экспандирование. Измерение параметров формоизменения заготовки после экспандирования проводят на участке контроля геометрических параметров на установке, оборудованной стационарной измерительной системой (рис. 2.23). Поперечный профиль трубы измеряется с помощью датчиков, расположенных по окружности в плоскости перпендикулярной оси трубы. В процессе измерения на основании данных профилемера и текущих координат его положения относительно трубы, строится трехмерная модель трубы. Затем, в процессе постобработки производится вычисление всех необходимых параметров по существующим методикам.

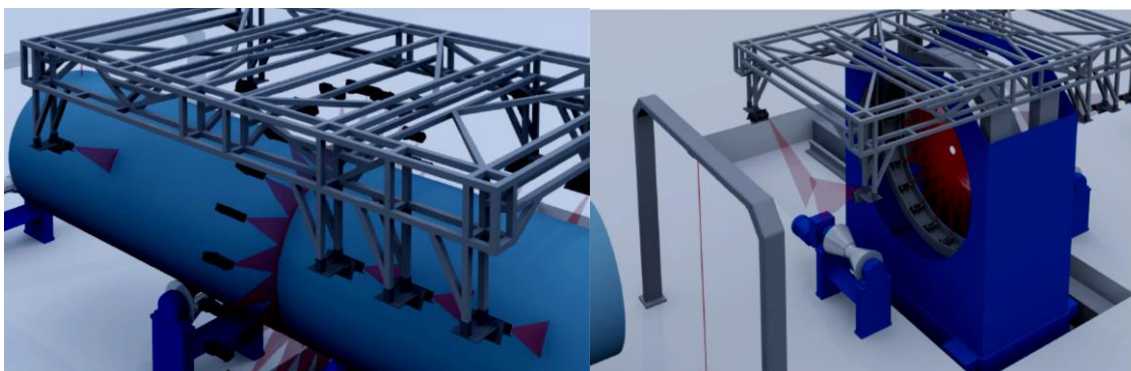


Рис. 2.23 – Система измерения поперечного и продольного профиля трубы

Измеренные данные сверяются с допустимыми значениями, заранее введенными оператором в соответствии со спецификациями заказчика. Результаты контроля труб фиксируются в памяти компьютера.

Результатом измерения является геометрия трубной заготовки по наружной поверхности, которая выводится на экран монитора в графическом и цифровом виде. В окне «Сечения» выводятся следующие графические данные по длине: минимальное, максимальное и среднее значение диаметра; отклонение от правильной цилиндрической формы; овальность и кривизна (см. рис. 2.24).

В цифровом виде выводятся данные по 15 различным параметрам, а именно по диаметрам (6 параметров), по овалу (4 параметра), по кривизне (2 параметра); а также отклонение от правильной цилиндрической формы; периметр и длина трубы.

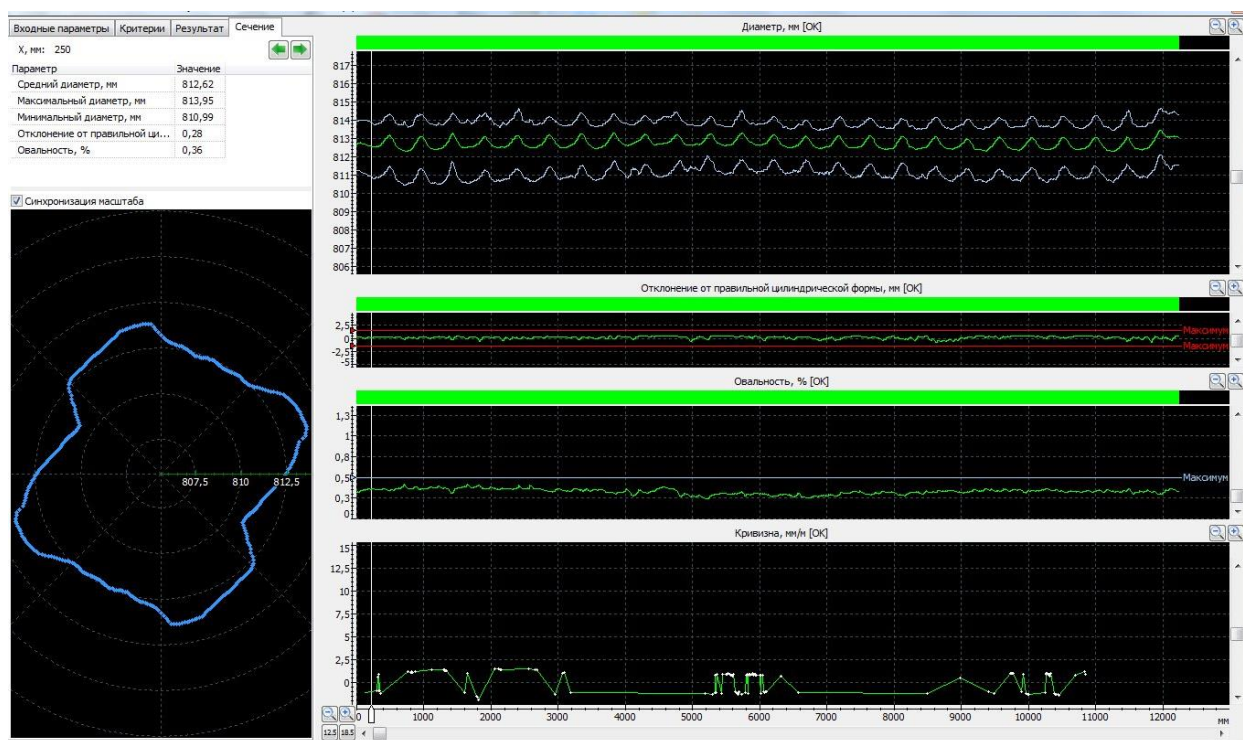


Рис. 2.24 – Основные геометрические параметры трубы в окне «Сечение»

2.3 Третий этап. Исследование влияния неравномерного распределения по механическим свойствам и сварочным деформациям на форму трубы

Программа проведения экспериментального исследования.

Для проведения исследования по выявлению факторов влияющих на образование дефектов по геометрии трубной заготовки была разработана программа проведения эксперимента, представленная в таблице 2.7, которая состоит из следующих этапов: измерение прочностных и геометрических параметров исходного листа, измерение геометрии заготовки после подгибки кромок и шаговой формовки; трубы после с сварки и экспандирования.

Таблица 2.7 - Программа проведения эксперимента на третьем этапе

Измеряемый параметр	Рис.	Место проведения измерения	Измери- тельные приборы	Комментарии
1. Длина листа	2.24	Склад ЛПК Стан 5000	Рулетка, Твердомер ТЭМП	Замер длины листа проводить: – с левой и правой сторон.
2. Ширина листа	2.24	Участок задачи листов ТЭСЦ-4		Замер ширины листа проводить по трем точкам по длине
3. Твердость листа	2.24			Замер твердости проводить в 10 точках: с переднего, заднего концов и посередине.
4. Толщина листа	2.30	Участок задачи листов, формовки, экспандирования	Штангенциркуль, линейка микрометр, шаблон, фотоаппарат, ультразвуковой тощиномер	Замер толщины проводить: –с переднего и заднего концов в 10 точках и посередине в 2-х
5. Радиус подгибки кромок		Участок формовки (подгибка кромок)		Произвести замер зазора от шаблона до кромок и зафиксировать на фотоаппарат. Замер проводить с двух сторон по трем точкам по длине.
6. Высота подгибки кромок				Замер проводить с двух сторон по трем точкам по длине.
8. Отклонение от теоретической окружности	2.35	Участки формовки; сборки и сварки; экспандирования		Приложить шаблон, произвести замер расстояния от шаблона до стыка кромок, измерить зазор (после ПШФ) и зафиксировать на фотоаппарат по торцам труб
9. Диаметр трубной заготовки (трубы)				После ПШФ, ССС, СВШ, СНШ и МЭ провести замер диаметров торцов трубной заготовки
10. Кривизна трубы		Участки формовки- гидроиспытания труб	Рулетка, линейка, щупы Лента, рулетка	После процессов формовки, сборки и экспандирования провести замер трубной заготовки по всей длине
11. Периметр трубы (процент раздачи)		Участок гидроиспытания труб		До и после экспандирования провести замер периметра трубной заготовки

В таблице 2.8 представлен сортамент и количество измеренных труб. Общее количество измеренных труб составило 273 из них 146 после первого пресса шаговой формовки JCO-1, 123 со второго пресса шаговой формовки JCO-2.

Таблица 2.8 – Сортамент и количество измеренных труб

Класс прочности	K70		K65		K60				K52		
Диаметр	813		1219		1420				1220		1020
Толщина	36,5	39	17,5	25,8	21,6	18,7	15,7	20	17,3	12	11
Количество	22	20	38	34	35	30	34	10	30	28	34
JCO-1	11	8	21	15	24	12	17	6	13	14	24
JCO-2	9	12	17	16	11	18	17	4	17	13	10
Сборка, сварка техн. шва	20	18	25	31	30	30	30	10	30	26	25
Сварка внутреннего шва	20	18	-	21	18	30	25	9	28	22	20
Сварка наружного шва	18	20	38	31	34	27	33	10	30	28	34
Экспандирование	18	20	35	34	34	27	34	10	30	27	30

Измерение твердости исходного листа

На рис. 2.25 представлено расположение точек на исходном листовом прокате для измерения твердости. Точки и линии измерения наносились маркером по всей ширине и длине листа.

В окрестностях каждой точки выполнялось по три замера, для каждой точки замеров определялись среднее значение, полученные значения твердости заносились в формуляр (см. табл 2.10).

Количество измеряемых точек определяли в зависимости от ширины исходного листа. После определения количества точек, определили расстояние между точками, с учетом отступа от левого и правого края по формуле: $b=(B-bk)/(N-1)$; где B – ширина листового проката, N – количество точек, $bk=10$ – величина отступа от левого и правого края.

Расстояние между точками по длине, с учетом отступа от заднего и переднего конца, определили по формуле: $l=(L-lk)/(N-1)$; где L – длина листового проката, N – количество точек, $lk=10$ – величина отступа от заднего и переднего конца.

2.3.1 Результаты измерений твердости и геометрии исходного листа

Измерение твердости листа проводили на складе листопрокатного комплекса и на участке задачи листов трубосварочного цеха динамическим твердомером ТЭМП-2.

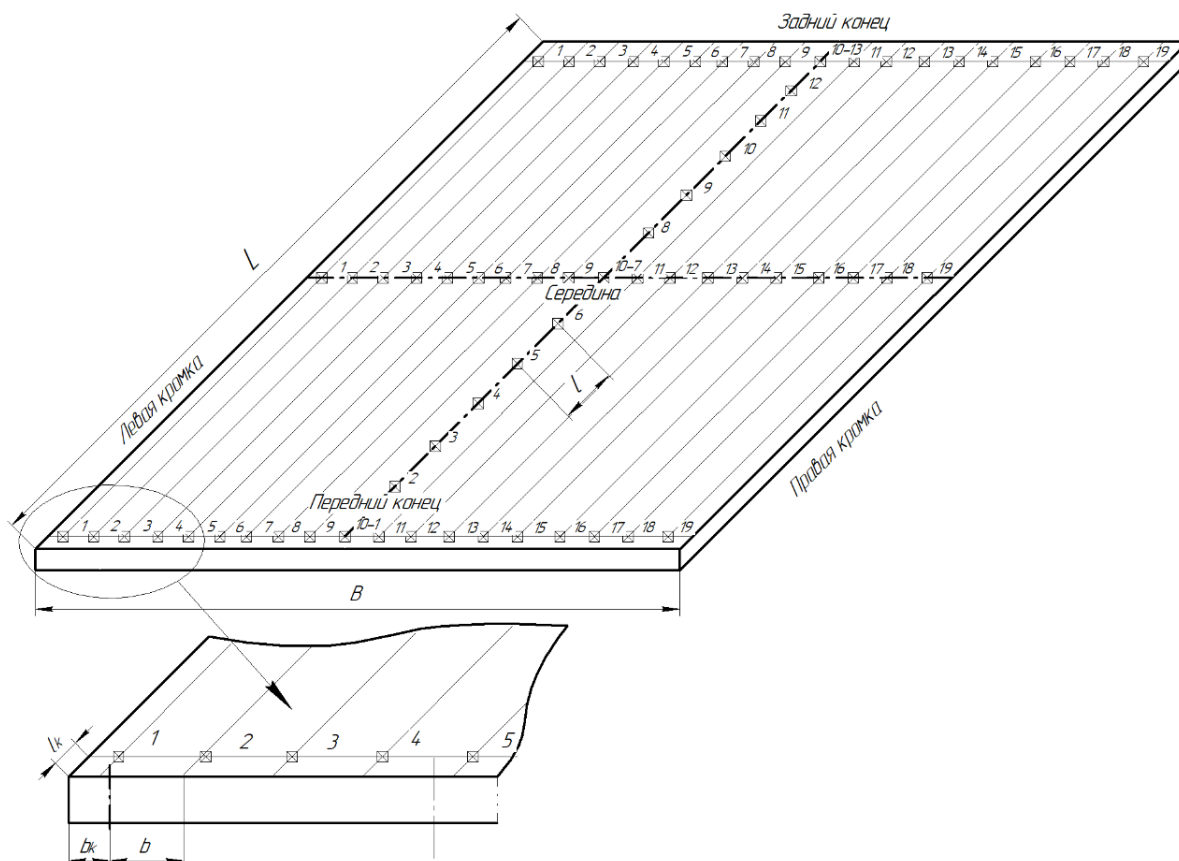


Рис. 2. 25 – Расположение точек на листе для измерения твердости.

Технические характеристики динамического твердомера ТЭМП-2:

Диапазоны измерения твердости по шкалам: Роквелла (22-68) HRC; Бринелля (100-450) HB; Шора (22-99) HSD; Виккерса (100-950) HV

Пределы относительной допускаемой погрешности измерений твердости при поверке динамического твердомера по образцовым мерам твердости 2-го разряда по ГОСТ 9031-78 и ГОСТ 8.426-81 представлены в табл. 2.9

Таблица 2.9 – Абсолютная и относительная допускаемая погрешность измерения твердости портативным динамическим твердомером ТЭМП-2

Тип мер твердости	Шкала твердости	Значение твердости образцовой меры	Предел допускаемой погрешности	
МТР ГОСТ 9031-78	HRC	25/45/65 ± 5	±1,5	3%*
МТБ ГОСТ 9031-78	HB	100 ± 25/200 ± 50/400 ± 50	±10	
МТВ ГОСТ 9031-78	HV	100 ± 25/450 ± 50/800 ± 75	±12	
МТШ ГОСТ 8.426-81	HSD	30/60/95 ± 7	±2	

*достигается при программировании динамического твердомера на образцовых мерах твердости, используемых для его проверки

Для определения погрешности измерения твердости портативным твердомером ТЭМП-2 в лаборатории металловедения ЦИЛ ИТЦ проведено пять замеров твердости по методу Бринелля на стандартном образце с заявленной твердостью 207 единиц погрешность в измерении составила 0,77% (см. приложение Б). Погрешность измерения твердости изделия портативным твердомером снижается при увеличении количества измерений.

Основываясь на результаты проверки портативного динамического твердомера можно сделать вывод о том, что данные полученные при измерении твердости по шкале НВ следует считать корректными.

В таблице 2.10 представлены результаты замеров твердости исходного листового проката по ширине с переднего, заднего концов и середине. В зависимости от общей длины прокатные листы подразделяют на однократные, двукратные, трехкратные. На рис. 2.26 представлена схема расположения двукратного материнского листового проката после поперечной резки на складе ЛПК СТАН-5000 и на складе ТЭСЦ-4 линии после транспортировки. В данном случае головной частью является началом проката, хвостовой – конец проката, а середина место резки листового проката. В результате передвижения листа передний торец заготовки 1 соответствует середине, заготовки 2 – хвостовой части; задний торец заготовки 1 соответствует головной части, заготовки 2 – середине.

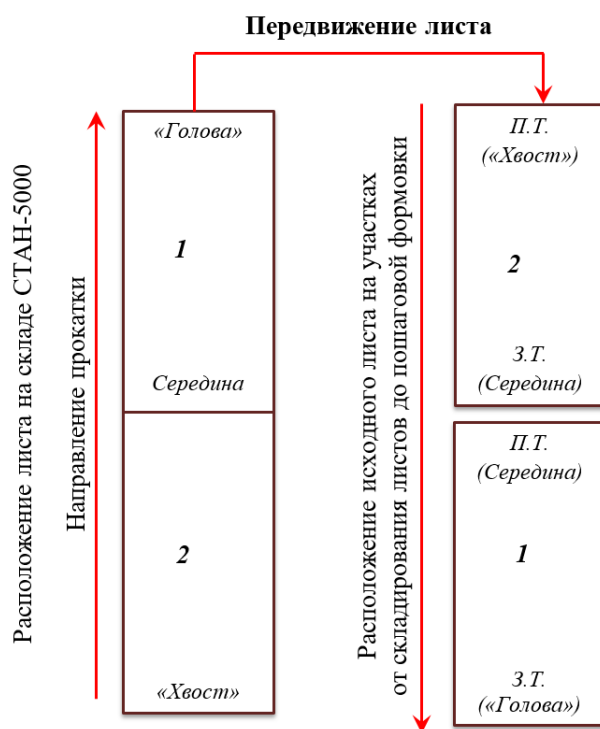


Рис.2.26 - Расположение листового проката на ЛПК Стан–5000 и ТЭСА-1420

Таблица 2.10 – Формуляр для занесения результатов эксперимента по измерению твердости

Лист № 12004487-100000			Труба№ 263606				Плавка 122854			Марка стали К60				Сортамент 1420X25,8				Поставщик СТАН5000			
Левая кромка												Правая кромка									
По длине			10	250	490	730	970	1210	1450	1690	1930	2170	2410	2650	2890	3130	3370	3610	3850	4090	4330
		Твердость(отступить 10мм)																			
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
	Передний конец	1	191	226	230	220	213	204	205	212	199	210	197	203	197	201	218	218	244	232	193
		2	206	243	235	225	203	194	207	201	192	204	206	209	223	217	219	219	224	229	203
		3	209	243	225	214	218	210	216	210	193	190	214	199	205	214	203	226	232	218	210
		ср	202	237,3	230	219,7	211,3	202,7	209,3	207,7	194,7	201,3	205,7	203,6	208,3	210,7	213,3	221	233,3	226,3	202
			7,33	7,55	3,33	3,778	5,556	5,778	4,444	4,444	2,889	7,556	5,778	3,555	9,78	6,444	6,889	3,33	7,111	5,556	6
	Середина	1	195	211	211	218	206	190	205	186	182	182	182	189	196	191	183	198	207	230	222
		2	211	215	213	218	205	207	209	192	199	198	195	194	189	202	191	199	216	230	225
		3	201	216	216	199	203	216	203	194	183	193	188	193	212	196	199	209	214	222	224
		ср	202,3	214	213,3	211,7	204,7	204,3	205,7	190,7	188	191	188,3	192	199	196,3	191	202	212,3	227,3	224
			5,78	2	1,78	8,444	1,111	9,556	2,222	3,111	7,333	6	4,444	2	8,67	3,778	5,333	4,67	3,556	3,556	1,11
	Задний торец	1	247	252	240	245	213	237	235	233	236	227	229	228	225	229	238	239	226	248	216
		2	230	263	245	234	234	238	217	241	234	204	222	228	211	193	224	242	258	233	211
		3	226	237	243	259	241	242	246	247	219	229	222	226	232	230	239	239	242	225	228
		ср	234,3	250,7	242,6	246	229,3	239	232,7	240,3	229,7	220	224,3	227,3	222,6	217,3	233,7	240	242	235,3	218
			8,444	9,111	1,78	8,667	10,89	2	10,44	4,889	7,111	10,67	3,111	0,888	7,778	16,22	6,444	1,33	10,67	8,444	6,44

При однократном листовом прокате переднему концу будет соответствовать хвостовая часть, заднему – головная. На рис. 2.27 представлено распределение твердости однократного листа для производства трубы 1420x25,8 мм по ширине с переднего конца, по середине и с заднего конца. Наибольшее значение твердости листа в продольном направлении установлено с заднего конца («голова»), наименьшее в середине. Разброс значений твердости листа по ширине с переднего конца составляет 20%, по середине – 13 %, с заднего – 17%.

Значение твердости точек, измеренных на расстояние 10 мм от левого и правого кроев ниже на 5 – 15%, чем последующие точки в прикромочной зоне, так как при ускоренном охлаждении в процессе производства листового проката производят маскировку шторками или уменьшают расход воды на боковых зонах коллекторов.

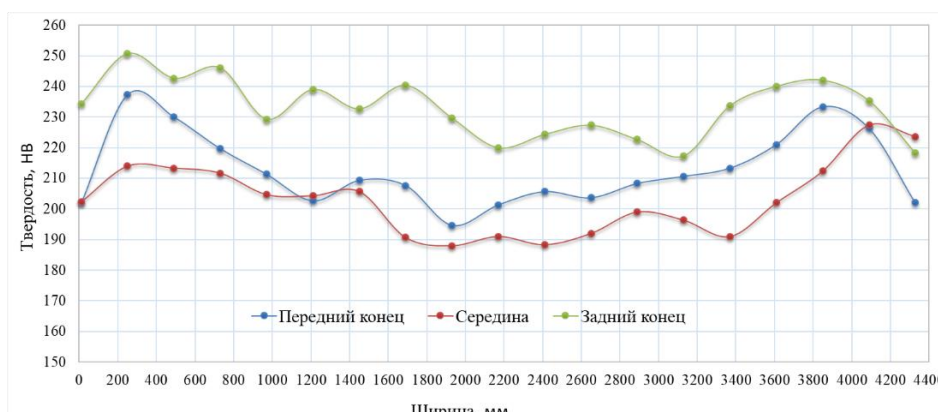


Рис. 2.27 - График распределения твердости листа по ширине с концов и по середине

По графику представленном на рис. 2.28 видно, что твердость и температура листа после охлаждения обратно пропорциональны.

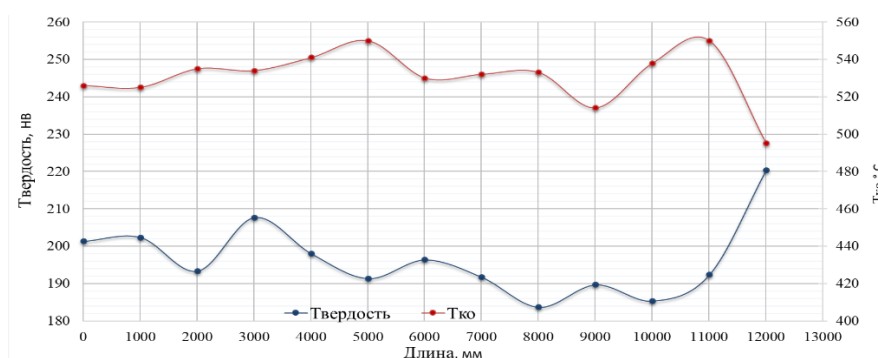


Рис. 2.28 - График распределения твердости листа и температуры конца охлаждения по длине

На рис. 2.29 – 2.30 представлены данные по пределу текучести двукратного листового проката с «головы», середины и «хвоста», а также отклонения от

результатов посередине, где Г-С – разность между пределом прочности (текучести) головной и серединой частями листа; Х-С – разность между хвостовой и серединой частями.

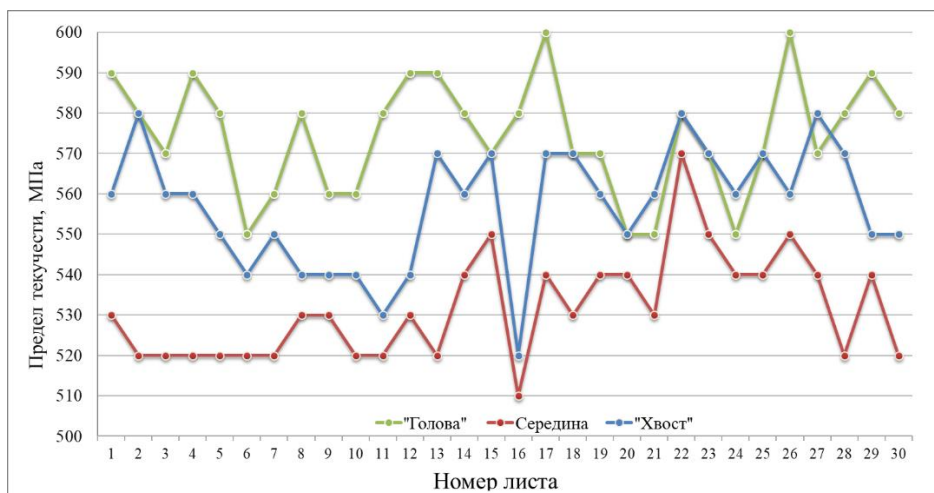


Рис. 2.29 - Значение по пределу текучести заготовок с концов и по середине

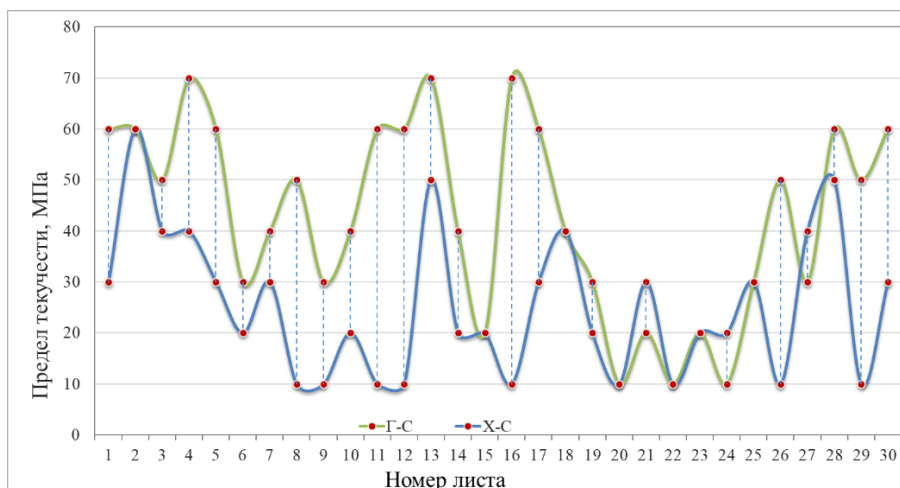


Рис. 2.30 - Отклонение по пределу текучести с концов заготовок

2.3.2 Результаты измерений параметров заготовки после подгибки кромок

Для определения влияния неравномерности распределения механических свойств исходной заготовки на геометрию трубной заготовки после подгибки кромок и формовки основной части профиля было проведено измерение геометрических параметров в продольном и поперечном направлении.

После подгибки кромок было проведено измерение геометрических параметров заготовки с левой и правой стороны в трех точках по длине. На рис. 2.31 представлена схема измерения радиуса и высоты подогнутой кромки.

Для определения радиуса подогнутой кромки измерение провели следующим образом: приложили шаблон радиусом готовой трубы, произвели замер

зазора щупами от шаблона до кромки и маркером зафиксировали область имеющей максимальный значение. В таблице 6 представлены данные по геометрии кромки трубных заготовок по трем точкам по длине с левой и правой стороны.

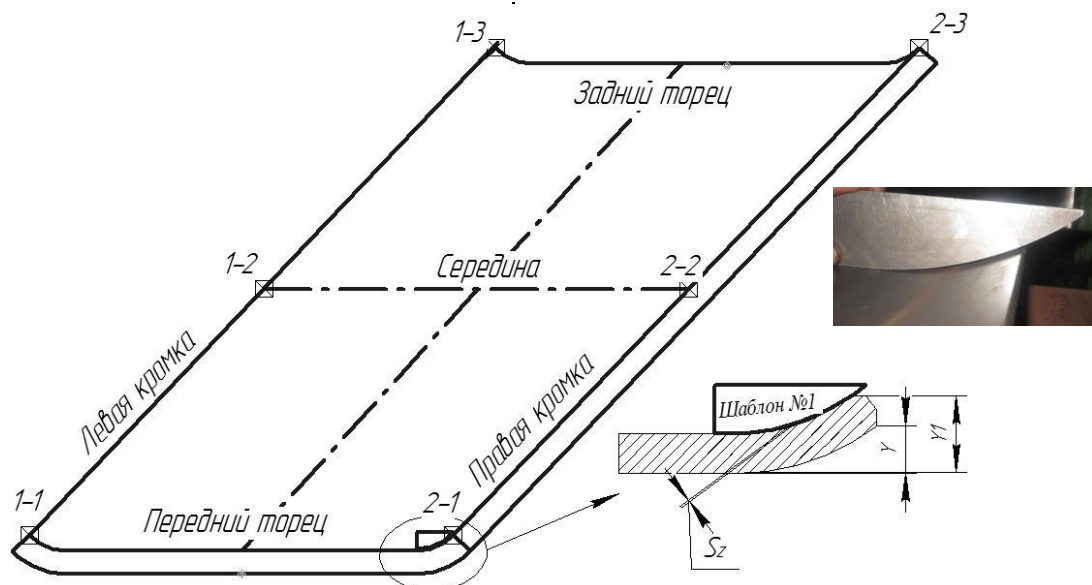


Рис. 2.31 - Схема измерения геометрии заготовки после подгибки кромок

Наибольшее расхождение по геометрии кромок трубной заготовки наблюдалось по длине, а не по ширине. В таблице 2.11 видно, что высота подгибки кромок с левой и правой стороны равны, причем значение в средней части по длине имеет значение больше концов на 1% с левой стороны и 2,5% с правой.

Таблица 2.11 – Данные по геометрии подогнутой кромки по ширине и длине

Точки	Левая кромка		Правая кромка	
	Высота, мм	Мах зазор, мм	Высота, мм	Мах зазор, мм
1	111	1,15	111,5	1
2	113	3,25	112	2,6
3	110,5	1,2	111,2	0,6

2.3.3 Результаты измерений геометрии заготовки после шаговой формовки.

Измерение геометрии трубной заготовки, сформованной на прессе шаговой формовки, проводили на площадке осмотра и маркировки трубной заготовки после первого и второго пресса шаговой формовки.

На рис. 2.32 представлена схема проведения измерений геометрических параметров трубной заготовки с переднего и заднего торцов после формовки по всей ширине, сборки и сварки технологического шва (ССС), сварки внутреннего шва (СВШ), сварки наружного шва (СНШ) и экспандирования, следующих геометрических параметров: Dгор. – горизонтальный диаметр, Dвер. –

вертикальный диаметр, ширины раскрыя S_p , смещения кромок по высоте C , а также диаметры на расстоянии $l=100$ мм от сварного шва

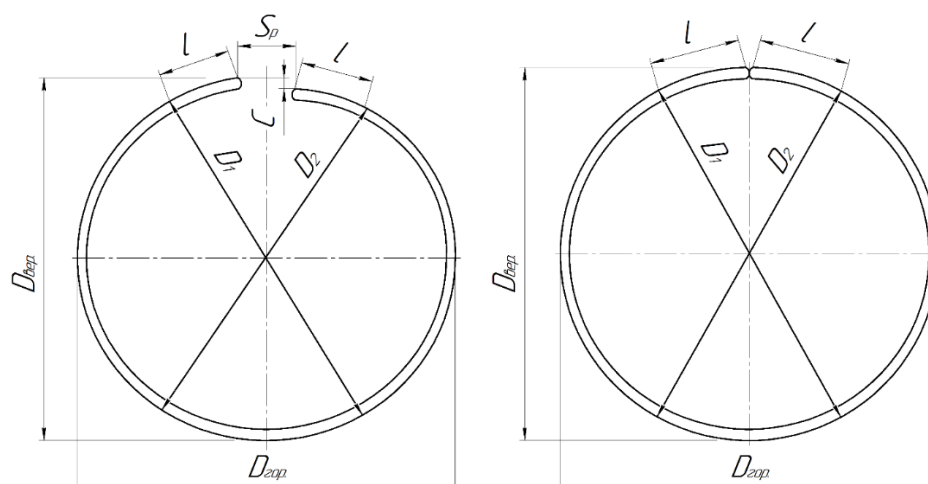


Рис. 2.32 - Схема измерения геометрии заготовки после шаговой формовки и сборки

В таблице 2.12 представлены данные по геометрии трубной заготовки с переднего торца, по середине и заднего торца.

Таблица 2.12 - Данные по геометрии заготовки после шаговой формовки

Положение	D _{гор.} , мм	D _{вер.} , мм	S _p , мм	Овал, %	D ₁ , мм	D ₂ , мм	C, мм	H _{вср}
П. Т.	1475	1452	215	1	1482	1480	0,5	201
Середина	-	1450	205	-	-	-	1,5	191
З.Т.	1480	1460	250	1,4	1495	1490	2	220

После прессов шаговой формовки большинство измеренных трубных заготовок имели горизонтальный овал $O_1 = D_{1\text{гор.}} - D_{2\text{вер.}}$. Трубные заготовки, сформованные на втором прессе шаговой формовки, имели разброс по значению овальности на 20 - 40% больше, чем на первом прессе шаговой формовки. Наибольшее отклонение по овальности после формовки имели трубы 1220x12 мм К52 (см. рис. 2.33).

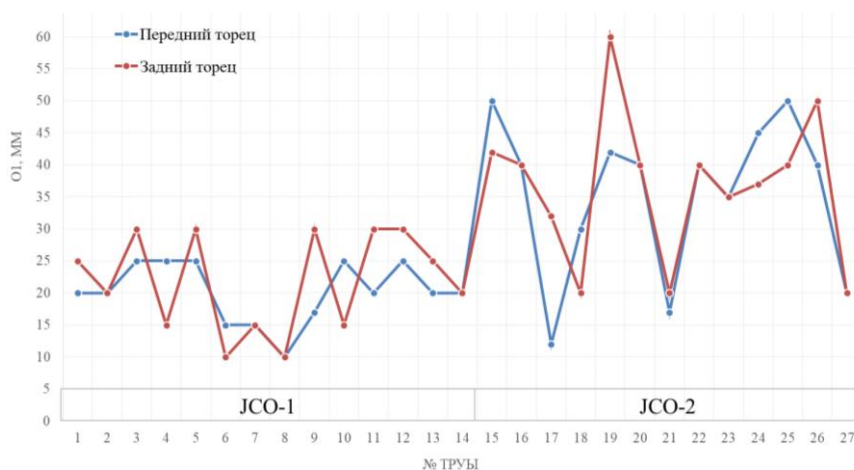


Рис. 2.33 – Значение овальности трубных заготовок после шаговой формовки

2.3.4 Результаты измерений геометрии заготовки после сборки и сварки

Измерение геометрии трубной заготовки, собранного и сваренного технологическим швом на сборочно-сварочном стане по всей длине при перемещении заготовки через стан, проводили на площадке осмотра и после первого и второго сборочно-сварочного стана.

Так как непосредственно после сварки происходит изменение формы трубы, измерение геометрических параметров после сварки внутренних и наружных швов проводили на участке стана сварки наружного шва и гидромеханического экспандера соответственно.

На рис. 2.34 представлена схема проведения измерений геометрических параметров трубной заготовки в продольном направлении после формовки по всей ширине, сборки и сварки технологического шва (ССС), сварки наружного шва (СНШ) и экспандирования, следующих геометрических параметров: $D_{гор.}$ – горизонтальный диаметр, $D_{вер.}$ – вертикальный диаметр, H – общая кривизна.

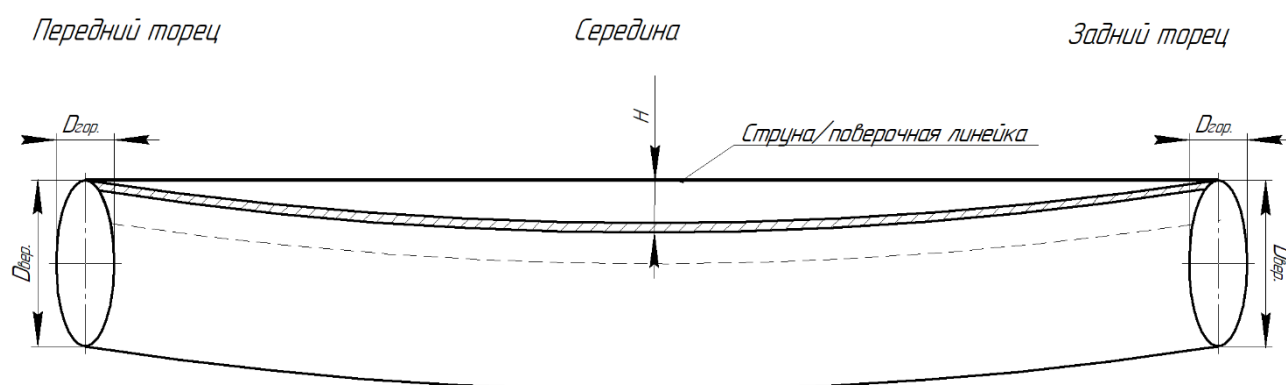


Рис. 2.34 – Схема измерения геометрических параметров трубы после СССР, СНШ и МЭ

После сборки и сварки технологического шва все трубные заготовки имели горизонтальный овал O_2 , причем овальность 23 труб с переднего торца и 85 труб с заднего торца из 237 измеренных не превышало 5 мм, т.е. имели форму близкое к кругу. Трубы, собранные и сваренные после прессы JCO-2 имели отклонения по концам на 35 – 50% выше, чем после JCO-1.

После сборки и сварки технологического шва и выхода трубы из сборочного стана горизонтальный диаметр и вертикальный диаметры уменьшается в среднем на 3 – 7%, причем величина изменения горизонтального диаметра $\Delta D_{1гор.} = D_{1гор.} - D_{2гор.}$ превышает величину изменения вертикального диаметра $\Delta D_{1вер.} = D_{1вер.} - D_{2вер.}$ на 1 – 2%. В результате изменения формы трубной заготовки при сборке происходит снижение величины овала трубы до ΔO_1 , где $\Delta O_1 = O_2 - O_1$.

По результатам замера можно сделать предварительный вывод о том, что трубы с большим горизонтальным овалом и шириной раскрыя, испытывали большее изменение с боковых сторон, а с меньшим, в прикромочной зоне, так как при сборке с боковых сторон вертикальный диаметр увеличивается, а при надавливании роликами на прикромочную часть уменьшается.

После сварки внутреннего шва 88% труб имели горизонтальный овал O_3 . Трубы, сваренные из заготовок, полученные после JCO-1 имели отклонения по концам в 2 раза больше, чем на JCO -2 при этом 10% заготовок, сформованных на первом прессе и 2% на втором, имели горизонтальный овал с переднего торца и вертикальный с заднего торца.

После сварки внутреннего шва и выхода трубы из стана изменение формы трубы происходит следующим образом: горизонтальный диаметр уменьшается от 0,1 до 1%, а вертикальный увеличивается от 0,2 до 1,5%. В результате изменения формы трубной заготовки происходит снижение величины овала трубы до ΔO_2 , где $\Delta O_2 = O_2 - O_3$.

После сварки наружного шва 92% исследуемых труб имели вертикальный овал, 7% труб имели горизонтальный овал с заднего торца и 1% с переднего. Наибольшее значение овала O_4 было у труб 1220x12 класса прочности K52, наименьшее – у труб 1420x25,8мм K60 и 813 мм K65, где $O_4 = D_{4\text{гор.}} - D_{4\text{вер.}}$ – значение овальности трубной заготовки после сварки наружного шва.

После сварки наружного шва и выхода трубы из стана изменение формы трубы происходит следующим образом: горизонтальный диаметр уменьшается от 0,3 до 1,5 %, а вертикальный увеличивается от 0,4 до 2%. В результате изменения формы трубной заготовки происходит увеличение величины овала трубы до ΔO_3 , где $\Delta O_3 = O_3 - O_4$.

Суммарное изменение овальности труб от остаточных сварочных деформаций ΔO_4 составляет 0,5 – 3 %, что превышает исходное значение овальности после сборки на сборочно-сварочном стане, где $\Delta O_4 = O_2 - O_4$. Чем меньше предел текучести и толщина стенки трубы, тем больше ΔO_4 . Так как при меньшем пределе текучести и толщины стенки требуется меньшее значение сварочных напряжений для изменения формы трубы.

2.3.5 Результаты измерений геометрии заготовки до и после экспандирования

После экспандирования 77% исследуемых труб имели горизонтальный овал с переднего торца и 63% с заднего торца. Наибольшее значение овала O_5 было у труб 1220x12 класса прочности K52 с заднего торца, наименьшее – у труб 813x36,5 K70 с переднего торца, где $O_5 = D_{5\text{гор.}} - D_{5\text{вер.}}$ – значение овальности труб после экспандирования.

В процессе экспандирования на первом этапе горизонтальный диаметр увеличивается на 0,1 – 2%, а вертикальный уменьшается на 0,1 – 2%. На втором этапе происходит увеличение как горизонтального, так и вертикального диаметров на величину степени остаточной деформации. В результате изменения формы трубы происходит снижение величины овала до ΔO_4 , где $\Delta O_4 = O_5 - O_4$.

Изменение овальности после сварки наружного шва различно по длине. Для определения отклонения по длине производят измерение кривизны (прямолинейности) труб. Общая кривизна труб не должна превышать 0,2% длины трубы, а на 1 м длины кривизна не должна превышать 1,5 мм [18 – 19]. Максимальное значение кривизны имела труба с наибольшим соотношением диаметра к толщине стенки трубы. На рис. 2.35 представлена кривизна исследуемых труб после сварки наружного шва и механического экспандирования. Наибольшую кривизну имеют тонкостенные трубы.

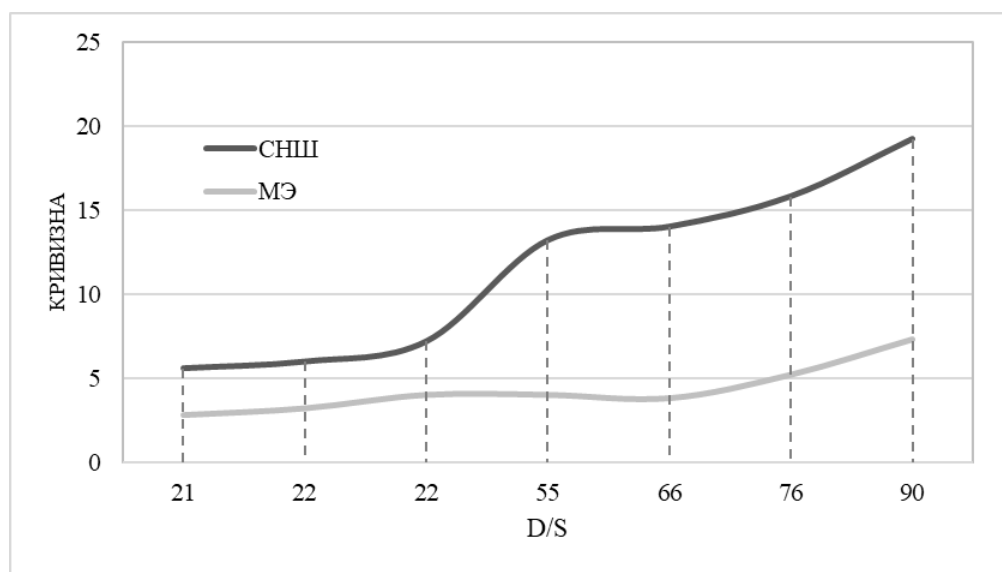


Рис. 2.35 – Кривизна труб после СНШ и МЭ

В таблице 2.13 представлено среднеарифметическое значение овальности трубных заготовок и труб после шаговой формовки, сборки и сварки технологического, внутреннего, наружного швов и экспандирования, а также изменение овальности после каждого рассматриваемого процесса.

Указанные изменения овальности ΔO_1 , ΔO_2 и ΔO_3 являются результатом пружинения трубы и сварочных деформаций, под воздействием которых овальность трубы меняется с горизонтальной на вертикальную, т.е. увеличивается вертикальный диаметр и уменьшается горизонтальный.

Таблица 2.13 – Овальность труб и ее изменение на стадии формовки – экспандирования

Класс прочности		K70		K65		K60						K52	
Диаметр		813		1219		1420				1220		1020	
Толщина		36,5	39	17,5	25,8	21,6	18,7	15,7	20	17,3	12	11	
D/S		22,3	20,8	69,7	55	65,7	76	90,4	61	70,5	101,6	92,7	
Зазор	П.Т.	62	52,6	191,7	191,3	190,2	186,4	177,3	191	181	209,8	194	
	З.Т.	64	58	200	188,3	195,7	183,4	181,2	193	183	214,6	195	
O1	П.Т.	5,2	5,3	23,7	23	21,2	17,4	18,4	19	21	27	33	
	З.Т.	3,7	8	27,1	24	21,7	18	19,2	19	26	29	31	
O2	П.Т.	13	4,2	13,1	11,8	11,5	9,2	10,4	9,8	13	16	18	
	З.Т.	14,2	4,8	15	12,7	10,8	9,5	8,8	9,2	14,6	15,5	17,7	
O3	П.Т.	-	-	-	9,2	7,7	5,1	5,1	6	8,6	9,2	11,5	
	З.Т.	-	-	-	6,2	3,9	2,3	1,2	2,3	3,8	3,7	6,2	
O4	П.Т.	2,5	-4,7	-15,4	-9	-12,6	-13,6	-19,1	-16,3	-17	-38	-16,5	
	З.Т.	5,2	-3,2	-13,4	-2,3	-5,3	-12,3	-17,6	-14,6	-11,2	-23,3	-16,5	
O5	П.Т.	2,2	2	1	4,2	3	1,3	-0,2	1,6	2,5	4	4	
	З.Т.	1,4	3,3	-2	4	5	3,4	2	2,3	6	7,2	5	
ΔO_1	П.Т.	7,8	-1,1	-10,6	-11,2	-9,7	-8,2	-8	-9,2	-8	-11	-15	
	З.Т.	10,5	-3,2	-12,1	-11,3	-10,9	-8,5	-10,4	-9,8	-11,4	-13,5	-13,3	
ΔO_2	П.Т.	-10,5	-8,9	-	-2,6	-3,8	-4,1	-5,3	-3,8	-4,4	-6,8	-6,5	
	З.Т.	-10,2	-8	-	-6,5	-6,9	-7,2	-7,6	-6,9	-10,8	-11,8	-11,5	
ΔO_3	П.Т.	-	-	-	-18,2	-20,3	-18,7	-24,2	-22,3	-25,6	-47,2	-28	
	З.Т.	-	-	-	-8,5	-9,2	-14,6	-18,8	-16,9	-15	-27	-22,7	
ΔO_4	П.Т.	-0,3	6,7	16,4	13,2	15,6	14,9	18,9	17,9	19,5	42	20,5	
	З.Т.	-2,6	6,5	11,4	6,3	10,3	15,7	19,6	16,9	19,2	30,5	21,5	

На рис. 2.36 представлена схема изменения формы в поперечном направлении и величина отклонения вертикального диаметра $\Delta_{\text{вер.}}$ относительного диаметра готовой трубы $D_{\text{г.т.}}$ после формовки, сборки, сварки и экспандирования трубы, где $\Delta_{\text{вер.}} = (D_{\text{вер.}} - D_{\text{г.т.}})$. Наибольшее значение $\Delta_{\text{вер.}}$ имеют трубы с наибольшим соотношением D/S и наименьшим значением прочностных свойств. Среди рассматриваемых сортаментов наибольшему изменению формы подвергаются трубы 1220x12 мм классом прочности K52.

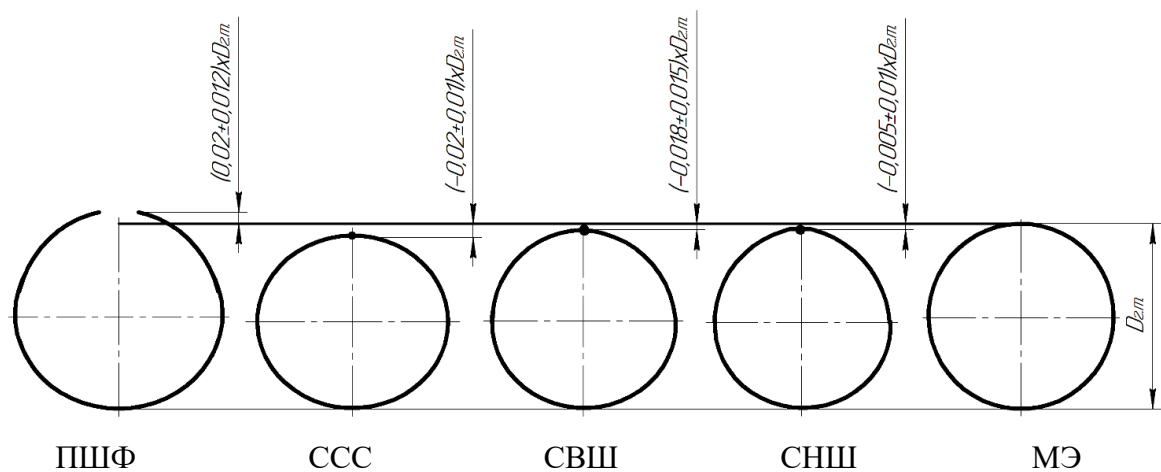


Рис. 2.36 – Изменение формы трубы в вертикальном направлении на стадии шаговая формовка-экспандирование

В процессе сварки основное изменение формы трубы происходит в зонах, прилегающих к сварному шву. При охлаждении сварного шва происходит его усадка, вследствие чего в основном металле, прилегающем к зоне шва и противодействующем данной усадке, возникают продольные и поперечные внутренние напряжения, вызывающие соответствующие деформации сварного соединения (рис. 2.37). За счет продольной усадки в околошовной зоне возникают деформации соединения в продольном направлении относительно оси шва и поперечная, вызывающая угловые деформации.

Для оценки изменения формы трубы в околошовной зоне было проведено измерения диаметров трубы 1220x17,3 мм класса прочности К60 на расстоянии $l=100$ мм от сварного шва и величины наибольшего отклонения от теоретической окружности по периметру прикромочной зоны с помощью шаблона.

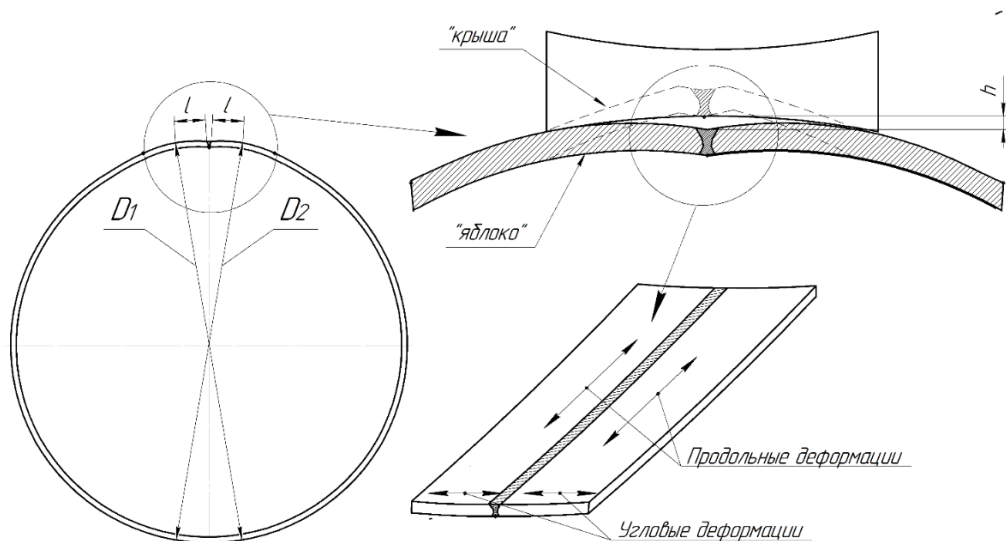


Рис. 2.37 – Изменение формы трубы в околошовной зоне под влиянием сварочных деформаций

До и после экспандирования были проведены измерения по отклонению от теоретической окружности в прикромочной зоне. В табл. 2.13 представлены среднеарифметическое значение отклонения от теоретической окружности и диаметров по периметру по торцам труб. Для получения более объективных данных торцы труб были подразделены на две группы: имеющие форму «яблока» и «крыши» в прикромочной зоне.

Таблица 2.13 – Данные по отклонению от теоретической окружности до и после экспандирования

Торец	Параметр	До экспандирования		После экспандирования	
	форма	«яблоко»	«крыша»	«яблоко»	«крыша»
Передний	Dгор.	1195	1192,5	1219	1219
	Dвер.	1209	1215	1216	1217
	D1	1212	1211,5	1218	1218,5
	D2	1214	1212	1220	1219,5
	H	0,5	1,1	0,3	0,1
Задний	Dгор.	1197	1192	1220	1218
	Dвер.	1210	1218	1215	1216
	D1	1213	1216	1220,5	1220,5
	D2	1214	1216	1220	1219,5
	H	0,6	0,9	0,1	0,05

Трубы, до экспандирования, имеющие отклонение от теоретической окружности в виде «крыша» имеют большее значение вертикального овала, чем трубы имеющие отклонения в виде «яблока». При расширении трубы механическим воздействием прикромочная область растягивается, принимая форму головки экспандера, вследствие чего уменьшается величина h . После экспандирования наибольшее отклонение от теоретической окружности имели трубы с формой «яблока», так как зоны наиболее близкие к сварному шву претерпевают незначительные изменения.

2.4. Выводы по главе

Проведены измерения твердости листового проката в 57 точках в продольном и поперечном направлениях. Установлено, что твердость и температура листа после охлаждения имеют обратную корреляцию; чем выше твердость, тем меньше высота подогнутой кромки и больше расстояние между кромками трубной заготовки после шаговой формовки.

Проведенное исследование формоизменения труб большого диаметра позволило определить направление изменения овальности труб при сборке и сварке технологического, внутреннего и наружного швов и представить диапазон отклонений вертикального диаметра исследуемых труб, на стадии шаговая формовка – экспандирование от диаметра готовой трубы.

При сборке на сборочно-сварочном стане производится коррекция формы трубы с возможностью минимизировать асимметрию. От величины соотношения диаметра к толщине стенки зависит способ формовки и сборки трубной заготовки. На превышение отклонения по форме трубы влияет неверный подбор режимов деформирования при формовке трубных заготовок. Так как при сборке и сварке технологического шва в зоне термического влияния не претерпевает значительных изменений, то для анализа данного процесса в дальнейшем можно использовать метод математического моделирования.

Исследуемые трубы не превышают допустимые нормы, но на основе полученных результатов, можно сделать вывод о том, что при увеличении отношения диаметра к толщине стенки кривизна возрастет и при производстве менее прочного материала, данный параметр может выйти за пределы допустимых норм.

В результате экспериментального исследования позволяют получить зависимость изменения овальности труб под влиянием сварочных деформаций и отношения диаметра к толщине стенки трубы с торца, имеющего наибольшее изменение. Данная зависимость позволит производить формовку и сборку трубной заготовки с учетом овализации при сварке и минимизировать величину овала до экспандирования.

3. Моделирование формоизменения заготовок в линии ТЭСА-1420 (схема «JCOE»)

3.1 Компьютерное моделирование процесса формоизменения трубной заготовки на основных деформационных участках

Компьютерное моделирование процесса формовки труб большого диаметра по схеме JCOE выполнили с помощью специализированного инженерного программного комплекса Deform. Deform конечно-элементная система моделирования, предназначенная для анализа двумерного (2D) и трехмерного (3D) поведения металла при различных процессах обработки давлением.

Моделирование деформационных процессов производили в плоской системе координат (x;y). Учитывалась геометрия по высоте заготовки (толщина) и в поперечном направлении (ширина).

Работа в программном комплексе DEFORM состоит из трех этапов: подготовка данных в Препроцессоре; моделирование процесса (расчет); обработка результатов в Постпроцессоре. Подготовка данных в Препроцессоре включает в себя: определение типа объекта (жесткий, упругий, пластичный, упруго-пластичный, пористый); определение геометрии (импортируем, редактируем или используем примитивы для построения) и создание сетки (если необходимо).

При несении сетки на объект деталь делиться на узлы и элементы. Элементы хранят в себе информацию, о свойствах материала и накопленной деформации, а в узлах хранится информация о контакте, скоростях, температуре и перемещениях. Узлы – это вершины элементов. Элементы соединяются в узлах. Любой объект, который имеет сетку, должен задаваться с учетом используемого материала.

3.1 Исходные данные для численного моделирования

Параметры трубной заготовки. При проведении численного моделирования трубной заготовки для производства трубы 813х39 мм использовали следующие параметры: исходной заготовки: ширина листа после обработки кромок на кромкофрезерном станке 2404мм, толщина – 39 мм, длина листа 12 м; фаски продольных кромок листа (см. рис. 3.1): $S=39\text{ мм}$; $A=10\text{ мм}$; $B=14\text{ мм}$; $C=15\text{ мм}$; $\alpha_1=35^\circ$; $\alpha_2=40^\circ$; $\alpha_3=4^\circ$.

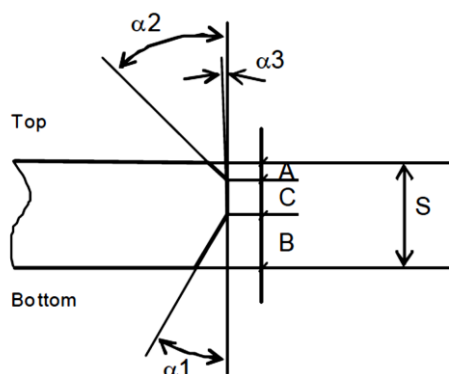


Рис. 3.1 Геометрические размеры, формы фасок продольных кромок листа

Механические свойства: модуль упругости $E = 206$ ГПа, предел текучести 560 МПа, временное сопротивление 620 МПа, относительное удлинение $0,09$

Инструмент для моделирования процесса подгибки кромок на кромкогибочном прессе. При производстве трубы диаметром 813 мм и толщиной стенки 39 мм для подгибки кромок в ТЭСК ТБД ОАО «ВМЗ» применяют верхние и нижние деформирующие инструменты, имеющие одинаковый профиль в контактной зоне.

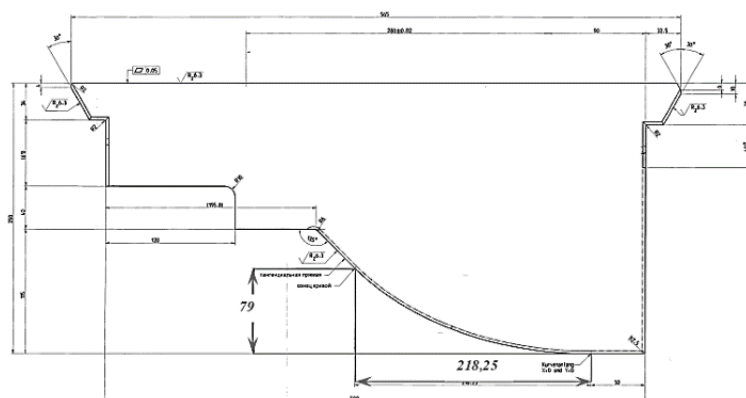


Рис. 3.2 – Верхний инструмент прессы подгибки кромок

Расположения инструментов выбиралось в зависимости от длины деформируемой зоны. Расстояние между верхними деформирующими $A(a,b)$ инструментами с левой и правой стороны равно 1948 мм (см. рис 5.1). Фиксацию исходного листа осуществляли с помощью зажимных балок 3 и 4. При проведении цикла математического моделирования зажимные балки устанавливаются на определенном однозначном расстоянии от пуансона 1.

Инструмент для моделирования формовки основной части. Деформирующим инструментом прессы пошаговой формовки является верхний инструмент (пуансон) и нижний инструмент (опорные бойки).

Габаритные размеры пуансона на чертеже соответствуют представленным в ТИ 153-ТР.ТС-41 «Трубы электросварные прямошовные диаметром 508-1422 мм». Рабочий инструмент (пуансона) имеет следующие параметры: радиус пуансона $R = 240 \text{ мм}$, высота пуансона – $Bn = 105 \text{ мм}$, ширина пуансона – $Ap = 350 \text{ мм}$.

Расстояние между нижними инструментами можно изменить путем подкладочных планок. Номинальное расстояние между зажимными элементами, в которые устанавливаются опорные бойки, составляет 920 мм. При производстве трубной заготовки использовался пакет толщиной 170 мм. Минимальная толщина пакета не должна быть ниже величины, определяемой по следующей формуле:

$$b > A_{II} - \frac{D_R}{4}, \quad D_R - \text{диаметр готовой трубы}; \quad (3.1)$$

$$b > 350 - \frac{813}{4} = 146,75 \text{ мм} \quad 170 \text{ мм} > 146,75 \text{ мм} \quad (3.2)$$

Расстояние между бойками:

$$L = L_{\text{общ}} - 2b_6 - 2b = 320 \quad (3.3)$$

b_6 – ширина бойка;

Инструмент для моделирования доформовки заготовки. Деформирующим инструментом доформовочного прессы является верхний инструмент (пуансон) и нижний инструмент (опорные бойки). При доформовке трубная заготовка не принимает форму инструмента, поэтому геометрия пуансона и бойков универсальна для всех типоразмеров, производимых данным методом.

Инструмент для моделирования экспандирования

Конструкция деформирующего инструмента (головки) гидромеханического экспандера зависит от типоразмера трубы. Трубы диаметром от 711,2 – 836,6 мм и от 1117,6 – 1422,4 (1420) мм: цельные сегменты 1, клин 2, смазочное кольцо 3 гайка 4 и тяга 5 (см. рис. 3.5а).

Основными элементами головки экспандера являются клин и сегменты. При экспандировании заготовка контактирует с сегментами. Количество сегментов зависит от типоразмера трубы. При производстве труб 813х39 мм, используют головку, состоящей из 10 сегментов (см рис. 3.5 б).

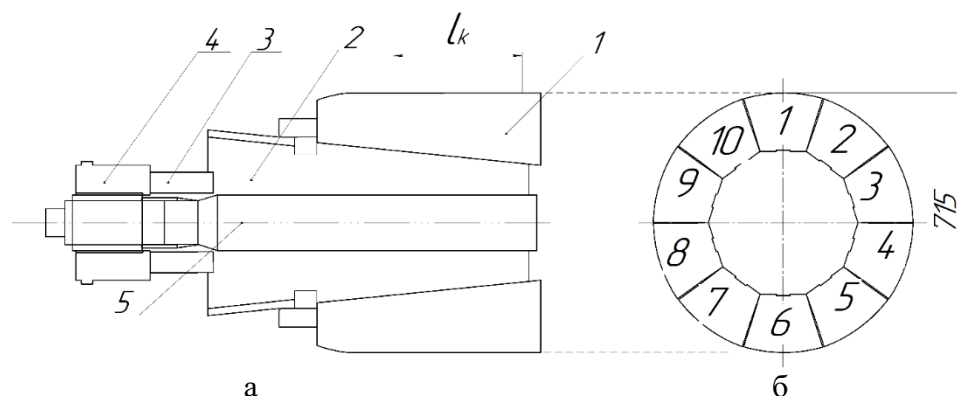


Рисунок 3.3– Деформирующий инструмент экспандера: а) конструкция головки; б) сегменты

Ввод данных по исходной заготовке. При моделировании процессов формоизменения в программном комплексе DEFORM вводятся данные по исходной заготовке: импортируем геометрию; создаем сетку, определяем тип объекта. Сетка имеет исходной заготовки имеет 8500 элементов, из них по толщине 12. Тип объекта упругопластический, свойства задаются по данным ЦЗЛ АО «ВМЗ», температуру окружающей среды 20°.

Для математического моделирования процесса упруго-пластического деформирования стальной заготовки применялись основные соотношения теории пластического течения упрочняющегося материала, в качестве критерия пластичности использовалась классическая гипотеза Губера – Мизеса об удельной энергии формоизменения. Расчеты проводились с использованием билинейной аппроксимации диаграммы деформирования материала.

4.3.1 Моделирование подгибки кромок

Процесс подгибки продольных кромок листов при изготовлении ТБД подразделяется на два основных последовательных этапа: этап 1 – подгибка продольных кромок исходного листа (силовое воздействие); этап 2 – распружинивание после подгибки кромок трубной заготовки (разгрузка).

Подготовка данных. Элементы инструмента прессового оборудования моделировались как абсолютно жесткие тела в предположении малости их деформирования по отношению к заготовке. При вводе геометрии инструмента прорисовывалась геометрия рабочих поверхностей инструмента, непосредственно контактирующих с заготовкой, после выбора коэффициента трения.

После того как установлены взаимодействия пар нужно сгенерировать контакт между объектами. На рис. 3.4 представлен контакт между заготовкой и инструментами.



Рис. 3.4 – Сгенерированный контакт между заготовкой и инструментами ППК

Исходный лист размещался в зажимных балках неподвижно относительно пуансона в крайнем верхнем положении, а матрица поступательно перемещалась вверх по направлению к пуансону. Задаем движение матрицы справа и слева с постоянной скоростью 15 мм/с.

Обработка результатов моделирования

Так как моделирование проводили в условиях плоской деформации, результатом расчета является поперечное сечение листа с подогнутыми кромками, разбитое на 12 элементов по толщине листа, смоделированная за один шаг и в 2 этапа: при нагрузке (рис.3.10а) и разгрузке (рис. 3.10б).

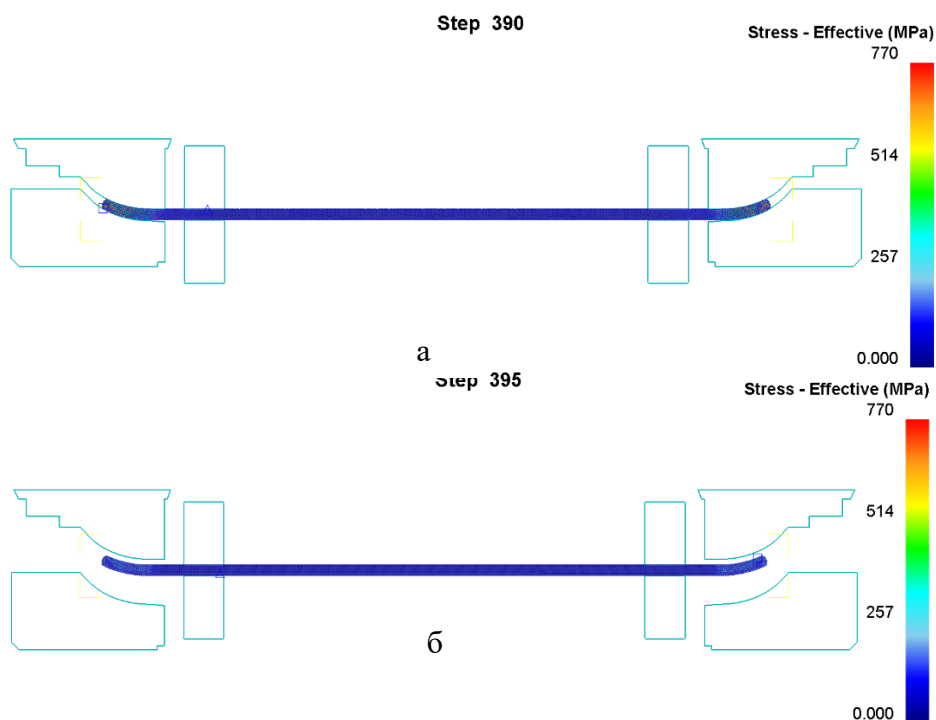


Рис. 3.5 – Общий вид процесса после подгибки кромок: а – нагрузка; б - разгрузка

Результат моделирования показал, что при нагрузке кромка трубной заготовки облегает верхний инструмент прессы подгибки кромок. На рис. 3.11

представлены контактные и неконтактные области деформирующего инструмента и трубной заготовки в поперечном направлении, причем неконтактной поверхностью является середина пуансона.

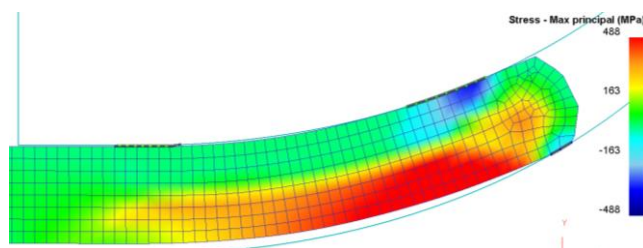


Рис. 3.6 – Области контакта и напряжения в очаге деформации кромки заготовки

В табл. 3.1 представлены координаты точек и радиус кромки трубной заготовки при нагрузке и разгрузке. Средний радиус после разгрузки равен 404 мм, а при нагрузке 377, коэффициент разгрузки равен 1,073.

Таблица 3.1 – Параметры трубной заготовки при нагрузке и разгрузке

Точки	Координаты				Радиус				Кэф. разгрузки	
	При нагрузке		При разгрузке		При нагрузке		После разгрузки			
	X	Y	X	Y	По точк.	Сред		Сред		
1	1055,2	39,58	1055,3	40,2						
2	1064,25	40,35	1064,34	40,96	316,52		333,1		1,052	
3	1073,22	41,38	1073,34	41,97	314,17		329,31		1,048	
4	1082,19	42,67	1082,34	43,22	282,76		297,52		1,052	
5	1091,14	44,25	1091,33	44,77	301,65		316,62		1,050	
6	1100,04	46,11	1100,27	46,57	315,8		331,33		1,049	
7	1108,9	48,22	1109,17	48,61	416,95		458,07		1,099	
8	1117,76	50,54	1118,09	50,85	521,27	376,7	555,92	404	1,066	1,07
9	1126,71	53,05	1127,1	53,28	417,61		506,12		1,212	
10	1135,73	55,8	1136,2	55,91	334,74		365,54		1,092	
11	1144,8	58,84	1145,34	58,81	310,13		343,33		1,107	
12	1153,67	62,13	1154,3	61,93	312,89		297,08		0,949	
13	1162,34	65,65	1163,04	65,29	292,03		313,25		1,073	
14	1171	69,49	1171,77	68,94	814,47		1054,67		1,295	
15	1179,82	73,52		72,77						

Высота подогнутой кромки при нагрузке составляет 33,94 мм, после разгрузки высота подгибки равна 32,58 мм (см. рис. 3.7).

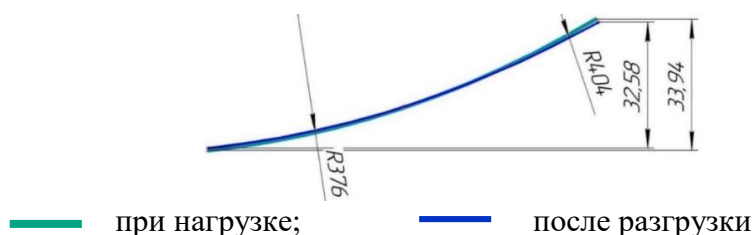


Рис. 3.7 – Высота и средний радиус кромки трубной заготовки.

В таб. 3.2 представлены координаты точек прикромочной зоны трубной заготовки с левой и с правой стороны полученные экспериментальным методом фотограмметрии и результата математического моделирования.

На рис. 3.8 представлена геометрия трубной заготовки после подгибки кромок, построенная по координатам 23 точек, полученные методом фотограмметрии и численного моделирования. Моделирование выполняли в два этапа: использовали исходную заготовку без учета отклонений по форме (рис. 3.8а), где координата Y в продольном направлении до подгибки кромок равна 0 и с учетом отклонения от плоскостности (рис. 3.8б).

Таблица 3.2 – Координаты точек прикромочной зоны трубной заготовки

Точки		Эксперимент		Расчет		Погрешность	
		X	Y	X	Y	X	Y
Левая	1	-1180,97	34,869	-1183,34	34,8896	-0,20%	-0,06%
	2	-1150,04	22,68	-1148,55	20,8588	0,13%	8,03%
	3	-1102,7	11,382	-1104,37	8,367	-0,15%	26,49%
Правая	21	1102,115	11,1007	1100,27	7,5678	0,17%	31,83%
	22	1149,899	22,638	1145,34	19,8092	0,40%	12,50%
	23	1184,92	35,1284	1180,68	33,7789	0,36%	3,84%

После подгибки кромок изменились, только координаты прикромочной зоны, т.е. тогда как профиль заготовки, полученный методом фотограмметрии, имеет выпуклую форму из-за отклонения по форме исходной заготовки.

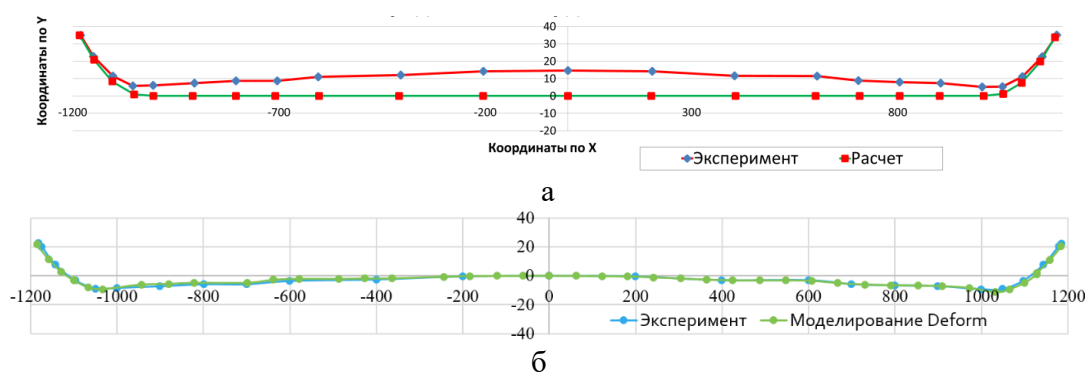


Рис. 3.8 – Координаты точки и профиль трубной заготовки после подгибки кромок

3.1.3 Моделирование пошаговой формовки

Процесс пошаговой формовки по всей ширине при изготовлении ТБД 813х39 мм за 17 шагов и каждый шаг подразделяется на два основных последовательных 3 этапа: этап 1 – перемещение заготовки по горизонтали на расстояние равное $B/(n+1)$; где B – ширина исходной заготовки, n – количество шагов; этап 2 – формовка

трубной заготовки (силовое воздействие); этап 3 – распруживание после формовки трубной заготовки.

Моделирование процесса пошаговой формовки проводилось в едином цикле с этапом подгибки кромок при непрерывной истории нагружения (изменения сложного нелинейного НДС). После окончания анализа подгибки кромок КЭ-модель, с полученным на последнем расчетном шаге (после этапа разгрузки) ввели инструменты прессы шаговой формовки для начала программной процедуры моделирования формовки по всей ширине:

В окне взаимодействия объектов, задаем коэффициент трения, где тип трения «Shear». На рис. 3.9 представлены контакты между заготовкой и деформирующими инструментами.



Рис. 3.9 – Сгенерированный контакт между заготовкой и инструментами ППФ

Трубная заготовка размещалась относительно верхних крайних точек опорных бойков, а пуансон поступательно перемещался вниз, и останавливался при достижении заданной величины хода, со скоростью равной 10 мм/сек.

В окне настройка задачи вводятся данные по ограничению перемещения главного инструмента, которое равно величине хода пуансона для каждого шага $H=h+K$, где h – значение величины хода, предоставленное цехом, K – расстояние по оси Y, от нижней точки пуансона до верхних точек опорных бойков. В табл. 3.3 представлены данные по величине хода шагов с 1 – 16, где $K = 39$ мм - толщина стенки исходного листа.

Таблица 3.3 – Величина хода шагов с 1 – 16 при формовке на ППФ

Шаг	1	2	3	4	5	6	7	8
H	57	56	53	45	49	52	54	54
Шаг	9	10	11	12	13	14	15	16
H	57	56	53	46	50	52	54	54

На рис. 3.10 – 3.12 представлена форма, положение и распределение интенсивности напряжений в трубной заготовке на этапе нагрузки и разгрузки для каждого шага, а также интенсивность деформаций трубной заготовки после окончания этапа формовки основной части профиля.

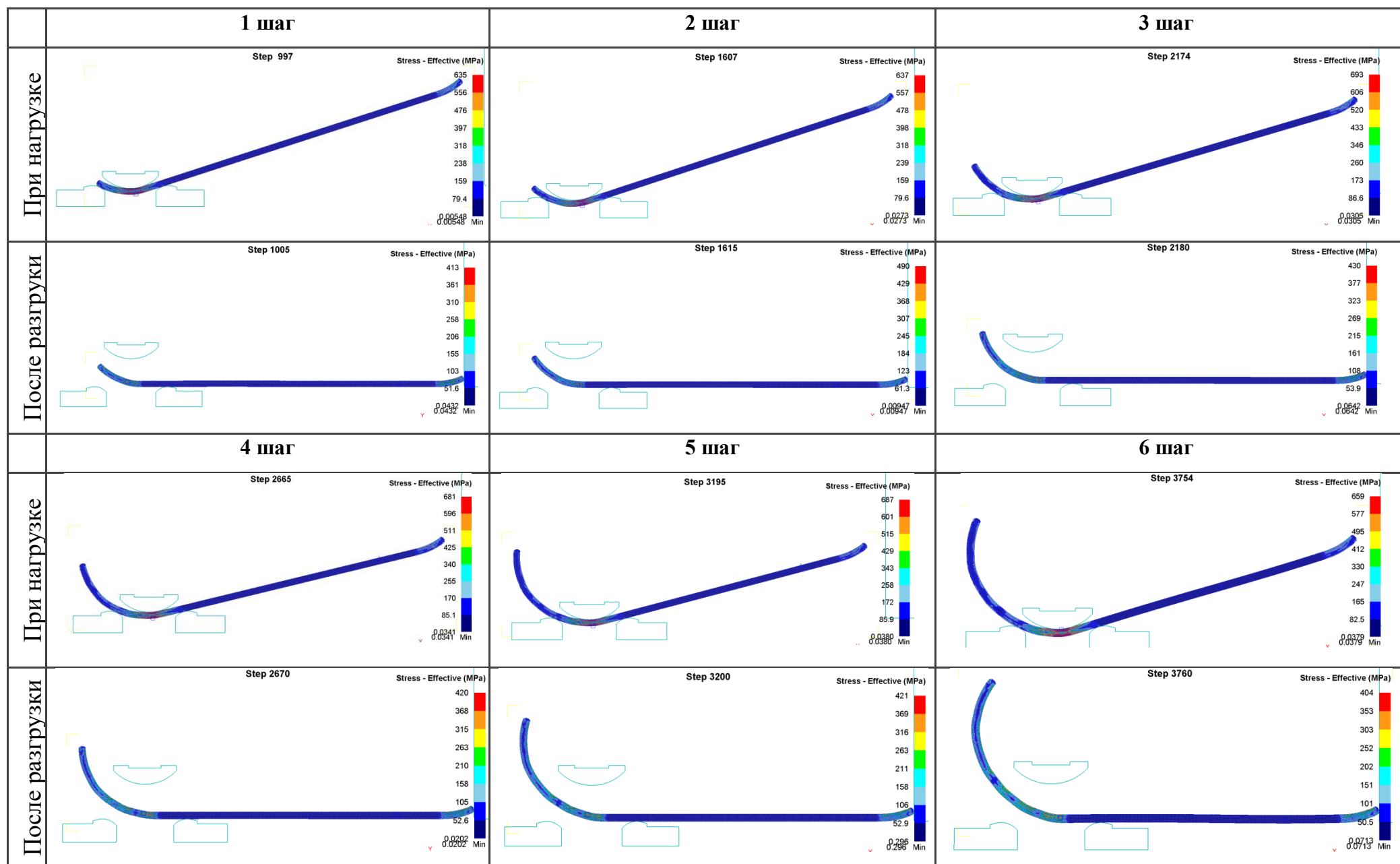


Рис. 3.10 – Форма трубной заготовки и распределения интенсивности напряжения при ШФ на 1- 6 шагах (нагрузка-разгрузка)

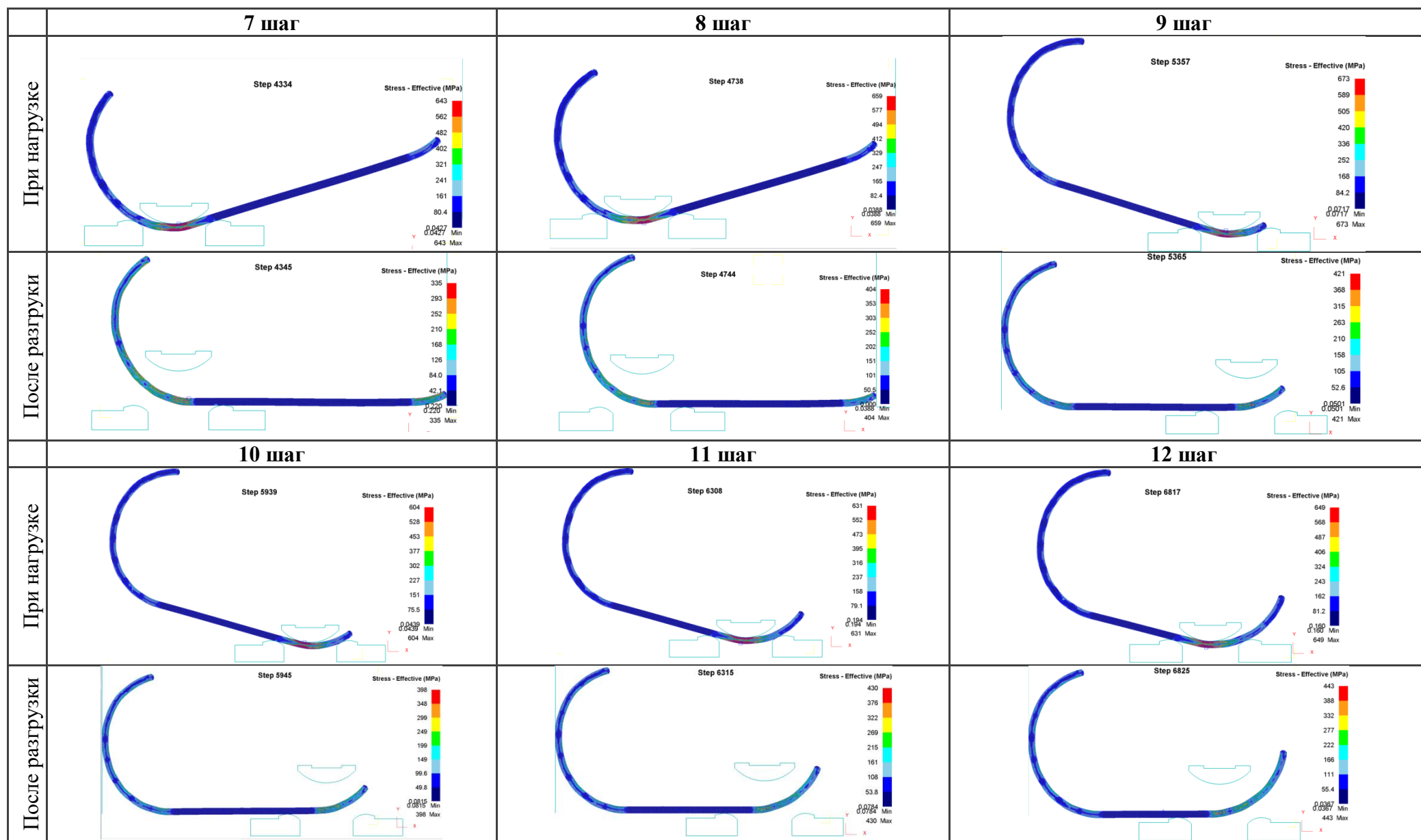


Рис. 3.11 – Форма трубной заготовки и распределения интенсивности напряжения при ШФ на 16-ом шагах (нагрузка-разгрузка)

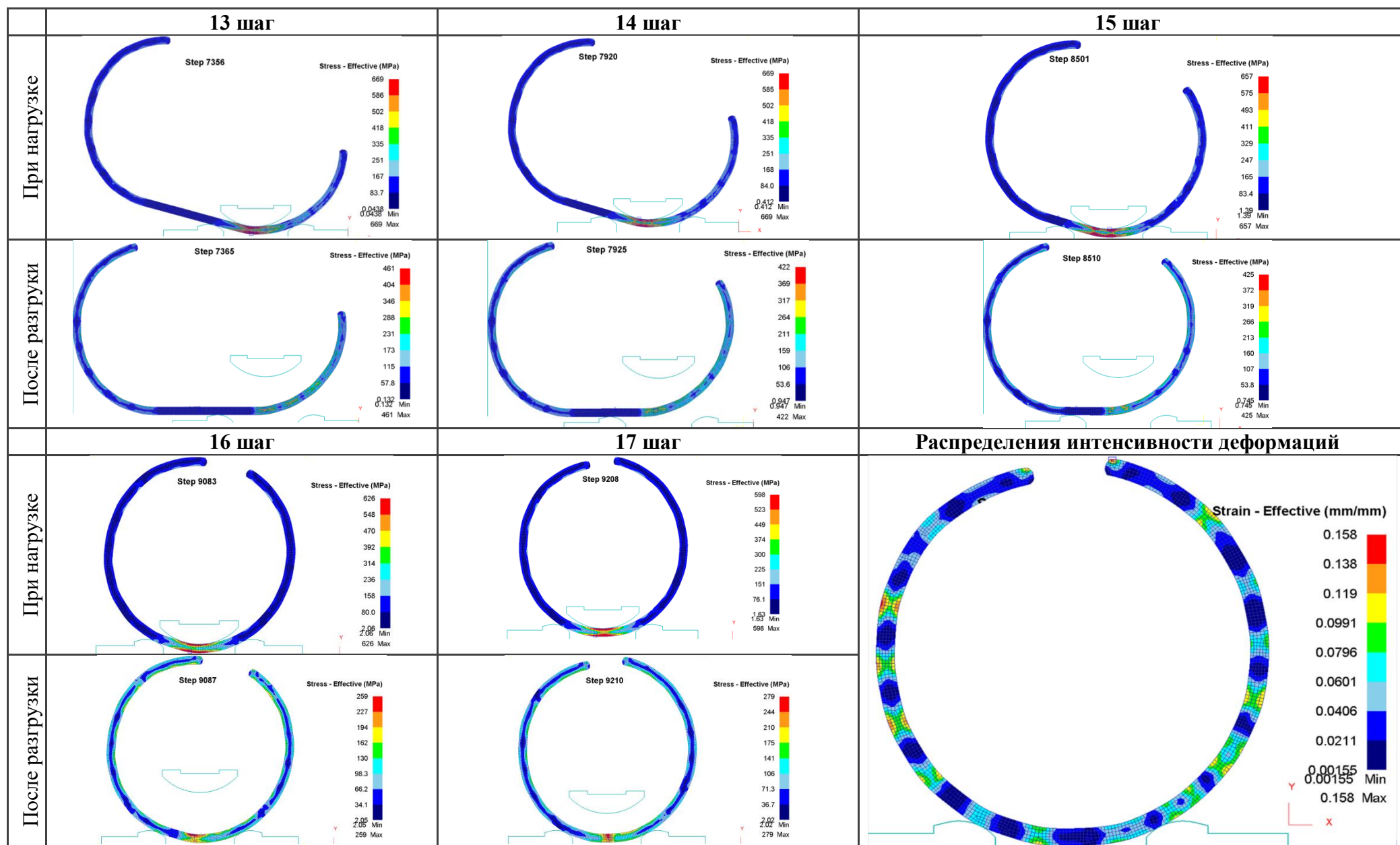


Рис. 3. 12 – Форма трубной заготовки и распределения интенсивности напряжения при ШФ на 13 – 17 шагах

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. 3.13), если процесс формовки идет справа налево, то при нагрузке контактная длина дуги правой части меньше чем левой (шаги № 1 – 8) и, наоборот, при движении трубной заготовки слева направо – левая часть больше правой (шаги № 9 – 16). На рис. 3.14 представлена геометрические параметры трубной заготовки до и после формовки, построенная по координатам 5 точек на шагах, где коэффициент разгрузки составляет 1,07

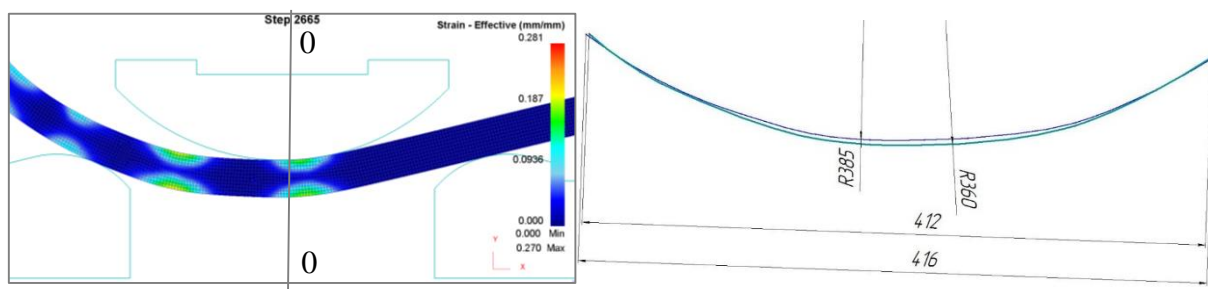


Рис. 3.13 – Четвертый шаг: а) деформации трубной заготовки; б) параметры заготовки

На рис. 3.14 представлено распределение координат точек трубной заготовки после пошаговой формовки по всей ширине.

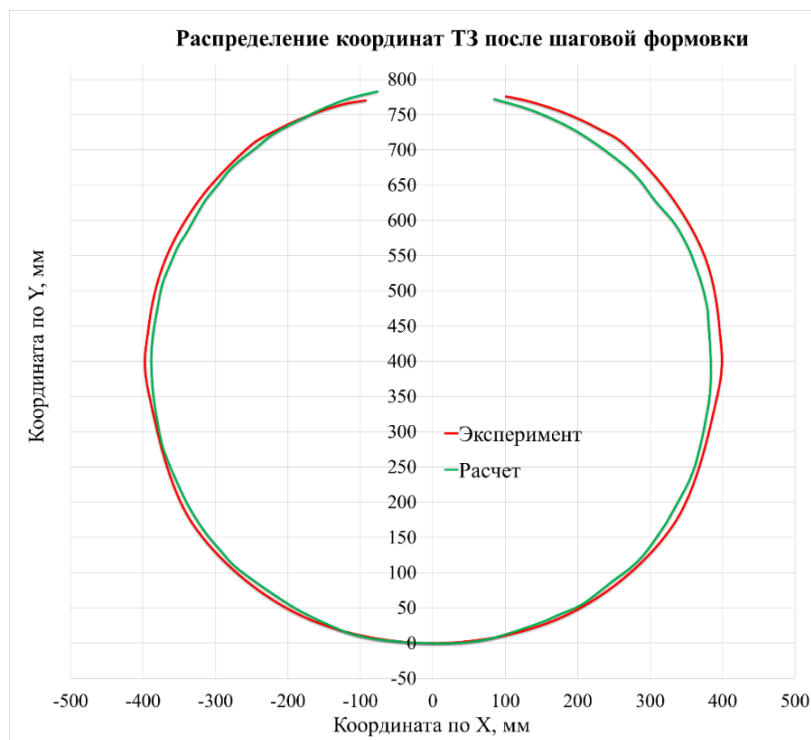


Рис. 3.14 – График распределение координат точек трубной заготовки после пошаговой формовки по периметру

В таб. 3.4 представлены значения точек 1 и 23 по координате Y с левой и с правой стороны после разгрузки на каждом шаге, полученные экспериментальным и расчетным путем.

Таблица 3.4 - Значение точек трубной заготовки по координате Y

Шаг	Эксперимент		Комп. моделирование		Погрешность			
	Левая половина	Правая половина	Левая половина	Правая половина	Левая половина		Правая половина	
					Мм	%	Мм	%
1	111.10	-	109	-	2	1.8	-	-
2	117.86	-	132.15	-	-14.3	-10	-	-
3	233.42	-	244.50	-	-11.08	-4.7	-	-
4	328.94	-	332.02	-	-3,08	-0,91	-	-
5	461.97	-	469.87	-	-7.9	-1.71	-	-
6	593.33	-	619.27	-	-25.94	-4.37	-	-
7	702.44	-	721.47	-	-19.03	-2.71	-	-
8	746.83	-	773.34	-	-26.51	-3.55	-	-
9	-	114.65	-	104.78	-	-	9.88	8.62
10	-	125.56	-	136.00	-	-	-10.44	-8.31
11	-	296.39	-	264.5	-	-	31,5	11,9
12	749.84	396.97	770.45	339.39	-20.61	-2.75	57.58	14.51
13	751.79	517.41	773.26	463.37	-21.48	-2.86	54.04	10.44
14	751.91	629.60	771.09	603.42	-19.19	-2.55	26.18	4.16
15	751.72	723.77	772.26	711.73	-20.53	-2.73	12.04	1.66
16	763.05	758.42	789.25	769.92	-26.19	-3.43	-11.49	-1.52
17	776.08	770.36	772.05	783.13	4.03	0.52	-12.77	-1.66

В результате проведенного расчета получили трубную заготовку с раскрытием по внутренней поверхности равным 162 мм. После окончательной формовки трубная заготовка, полученная численным моделированием по режимам, указанным в табл. 2 имеет смещение кромок по высоте (по координате Y) равное 20 мм.

3.1.4 Моделирование процесса доформовки

Моделирование процесса доформовки, провели за два шага, где каждый шаг подразделяется на три основных этапа: позиционирование трубной заготовки; догибка трубной заготовки (силовое воздействие); распружинивание трубной заготовки после отвода инструмента (разгрузка).

Величина хода главного инструмента (пунсона) для каждого шага зависит от формы заготовки после шаговой формовки. Заготовка размещалась неподвижно относительно верхних крайних точек опорных бойков, а пуансон поступательно перемещается вниз, и останавливается при достижении заданной величины хода.

На рис. 3.15 представлена форма, положение и распределение интенсивности напряжений в трубной заготовке на этапе нагрузки и разгрузки для каждого шага соответственно. Результатом расчета является поперечное сечение трубной заготовки с раскрытием разбитое на 3 - 4 элемента по толщине листа.

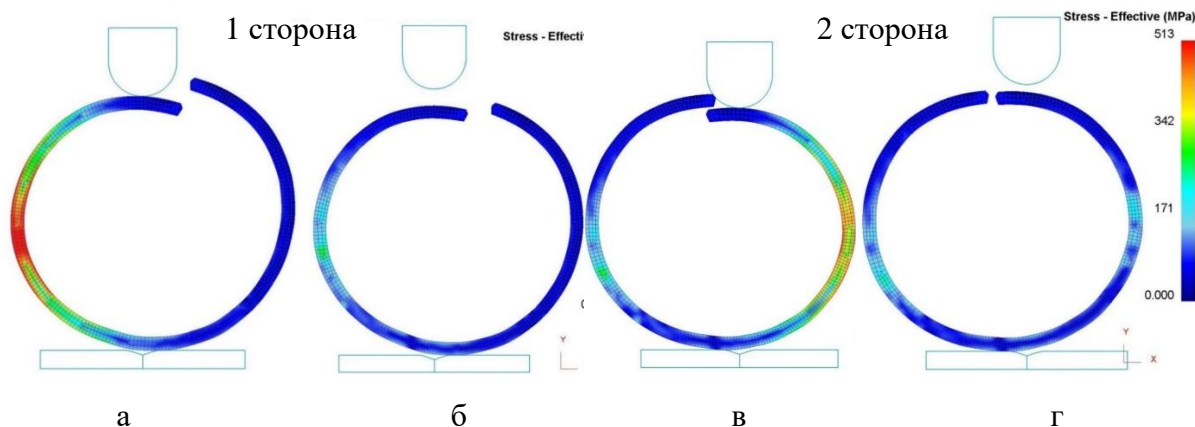


Рис. 3.15 – Форма трубной заготовки и распределения интенсивности напряжения: а, в. – при нагрузке; б, г – после разгрузки (отвод инструмента)

Для подтверждения расчетных данных, процесса доформовки, провели сравнительный анализ результатов математического моделирования и эксперимента. На рис. 3.16 представлены геометрические параметры трубной заготовки, измеряемые после доформовки, где: $D1_{\text{вер}}$ – вертикальный диаметр стороны 1; $D2_{\text{вер}}$ – вертикальный диаметр стороны 2; $D_{\text{гор}}$ – горизонтальный диаметр; $X1, X2$ – расстояние от вертикальной оси трубной заготовки до точки 2 и 4 соответственно; C – смещение кромок; Z – величина зазора.

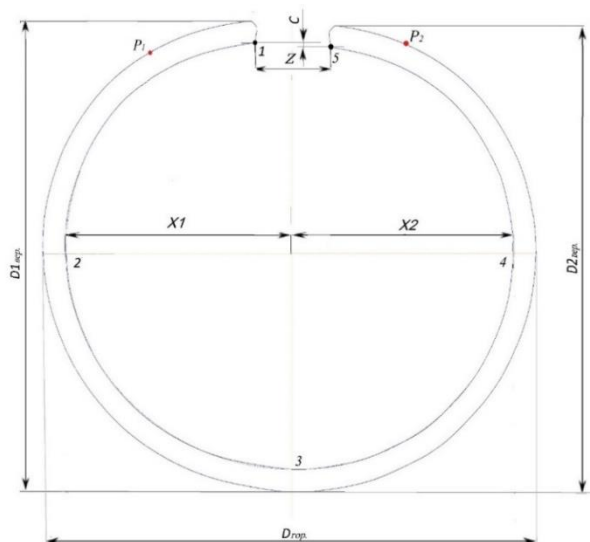


Рис. 3.16 – Геометрические параметры трубной заготовки, измеряемые до и после доформовки

Моделирование проводилось в 2 этапа. На первом этапе проводилось моделирование с использованием реальной геометрии и режима формовки трубной заготовки на участке доформовочного пресса, но без учета остаточных напряжений, возникающих после предшествующих деформационных процессов. На втором использовали исходные данные по геометрии заготовки с учетом распределения НДС по периметру заготовки, полученные после моделирования подгибки кромок и шаговой формовки. Полученные результаты представлены в табл. 3.23.

Таблица 3.5 - Геометрические параметры трубной заготовки после доформовки

Параметры		D1 _{вер}	D2 _{вер}	D _{гор}	Z
Эксперимент		815	815	830	60
Моделирование в программном комплексе Deform2D/3D	Этап 1	808	812	829	55
	Этап 2	815	816,5	828	61,5

На рис. 3.17 представлено распределение интенсивности напряжений по периметру трубной заготовки после доформовки. Максимальное относительное отклонение результатов эксперимента и расчета по геометрии трубной заготовки после процесса доформовки составляет без учета остаточных напряжений 8%, с учетом 2,5 %.

Это объясняется тем, что общая величина разгрузки при проведении моделирования без учета напряженного состояния, возникшие на более ранних деформационных процессах, меньше, чем при учете.

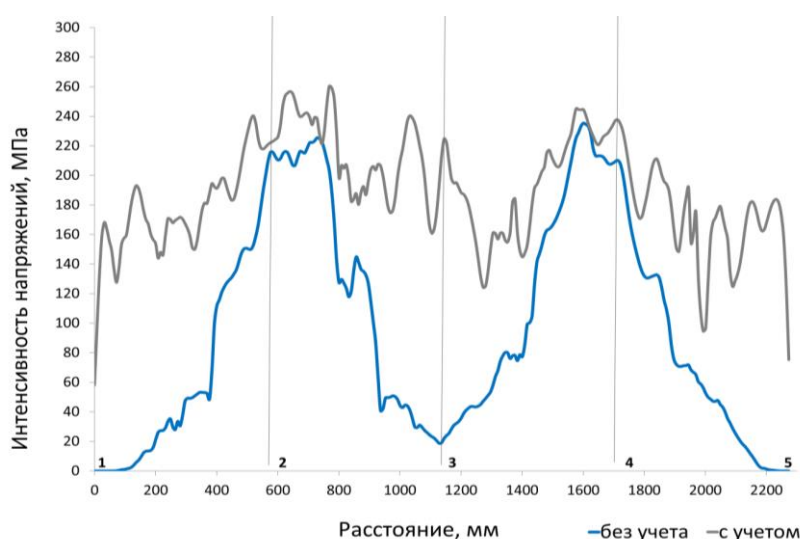


Рис. 3.17 – Распределение интенсивности напряжений по периметру трубной заготовки после доформовки

Максимальное относительное отклонение результатов эксперимента и расчета по геометрии трубной заготовки после процесса доформовки составляет без учета остаточных напряжений 8%, с учетом 2,5 %.

Это объясняется тем, что общая величина разгрузки при проведении моделирования без учета напряженного состояния, возникшие на более ранних деформационных процессах, меньше, чем при учете.

3.1.5 Моделирование процесса сборки

Деформирующим инструментом сборочного стана являются прижимные роликовые обоймы, которые предназначены для постепенного сжатия профиля трубных заготовок. Процесс сборки можно подразделить на следующие этапы: устранение зазора боковыми роликами и превышения кромок верхним роликом (см. рис. 3.18).

При сборке трубной заготовки производится сварка технологического шва на сборочно-сварочном стане (см. рис. 3.19).

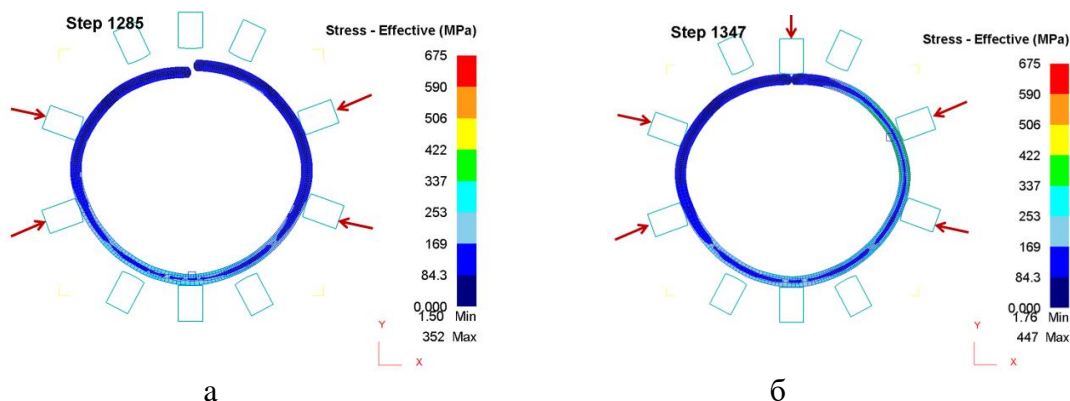


Рис. 3.18 – Сборка трубной заготовки: (а) устранение зазора боковыми роликами; (б) устранения превышения кромок верхним роликом



Рис. 3.19 – Соединение прикромочных узлов заготовки

На рис. 3.20 представлены графики распределения остаточных напряжений после доформовки и сборки для трубы 813х39мм; и после шаговой формовки и сборки для трубы 1420х25,8мм.

При сборке трубной заготовки 813х39 мм на сборочно-сварочном стане изменение формы осуществляли в основном по оси трубы перемещая верхние ролики, причем величина перемещения верхнего правого ролика превышает величину левого, так как труба после доформовки имела асимметричную форму. В

результате сборки трубы напряжения возрастают у основания трубы, причем в результате деформации изгиба на наружной поверхности растягивающие напряжения, а по внутренней – сжимающие.

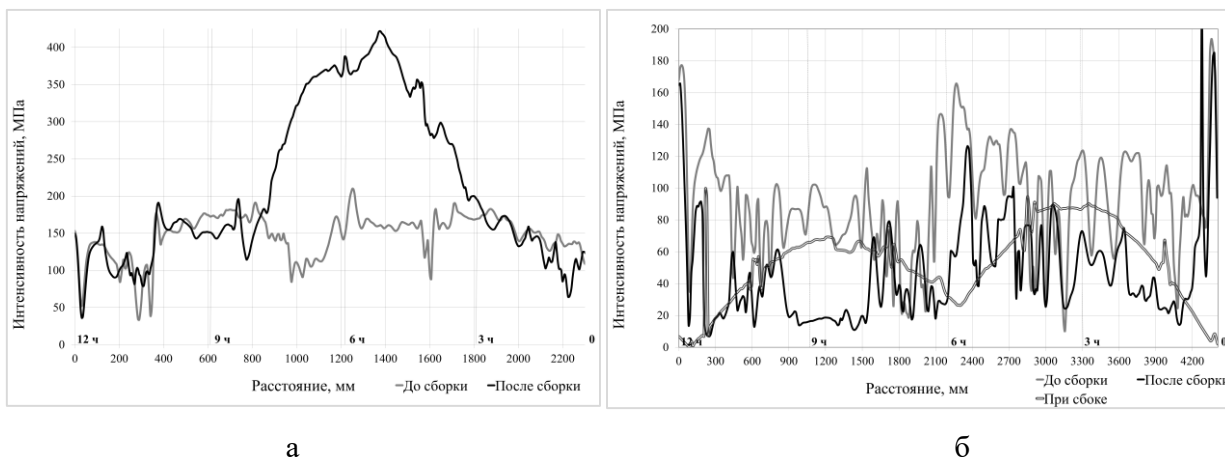


Рис. 3.20 - Распределение интенсивности напряжений по периметру трубы: а - 813x39мм марки стали К65; б - 1420x25,8мм марки стали К60 и до и после сборки трубной заготовки

При сборке трубы 1420x25,8 мм производили перемещение как верхними, так и боковыми роликами, причем из-за ассиметричной формы после шаговой формовки основное изменение формы осуществляли, перемещая левые боковые ролики и правый верхний ролик, так как высота кромки с правой стороны превышала левую.

Так как при сборке трубной заготовки осуществляется сварка технологического шва, то величина напряжений после снятия нагрузки меняется незначительно, т.е. не происходит изменение формы по периметру основного металла трубы после выхода из стана. Величина распределения напряжений по периметру трубной заготовки зависит от способа сборки и положение роликов относительно оси трубы.

3.1.6 Моделирование процесса экспандирования.

Моделирование процесса экспандирования проводилось при непрерывной истории нагружении (изменения сложного нелинейного НДС). Процесс экспандирования подразделяется на 3 этапа: устранение овальности трубы (силовое воздействие); раздача трубы (силовое воздействие); этап 3 – разгрузка после экспандирования (см. рис. 3.21).

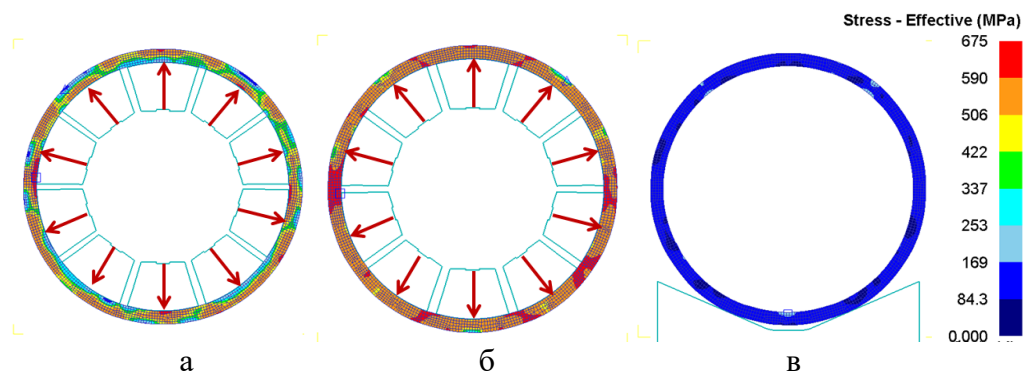


Рис. 3.21 - Распределение напряжений при экспандировании: (а) устранение овальности трубы; (б) раздача трубы; (в) разгрузка

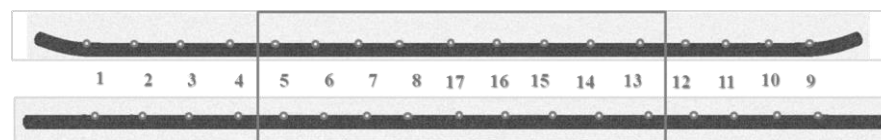
3.2 Физическое и математическое моделирование полуцилиндра

При проведении эксперимента непосредственно на производственных участках не представляется возможным проводить более глубокие исследования по установлению зависимости по ранее указанным факторам, так же возникает необходимость подтверждения выводов полученные в результате численных решений (статистически обоснованные). С целью решения данной проблемы в центре исследовательских лабораторий инженерно-технологического центра (ЦИЛ ИТЦ АО «ВМЗ») физическое моделирование процесса пошаговой гибки.

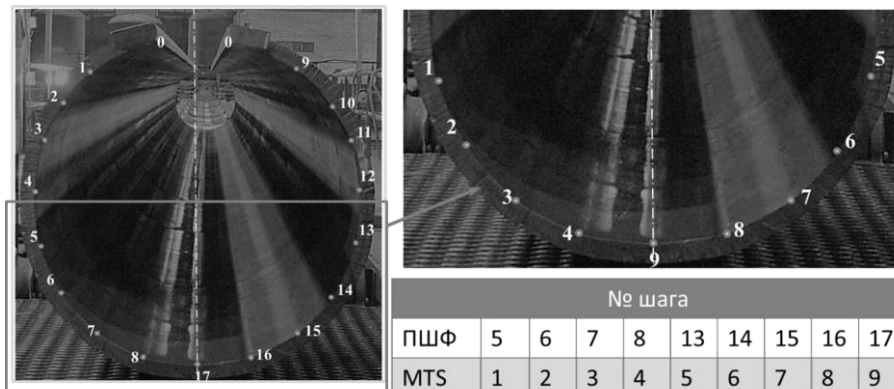
Физический модельный эксперимент провели в три этапа: произвели выбор режима формоизменения аналитическим методом, проверили режимы методом математического моделирования и провели физическое моделирование на лабораторной машине MTS Landmark.

В линии ТЭСА 1420 производят одношовные и двухшовные трубы большого диаметра, т.е. собранные из одной трубной заготовки с раскроем и из двух полуцилиндров. Машина MTS Landmark лаборатории нестандартных механических испытаний обеспечивает получение полуцилиндров, что дает возможность производить оценку режимов формовки трубной заготовки с раскроем (нижнюю половину) и полуцилиндра (см. рис. 3.22).

Физический эксперимент в лабораторных условиях проводили по следующей последовательности: измерение геометрических параметров исходного образца; разметка исходного образца; расположение образца в исходную позицию перед каждым шагом; формовку образца; фиксация геометрических и силовых параметров после каждого шага: до нагрузки, при нагрузке и после разгрузки.



а



б

Рис. 3.22 Расположение точек на заготовке по последовательности шагов формовки: а) исходная заготовка; б) заготовка после шаговой формовки.

Исходный образец имел геометрию, где отношение толщины и ширины реальной заготовки и лабораторного образца равно отношению радиусов пуансона ПШФ и верхнего ролика лабораторной машины. Перед формовкой, провели разметку исходного образца, проведя девять линий, на расстоянии 13,3 мм, где точки 1 – 4 соответствуют точкам 5 – 8 представленной на рис. 3, а 5 – 9 соответствуют точкам 13 – 17(см. рис. 3.23).

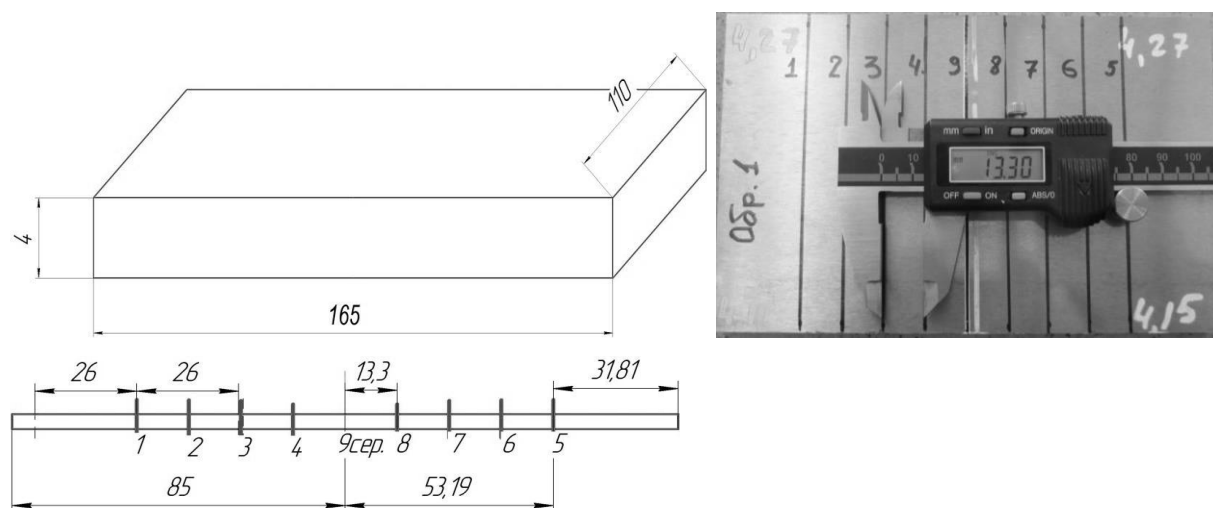


Рис. 3.23 - Разметка и размеры исходного физического образца

Для физического моделирования процесса использовались верхний инструмент, ролик 1 радиусом 25 мм и нижний инструмент ролики 2, 3 радиусом 10 мм. Соотношение радиусов реального пуансона ПШФ и ролика лабораторной машины составляет 240/25. На рис. 3.24 представлено расположение верхнего и нижнего инструментов относительно образца.

Формовку образцов осуществили по следующей последовательности: с первой стороны по размеченным точкам 1 – 4, со второй стороны по точкам 5 – 8 и 9 точку посередине.

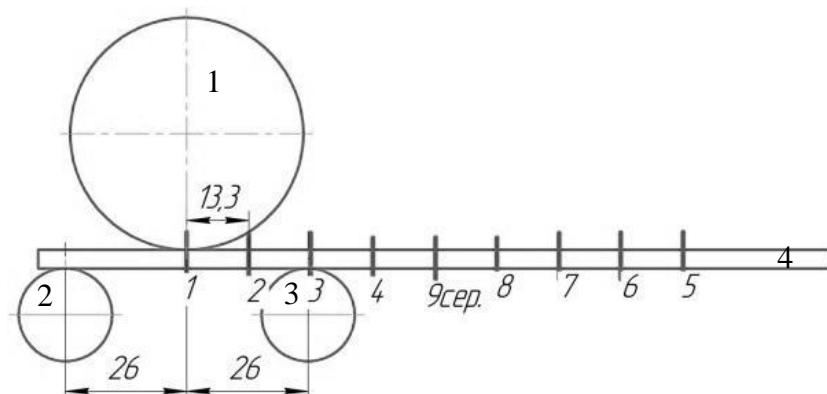


Рис. 3.24 –Инструмент машины MTS Landmark 250

На первом этапе провели физическое моделирование процесса для отладки технологии. На рис. 3.25 представлен второй шаг при нагрузке модельного образца.



Рис. 3.25 – Второй шаг формовки образца на первом этапе

На рис. 3.26 представлена окончательная геометрия сформованного образца на машине MTS, где длина хорды равна 160 мм, длина прогиба составляет 17 мм.



Рис. 3.26 – Окончательная геометрия образца после формовки на первом этапе

Сравнительный анализ по геометрии образца после формовки показал, что относительное среднее отклонение результатов расчета и эксперимента по координатам 7 точек составляет 3%.

На втором этапе подобрали величину хода для каждого шага для получения полуцилиндра диаметром 85 мм и провели математическое моделирование с учетом геометрии исходного образца и деформирующего инструмента. По тем же режимам проверили эксперимент на лабораторной машине. На рис. 3.27 представлен четвертый шаг при нагрузке модельного образца.

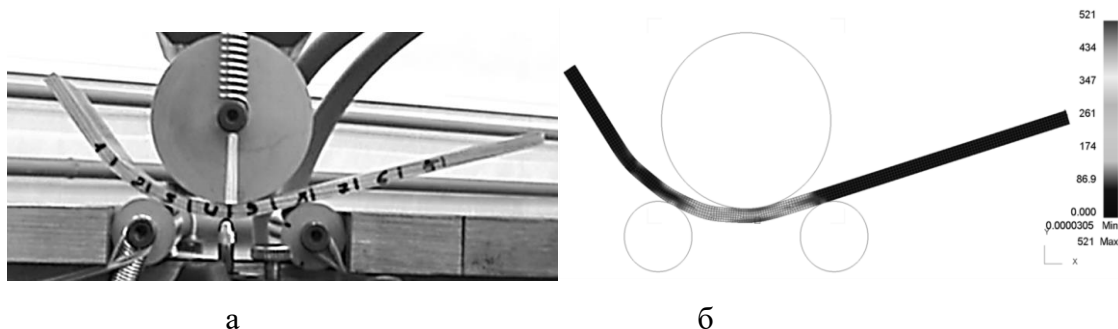


Рис. 3.27 – Схема формовки образца при математическом (а) и физическом (б) моделировании 4 шага на втором этапе

После каждого шага формовки провели измерение геометрии образца и зафиксировали усилие деформирования при физическом и математическом моделировании.

Максимальное значение усилия деформирования было на первом шаге, которое равнялось 24 кН. Отклонение по усилию деформирования по шагам не превышало 2,2%.

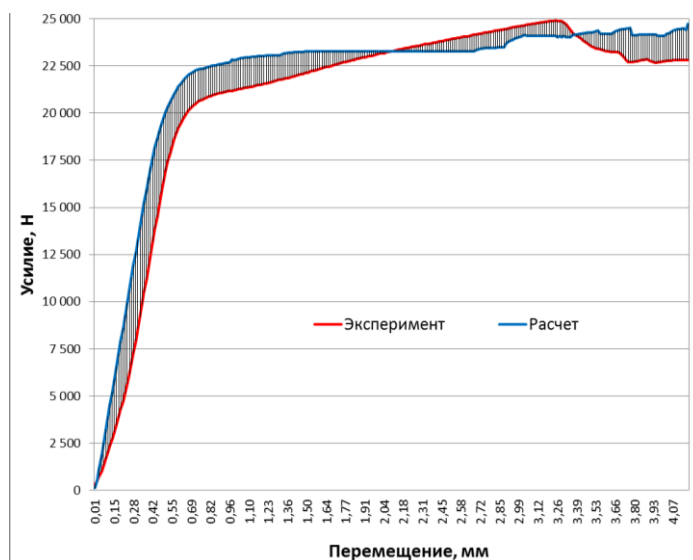


Рис. 3.29 – Усилие деформирования на первом шаге

Относительное отклонение результатов расчета (рис. 3.30а) и эксперимента (рис. 3.30б) по геометрии составляет при формовке первой половины 1,9 %, второй - 2,2 % (см. приложение А). Сравнительный анализ по геометрии образца после

формовки показал, что относительное среднее отклонение результатов расчета и эксперимента по координатам 9 точек составляет 2,1%.

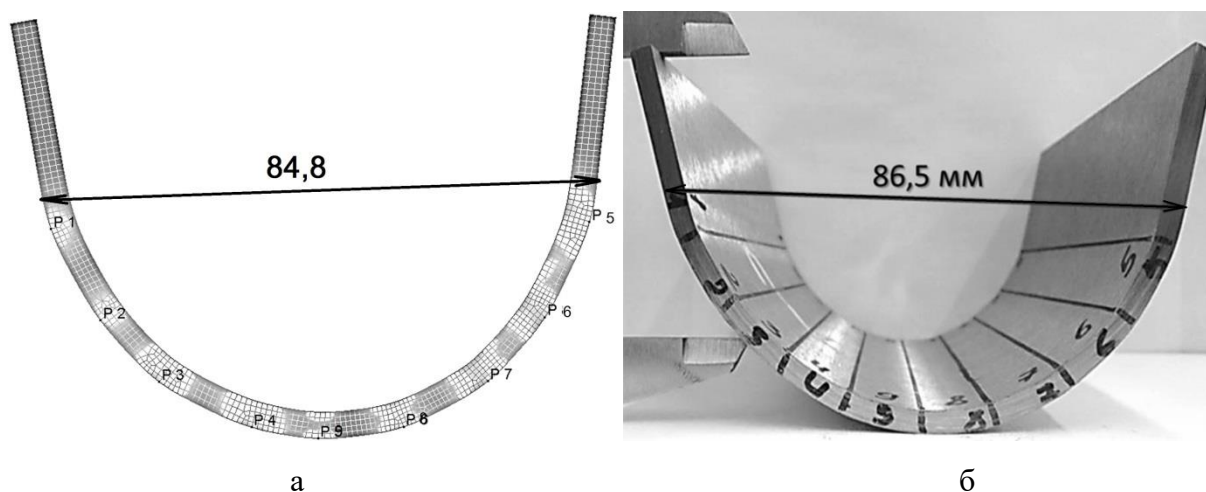


Рис. 3.30 - Окончательная геометрия образца после формовки на втором этапе: математическая (а) и физическая (б) модель

В отличие от первого модельного образца, второй образец имел асимметрию 4,8% в виде смещения кромок. Следовательно, основной причиной асимметрии трубной заготовки после шаговой формовки является отличие контактного взаимодействия второй стороны от первой, которое прямопропорционально величине хода.

3.3 Разработка комплексной методики расчета параметров формоизменения трубной заготовки по технологии JCOE

В данной главе представлен расчет изменения формы трубной заготовки при нагрузке и после разгрузки следующих процессов: подгибка кромок, шаговая формовка, доформовка, сборка и экспандирование.

В диссертационной работе при разработке методов аналитического расчета изменения геометрических параметров при производстве трубной заготовки на стадии лист-труба основные допущения и гипотезы для каждого процесса рассматривается индивидуально.

3.3.1 Методика расчета параметров заготовки при подгибке кромок

Расчет геометрических параметров прикромочной области выполнили по следующей последовательности:

1. Выбираем схему контакта заготовки и инструмента;
2. Определяем координаты деформирующего инструмента;

3. Определяем геометрические параметры трубной заготовки с учетом настройки положения прессы

4. Определяем геометрические параметры прикромочных участков трубной заготовки при нагрузке и после разгрузки

Определяем схему контакта деформирующего инструмента и заготовки

На сегодняшний день было проведено ряд математических и экспериментальных исследований по установлению геометрических параметров трубной заготовки при подгибке кромок, где утверждается о том, что прикромочная область трубной заготовки при нагрузке имеет форму верхнего деформирующего инструмента, так как трубная заготовка при нагрузке облегает ее. Деформирующий инструмент прессы подгибки кромок имеет эвольвентный профиль, т.е. подогнутая часть кромки в момент нагрузки в области контакта должна иметь профиль эвольвенты [35].

По результатам проведенных экспериментальных исследований, представленные в диссертационной работе, можно сделать вывод о том, что прикромочная область трубной заготовки не полностью облегает верхний деформирующий инструмент и имеет как контактные, так и неконтактные зоны.

На основе выше указанного были разработаны две расчетные схемы, где длина контактных и неконтактных участков зависят от высоты подогнутой кромки при нагрузке. Первая расчетная схема действует при условии $h_{наг.} < 0,8H_{наг.}$ (см. рис. 3.33а), вторая при условии $h_{наг.} \geq 0,8H_{наг.}$ (см. рис. 3.33б), где $H_{наг.}$ – предельно допустимое значение высоты подгибки кромок при нагрузке.

Данное значение достигается при контакте крайней точки прикромочного участка по внутренней поверхности с пуансоном. Для толстостенных труб с соотношением диаметра к толщине стенки более 40 предельно допустимая высота равна толщине стенки деформируемой заготовки.

На рис. 3.31 представлена расчетная схема процесса подгибки кромок, где значение высоты подгибки кромок при нагрузке соответствует условию $h_{наг.} < (0,75 - 0,8)S$ и $h_{наг.} \geq (0,75 - 0,8)S$ соответственно. По данным расчетным схемам длину очага деформации разделили на 4 участка (см. рис 1): два недеформируемых 1 и 4; один контактный 2 (схема 1) и 3 (схема 2); один неконтактный 3 (схема 1) и 2 (схема).

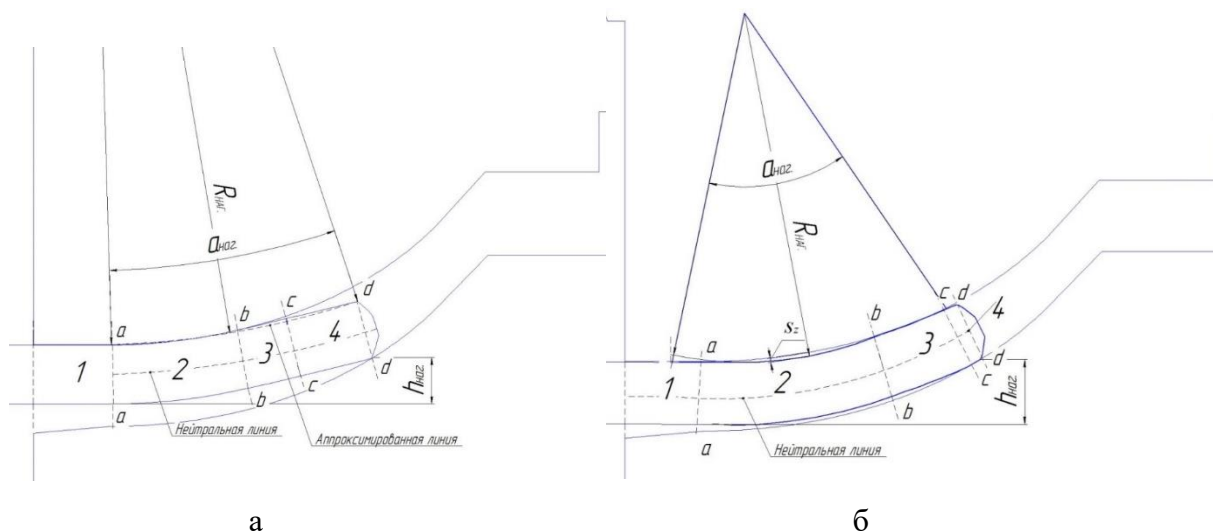


Рисунок 3.31 – Схема процесса подгибки кромок.

Определяем координаты деформирующего инструмента

Начало системы координат следует вводить в зависимости от цели решаемой задачи. Если поставлена цель – определить геометрические параметры прикромочной зоны, с учетом отклонений по расположению исходной листовой заготовки по ширине и длине, то начало системы координат будет в середине листовой заготовки в точке O (рис. 3.32), без учета в точке O_I . Для аналитического исследования геометрических параметров трубной заготовки при подгибке кромок введем декартовую систему координат с взаимно перпендикулярными осями для первого случая OX и OY , для второго – $O_I X_I$ и $O_I Y_I$.

Как отмечалось ранее матрица (нижний деформирующий инструмент) и пуансон (верхний деформирующий инструмент) пресса подгибки кромок имеют профиль эвольвенты, следовательно, для расчета профиля пуансона необходимо определить координаты точек эвольвенты в системе $X_I O_I Y_I$. На рис. 3.31 представлены систем координаты точек профиля кромки в системах координат ZOY_0 и $X_I O_I Y_I$, где φ_i – угол эвольвенты; L_R – длина дуги окружности от нулевой точки, равной радиусу эвольвенты;

a – радиус эволюты (окружности); $\varphi_0 = 43^\circ$ – начальный угол эвольвенты;

$\varphi_k = 88^\circ$ – конечный угол эвольвенты

В общем случае уравнение эвольвенты окружности в форме имеет вид:

$$Z(\varphi) = a \cos \varphi + a \varphi \sin \varphi \quad (3.4)$$

$$Y_0(\varphi) = \varphi \sin \varphi + a \varphi \cos \varphi \quad (3.5)$$

Для того чтобы в дальнейшем определить параметры кромки при нагрузке перейдем в систему координат XOY :

$$X_i = (Y_{0_0} - Y_{0_i})\sin\varphi - (Z_0 - Z_{0_i})\cos\varphi \quad (3.6)$$

$$Y_i = (Y_{0_0} - Y_{0_i})\cos\varphi + (Z_0 - Z_{0_i})\sin\varphi \quad (3.7)$$

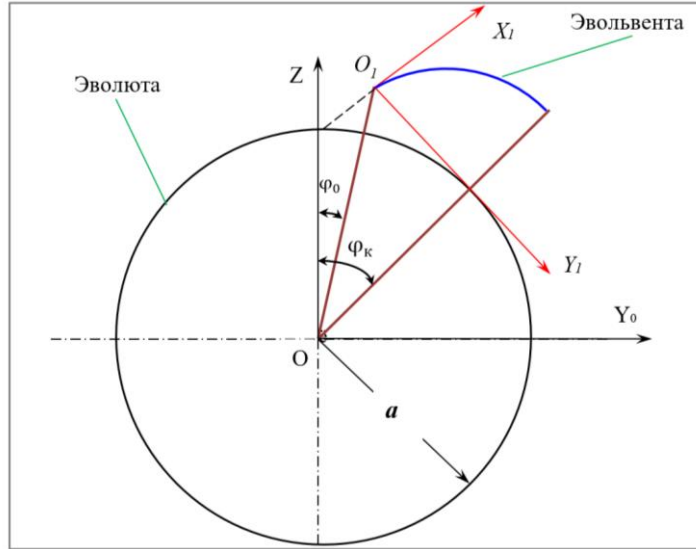


Рис. 3.32 – Система координаты точек профиля инструмента в системах координат ZOY_0 и $X_1O_1Y_1$.

Определяем геометрические параметры заготовки с учетом настройки положения прессы

Основными геометрическими параметрами трубной заготовки после подгибки кромок является ширина, радиус и высота подогнутой кромки.

Определение ширины кромки возможно при известной ширине исходного листа и настройки расположения инструментов относительно центра деформируемой заготовки. Первоначально определили ширину листа необходимую для получения готовой трубы с заданным диаметром с учетом величины остаточной деформации $\varepsilon_{ост}$ по формуле:

$$B_{\text{л}} = \frac{\pi(D_{\text{з.м.}} - S_m)}{1 + \varepsilon_{\text{ост}}} \quad (3.8)$$

Далее определили ширину кромки $B_{\text{кр}}$ с учетом настройки инструмента ППК (рис. 3.33):

$$B_{\text{кр}} = \frac{B_{\text{л}} - A}{2} \quad (3.9)$$

где A - расстояние между верхними инструментами 2, X_{II} - плоский участок верхнего инструмента; $B_{л}$ – ширина листа; $B_{ф}$ – ширина фаски.

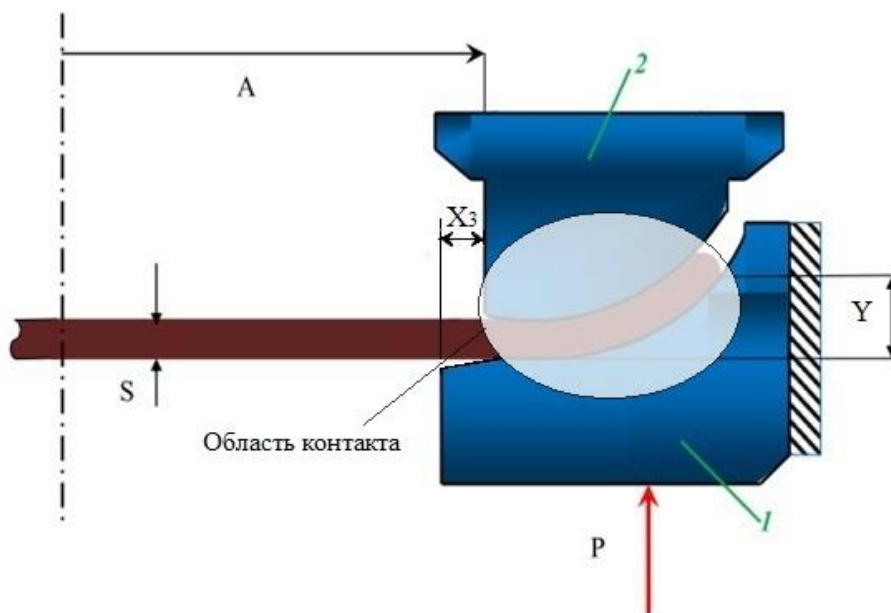


Рисунок 3.33 – Схема настройки рабочего инструмента ППК

При определении радиуса после разгрузки необходимо учитывать изменение радиуса кромки на стадии шаговой формовки, доформовки и экспандирования.

При производстве тонкостенных труб большого диаметра формовка по внутренней и доформовка по наружной поверхности прикромочной области не проводится, следовательно, радиус в прикромочной области после подгибки кромок равен радиусу до экспандирования:

$$R_{ПК} = R_{доЭК} = \frac{\left(\frac{D_{э.м.}}{2} - S_m \right)}{(1 + \varepsilon_{ост.})} \quad (3.10)$$

Для труб с соотношением диаметра к толщине стенки в диапазоне $40 < D_{э.м.}/S_m < 70$, производится формовка прикромочной зоны по внутренней поверхности на прессе шаговой формовки:

$$R_{ПК} = R_{доЭК} \times K_{ПШФ}, \quad (3.11)$$

Где $K_{ПШФ}$ – коэффициент разгрузки после шаговой формовки.

При производстве толстостенных труб с соотношением диаметра к толщине стенки < 40 , производится формовка прикромочной зоны по наружной поверхности на доформовочном прессе и внутренней поверхности на прессе шаговой формовки:

$$R_{ПК} = R_{доЭК} \times K_{ДФ} \times K_{ПШФ}, \quad (3.12)$$

где $K_{Дф}$ – коэффициент разгрузки после доформовки;

Для обеспечения необходимого радиуса прикромочной области заготовки после подгибки кромок, необходимо выбрать деформирующий инструмент и определить длину контактной зоны.

В технологических инструкциях для каждого сортамента представлен номер верхнего и нижнего деформирующих инструментов и их расположение относительно друг друга.

Ширина деформируемого участка кромки $b_{ПК}$ равна:

$$b_{ПК} = B_{КР} - X_{П} - B_{Ф}$$

где $X_{П}$ – плоский участок верхнего инструмента; $B_{Ф}$ – ширина фаски.

Высота подогнутой кромки после разгрузки равна:

$$h_{ПК} = (R_{ПК} + S)(1 - \cos \alpha_{ПК}), \quad (3.13)$$

$$\text{где } \alpha_{ПК} = \frac{b_{ПК}}{R_{ПК} + \frac{S}{2}} - \text{угол подогнутой кромки после разгрузки} \quad (3.14)$$

Определим геометрические параметры прикромочной области трубной заготовки при нагрузке.

Для упрощения расчета примем допущение, что радиус прикромочной зоны по всей длине имеет один радиус, т.е. аппроксимируем кривую линию для получения однорадиусной схемы.

Радиус подогнутой кромки при нагрузке определим по теореме Ильюшина о разгрузке:

$$\frac{1}{\rho_{раз.}} = \frac{1}{\rho_{наг.}} - \frac{1}{\rho_{упр.}} \quad (3.15)$$

$$\rho_{наг.} = \frac{\rho_{упр.} \times \rho_{раз.}}{\rho_{упр.} + \rho_{раз.}} \quad (3.16)$$

где $\rho_{раз.} = R_{ПК} + \frac{S}{2}$ – остаточный радиус нейтрального слоя;

$\rho_{наг.}$ – радиус при нагрузке нейтрального слоя; $\rho_{упр.}$ – радиус упругого слоя.

Остаточный радиус нейтрального слоя равен:

$$\rho_{наг.} = \frac{M \times \left(R_{ПК} + \frac{S}{2} \right)}{M + EI \left(R_{ПК} + \frac{S}{2} \right)} \quad (3.17)$$

Высота подогнутой кромки при нагрузке равна:

$$h_{наг.} = R_{наг.} (1 - \cos \alpha_{наг.}) + S \quad (3.18)$$

где $R_{наг.} = \rho_{наг.} - \frac{S}{2}$ – радиус подогнутой кромки по внутренней поверхности

при нагрузке;

$$\text{угол подогнутой кромки при нагрузке } \alpha_{наг.} = \frac{b_{ПК}}{\rho_{наг.} + \frac{S}{2}} \quad (3.19)$$

Определяем геометрические параметры прикромочных участков трубной заготовки при нагрузке и после разгрузки

После определения геометрических параметров подогнутой кромки по аппроксимированной линии через обратную задачу, необходимо определить реальную геометрию прикромочной зоны.

Для первой расчетной схемы расчет необходимо проводить только для участков 2 и 3, так как 1 и 4 участки недеформируемые. Второй участок является контактным, поэтому имеет форму эвольвенты. Третий участок является неконтактным и имеет однорадиусную форму.

По результатам математического моделирования в программном комплексе Deform 2D/3D получили уравнение зависимости высоты подогнутой кромки при нагрузке и координаты точки по внутренней поверхности в сечении b – b:

При условии $h_{наг.} < (0,75 - 0,8)S$

$$h_{b-b} = 0,16e^{\frac{0,13h_{d-d}}{n_1}} \times n_1 \quad (3.20)$$

где h_{b-b} – высота подогнутой кромки в сечении b–b; h_{d-d} – высота подогнутой кромки в сечении d–d, $n_1 = 0,9 - 2,2$ – коэффициент соотношения, учитывающее радиус окружности эвольвенты.

Определяем распределение радиусов и длину сечения a – b, по координатам точки (X_b ; Y_b) на профиле пуансона, где значение координаты Y_b соответствует значению h_{b-b} .

Длина сечения $a - b$ по внутренней поверхности равна длине дуги на верхнем инструменте:

$$L_{a-b} = \frac{\rho_b^2 - \rho_a^2}{2a} \quad (3.21)$$

где ρ_b – радиус эвольвенты в сечении $b - b$; ρ_a – радиус эвольвенты в сечении $a - a$; a – радиус основного круга эвольвенты;

Длина сечения $b - c$ и $c - d$:

$$L_{b-c} = (0,07 \div 0,08)L_{a-b} \quad (3.22)$$

$$L_{c-d} = b_{ПК} - (L_{b-c} + L_{a-b}) \quad (3.23)$$

Для второй расчетной схемы расчет необходимо проводить только для участков 2 и 3, так как 1 и 4 участки недеформируемые. Второй участок является неконтактным и имеет однорадиусную форму. Третий участок является контактными, поэтому имеет форму эвольвенты.

Уравнение зависимости высоты подогнутой кромки при нагрузке и координаты точки по внутренней поверхности в сечениях $b - b$ и $c - c$ имеет вид:

При условии $h_{наг.} \geq (0,75 - 0,8)S$

$$h_{b-b} = (0,87 \times h_{d-d} + 18,2) \times n_2 \quad (3.22)$$

$$h_{c-c} = 0,16e^{\frac{0,13h_{d-d}}{n_2}} \times n_2 \quad (3.23)$$

где h_{c-c} – высота подогнутой кромки в сечении $c-c$; h_{d-d} – высота подогнутой кромки в сечении $d-d$; $n_2 = 1,1 - 2,4$ – коэффициент соотношения, учитывающее радиус окружности эвольвенты по схеме 2.

Определяем распределение радиусов и длину сечения $b - c$, по координатам точек $(X_b; Y_b)$ и $(X_c; Y_c)$ на профиле пуансона.

Длина сечения $b - c$ по внутренней поверхности равна длине дуги на верхнем инструменте:

$$L_{b-c} = \frac{\rho_c^2 - \rho_b^2}{2a} \quad (3.24)$$

где ρ_b – радиус эвольвенты в сечении $b - b$; ρ_c – радиус эвольвенты в сечении $c - c$; a – радиус основного круга эвольвенты.

$$\text{Длина отрезка } c - d \text{ равна: } L_{c-d} = (X_d - X_c)^2 + (Y_d - Y_c)^2 \quad (3.25)$$

$$\text{Длина дуги в сечении } a - b \text{ равна: } L_{a-b} = b_{ПК} - (L_{b-c} + L_{c-d}) \quad (3.26)$$

Радиус дуги в сечении а – b равен:

$$R = \frac{L_{a-b} \times L_{a-e} \times L_{e-b}}{4S} \quad (3.27)$$

Длину хорды определили по координатам двух точек:

$$L_{a-b} = (X_b - X_a)^2 + (Y_b - Y_a)^2 \quad (3.28)$$

Длину хорд L_{a-b} определили по формуле Гюйгенса:

$$p \approx (L_{a-e} + L_{e-b}) + \frac{1}{3}(L_{a-e} + L_{e-b} - L) \quad (3.29)$$

Радиус при нагрузке для первой схемы определяется в зависимости радиуса окружности эвольвенты и координаты точек профиля пуансона (верхнего деформирующего инструмента). Радиус при нагрузке для второй схемы определяют по формуле:

$$R_{НАГ.} = \frac{X_{a-c}^2 - 4(h_{инс.} + s_z)^2}{8(h_{инс.} + s_z)}, \quad (3.30)$$

где X_{a-c} – величина хорды от сечения а-а до сечения с-с, $h_{инс.}$ – величина хода инструмента, соответствующая заданному усилию; $s_z = 0,45 \div 0,5$ – зазор между трубной заготовкой и пуансоном в зоне 2.

Радиус после разгрузки определяют по формуле:

$$R_{РАЗ.} = \frac{R_{НАГ.} EiLS^3}{EiLS^3 + \frac{9}{64} EiS^3 + \frac{9\sigma_{iT}}{\sqrt{3}} R_{НАГ.} S(1 - \Pi i / Ei) + \frac{7}{6} \Pi i} \quad (3.31)$$

где Ei – модуль упругости исходного листового проката в i -ом сечении по длине трубной заготовки; Πi – модуль упрочнения исходного листового проката в i -ом сечении по длине трубной заготовки; σ_{iT} – предел текучести исходного листового проката в i -ом сечении по длине.

3.3.2 Методика расчета параметров заготовки при шаговой формовке

Определение геометрических параметров трудной заготовки на прессе пошаговой формовки состоит из трех частей: определение количество шагов и расстояние между ними; определение геометрических параметров каждого конкретного шага; вычисление необходимых координат для сборки конечного профиля заготовки.

Количество шагов определяется с учетом следующих параметров: сортамент продукции, геометрия деформирующего инструмента, максимального усилия и производительности деформационного оборудования.

Расчет геометрических параметров каждого шага выполнили по следующей последовательности:

- назначили систему координат;
- определили контактные и неконтактные области деформирующего инструмента и трубной заготовки;
- определили геометрические и энергосиловые параметры трубной заготовки

Назначаем систему координат

Начало системы координат по оси X определяется в зависимости от расстояния между бойками ($L_{\delta}/2$), а по оси Y является верхняя точка бойков (см. рис. 3.34).

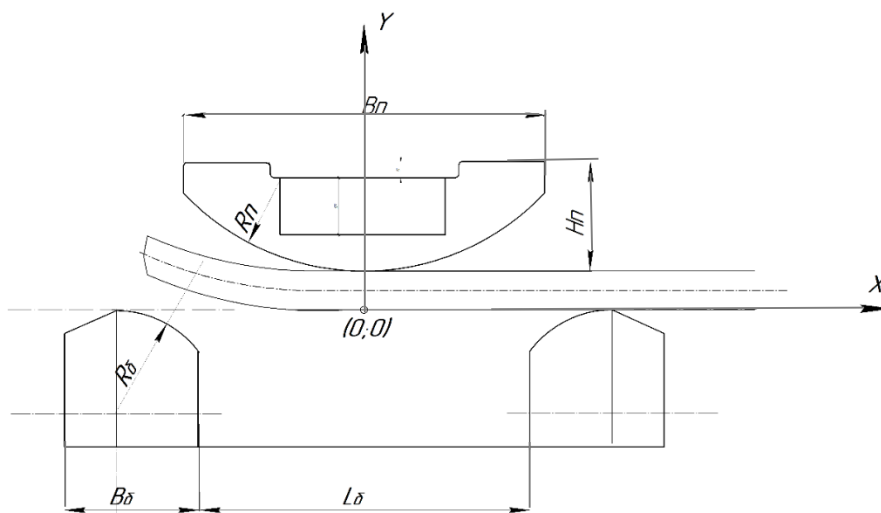


Рис. 3.34 – Система координат и параметры инструмента ПШФ

Определяем контактные и неконтактные области деформирующего инструмента и трубной заготовки

В работах [40-45, 53, 55] при проведении аналитических расчетов очаг деформации подразделяют на контактные и неконтактные участки, причем радиусы контактных участков равны радиусу деформирующего инструмента.

При экспериментальном исследовании и математическом моделировании установлено, что в зависимости от номера шага трубная заготовка с левой и правой стороны имеет следующие участки и распределение радиусов в очаге деформации

(рис. 3.35): на первом шаге контактный R_k , неконтактный R_n и деформированные участки в прикромочной зоне после подгибки кромок $R_{пк}$; на последующих участках – контактный R_k , неконтактные R_n (с левой и правой стороны) и деформированный на предыдущем шаге $R_{раз.к}$; на последнем шаге (вариант 1) контактный R_k , два неконтактных R_n и два деформированных на предпоследних шагах с левой и правой сторон $R_{раз.к}$. При этом при превышении величины хода D/S -пуансона или смещение заготовки (в левую либо правую сторону) радиус трубной заготовки в контактной зоне уменьшается (см. рис. 3.35 последний шаг – вариант 2), т.е. в середине очага деформации оказывается контактный участок с предпоследнего шага $R_{(i-1)к}$, который уменьшается на величину $h_{от}$, а контактными участками $R_{iк(лев.,прав.)}$ являются неконтактные с предыдущих шагов $R_{iн(лев.,прав.)}$.

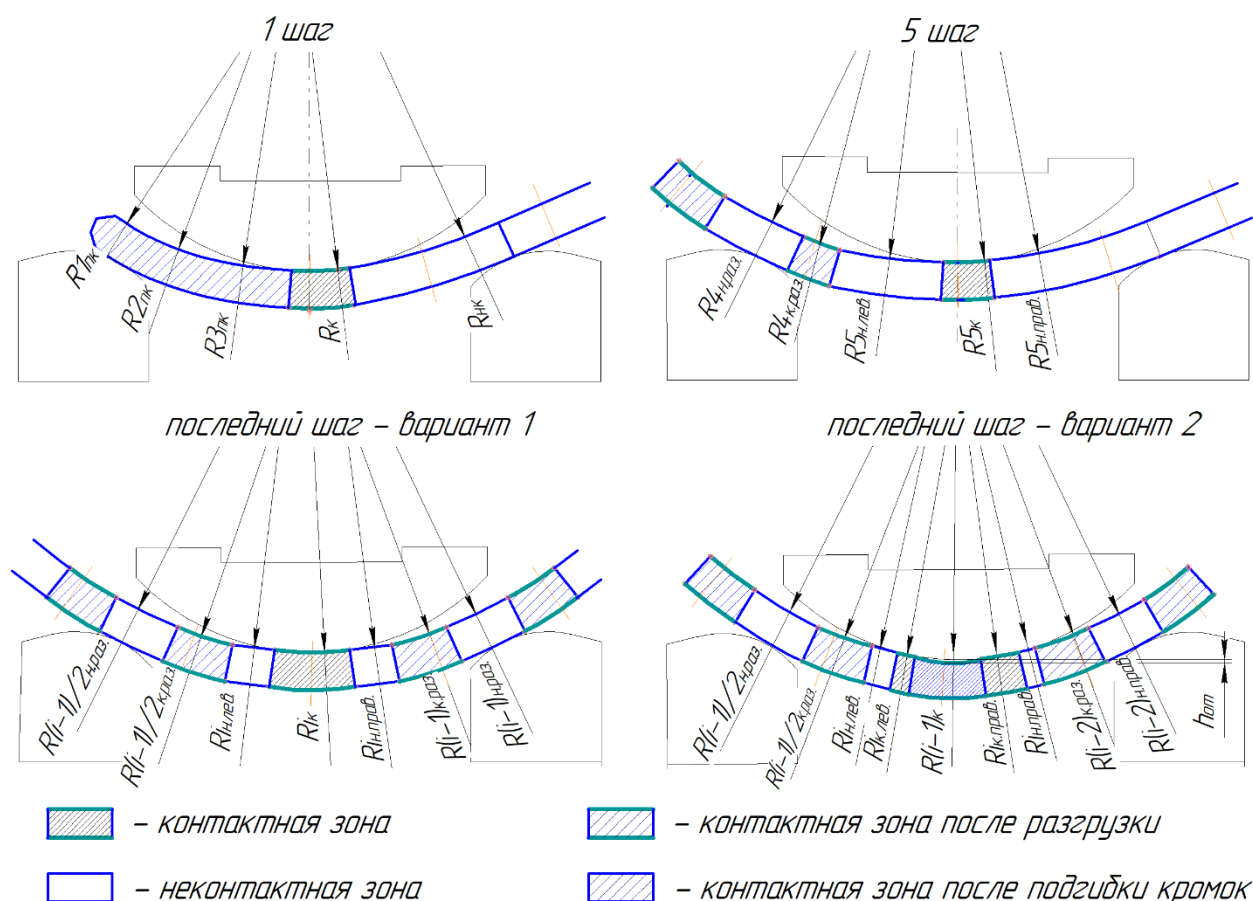


Рис. 3.35 – Контактные и неконтактные области в очаге деформации при гибке

При превышении величины хода равной $H=(D/2S)*(R_{п}/L_6)$ трубная заготовка отстает от пуансона, в результате радиус контактной зоны уменьшается. Величина отставания $h_{от}$ зависит от величины хода пуансона и номера шага (расположения деформируемого участка). Например, при количестве шагов равное 17, при одинаковых значениях величины хода, радиус в контактной зоне на 6 шаге больше

в 1,03, чем на 7-ом. Чем больше величина хода, тем меньше радиус в контактной зоне. Таким образом, центральный участок не полностью контактирует с пуансоном, а радиус на данном участке меньше (на большинстве шагах), чем радиус пуансона.

В зоне контакта между бойками и заготовкой происходит перегиб трубной заготовки в обратную сторону, в результате радиус при нагрузке в ранее деформированной зоне увеличивается (выпрямляется), а недеформированной имеет небольшой изгиб в обратную сторону. Для устранения данного эффекта необходимо режимы формовки подбирать таким образом, чтобы ранее недеформируемый участок перегиба контактировал с пуансоном на следующем шаге.

Расчет геометрических параметров трубной заготовки при шаговой формовке каждого шага проводят по следующей последовательности:

- определяют средний радиус и длину заготовки в очаге деформации;
- определяют радиус заготовки в контактных и неконтактных зонах;
- длину в контактных и неконтактных зонах;
- углы в контактных и неконтактных зонах;
- координаты точек

Определение радиуса трубной заготовки в контактной зоне

Средний радиус в контактной зоне определяется по трем точкам: координаты первой и третьей являются крайние точки от оси контактирующие с бойком, а второй является серединой по оси X.

Если ввести допущение, при котором при деформации трубной заготовки центр оси не смещается, а хорды b_1 и b_2 равны, то треугольник вписанный в дугу можно считать равносторонним.

В результате исследований установлено, что длина хорды (дуго) ранее деформируемой стороны в зависимости от величины хода и номера шага 10 – 25 мм меньше, чем со стороны имеющей плоский участок.

Радиус заготовки правой части при изгибе первой стороны плоской части на i -ом при соотношении толщины стенки к величине хода $S/H > 0,8$ равна $R_{np1i} = R_n$. При величине $S/H \leq 0,8$ трубная заготовка в очаге деформации отстает от пуансона, вследствие чего меняется радиус заготовки:

$$R_{np1i} = R_n + 0,5(H_i + R_6 - \sqrt{R_6^2(1 + \sin^2(\alpha))}) \quad (3.32)$$

Угол в деформируемой зоне в области контакта с пуансоном в плоской части определяется по следующим формулам:

$$\alpha_{\text{пл}i} = \arccos \frac{-\left(\frac{L}{2} + L_6\right) + \sqrt{\left(\frac{L}{2} + L_6\right)^2 - 2R_6H}}{R_6} \quad (3.33)$$

Координаты точки в области контакта с крайней точкой пуансона

$$X_{\text{п}} = \sin(\alpha_{\text{п}i})R_{\text{п}1i}; \quad Y_{\text{п}} = R_{\text{п}1i}(1 - \cos(\alpha_{\text{п}i})) \quad (3.34)$$

Координаты точки в области контакта с крайней точки бойка с плоской частью равны:

$$X_6 = \frac{L}{2} + L_6 - \sin(\alpha_{6i}) R_6; \quad Y_6 = -(R_6 - \sqrt{R_6^2(1 - \sin^2(\alpha_{6i}))}) \quad (3.35-3.36)$$

Параметры заготовки с изогнутой части. Координаты крайней точки контакта с бойком и пуансоном с изогнутой частью на i -ом шаге:

$$X_{6i} = L/2 + L_6 - \sin(\alpha_{6i}) R_{6i}; \quad Y_{6i} = R_{6i}(1 - \cos(\alpha_{6i})) \quad (3.37-3.38)$$

$$X_{\text{п}} = (1,01 \div 1,08)R_n \sin(\alpha_{\text{п}i}); \quad (3.39)$$

$$Y_{\text{п}} = (1,01 \div 1,08)R_n(1 - \cos(\alpha_{\text{п}i})) \quad (3.40)$$

Угол в области контакта с пуансоном и бойком с изогнутой частью определяется по следующим формулам:

При соотношении $R_n/S \leq 8$

$$\alpha_{\text{из}i} = \arccos \frac{\frac{L}{2} + L_6}{\sqrt{\left(\frac{L}{2} + L_6\right)^2 + \left(\frac{H-S}{2}\right)^2}} \quad (3.41)$$

При соотношении $R_n/S > 8(15)$ (в прикромочной области $R_n/S \leq 8$)

$$\alpha_{\text{из}i} = (0.35 - 0.45)\alpha_{\text{п}i} \quad (3.42)$$

Угол контакта заготовки с бойком равен:

$$\alpha_{6i} = \frac{\pi}{2} - \arccos \frac{R_6}{\sqrt{\left(\frac{L}{2} + L_6\right)^2 + \left(\frac{H-S}{2}\right)^2}} \quad (3.43)$$

Определим расположение координаты точек в изогнутой части в области раннее контактирующих с пуансоном.

Прежде всего необходимо определить расстояние между деформируемыми участками. Длину шага подачи определяют в зависимости от количества шагов и ширины исходной заготовки по формуле:

$$L_{\text{Шага}} = \frac{B_{\text{л}}}{n} - 2B_{\text{к}} \quad (3.44)$$

где $B_{\text{л}}$ – ширина листа; n – количество шагов; $B_{\text{к}}$ – ширина подогнутой кромки. Величину $B_{\text{к}}$ не учитывают, если есть необходимость догибки кромки по внутренней поверхности. В дальнейших расчетах $L_{\text{Шага}} = L_i$, где $L_{\text{Ср.в}i}$ – длина дуги от i -го до $(i-1)$ шага в нейтральной зоне.

Для определения координат ранее деформируемых зон в очаге деформации, экспериментально установлено, что средний радиус изогнутой части по внутренней $R_{\text{Ср.в}}$ равен $(1,4 - 1,6)R_{\text{н}}$, тогда угол в нейтральном слое равен

$$\alpha_{\rho(i-1)} = \frac{\sqrt{R_{\text{Ср.в}}(R_{\text{Ср.в}} + S)}}{L_{\text{Ср.в}(i-1)}} \quad (3.45)$$

$$X_{\Pi(i-1)} = \sin(\alpha_{\rho(i-1)})(R_{\text{Ср.в}} + S); \quad Y_{\Pi(i-1)} = (R_{\text{Ср.в}} + S)(1 - \cos(\alpha_{\rho(i-1)})) \quad (3.46-3.47)$$

Максимально возможная длина контакта без учета отставания заготовки от пуансона равна:

$$L_{\text{ки}} = R_{\text{н}} \arccos\left(\frac{R_{\text{н}} - H + S}{R_{\text{н}}}\right) \quad (3.48)$$

3.3.3 Методика расчета параметров заготовки при доформовке

Определение геометрических параметров трудной заготовки на прессе доформовки состоит из трех частей: определение угла поворота и величина хода инструмента на каждом шаге; определение геометрических параметров каждого конкретного шага. Величина хода определяется с учетом следующих параметров: сортамент продукции, геометрия деформирующего инструмента, максимального усилия и необходимое значение величины хода.

Расчет геометрических параметров каждого шага выполнили по следующей последовательности: определяем деформационный участок; назначили систему координат; определили геометрические и энергосиловые параметры трубной заготовки.

Деформируемый участок зависит от угла поворота трубной заготовки относительно оси прессы. По существующей технологии деформируемым участком является зона в позиции от 3-х до 4-х часов. При доформовке расстояние между кромками претерпевает изменению за счет изменения радиуса, указанной зоны.

Начало системы координат по оси X и Y определяется в зависимости от радиуса деформированного участка является крайняя точка дуги по горизонтали после поворота на заданный угол.

Длина деформационного участка по средней линии определяется по формуле: $L_{cp} = R_{i\text{шф}} \alpha_i$; (3.49)

Разность высоты дуги до деформации и после перемещения деформирующего инструмента, определяется по формуле:

$$\Delta h = 0,9 \times 10^{-3} H^2 + 25 \times 10^{-3} H \quad (3.50)$$

Изменение величины хорды определяется по формуле:

$$\Delta c = -0,3 \times 10^{-3} H^2 + 10^{-2} H \quad (3.51)$$

Радиус по средней линии при нагрузке и после разгрузки определяется по формулам:

$$R_{\text{наг.ср.}} = \frac{L_{cp}}{2 \arctg \frac{(h_0 + \Delta h)}{(c_0 + \Delta c)}} \quad (3.52)$$

$$R_{\text{раз.}} = \frac{R_{\text{наг.}} E i L S^3}{E i L S^3 + \frac{9}{64} E i S^3 + \frac{9(\sigma_{iT} + \sigma(\text{осм})_i)}{\sqrt{3}} R_{\text{наг.}} S(1 - \Pi i / E i) + \frac{7}{6} \Pi i} \quad (3.53)$$

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

$$\sigma_{\text{ост}} = \frac{\Pi}{\beta} \left(\left(\ln \frac{R_i + s(1 - \eta)}{(R_i + 0,5s - \eta)} - \frac{1}{2} \ln \frac{(R_i + 0,5s) R_{1i}}{(R_i + 0,5s - \eta)^2} \ln \frac{R_H}{R_i} \right) \right) \quad (3.54)$$

Величина высоты и хорды после разгрузки определяется по формулам:

$$h_{\text{раз.}} = R_{\text{раз.ср.}} \left(1 - \cos \frac{L_{cp}}{R_{\text{раз.ср.}}} \right) \quad c_{\text{раз.}} = 2 R_{\text{раз.ср.}} \left(1 - \sin \frac{L_{cp}}{R_{\text{раз.ср.}}} \right) \quad (3.55-3.56)$$

Координату точки по средней линии фаски определяется по формуле:

$$Y_{\text{раз.}} = 2Y_H - Y_0 + \frac{L_{cp} h^2}{500 - h} - 5,3ch + 3,8R_{\text{раз}} \quad (3.57)$$

4. Влияния технико-технологических факторов на отклонение по геометрии заготовки и условия возникновения дефектов

4.1 Условия возникновения дефектов

Рассмотрим условие возникновения дефектов и отклонения по геометрическим параметрам в процессе производства на стадии лист-труба, а также взаимовлияние отклонения геометрических параметров друг на друга.

На основе данных по дефектам, полученные в результате производства прямошовных сварных труб большого диаметра, определены соотношения дефектов по геометрии готовых труб, которые представлены в графическом виде на рисунке 4.1.

Наибольшее отклонение трубы имеют по овальности. На овальность трубы в основном влияет режимы шаговой формовки основного профиля, а именно неверное соотношения величины хода в прикромочных областях и боковых зонах относительно основания заготовки.



Рис. 4.1 – Соотношение дефектов труб большого диаметра линии ТЭСА 1420

На овальность труб влияет отклонение в прикромочной области и продольная кривизна, возникающие в процессе подгибки кромок, доформовки и сварки продольных швов. Также овальность взаимосвязана с асимметрией трубы, т.к. асимметрия возникает в результате недоформовки второй стороны из-за отсутствия учета неравномерного распределения механических свойств и

особенности контактного взаимодействия. В результате не достигается необходимая овальность после формовки основной части (см. рис. 4.2).

Превышение величины хода при шаговой формовке и доформовке может привести к зависанию трубной заготовки на ноже прессы шаговой формовки, нахлесту кромок трубной заготовки и отклонения по овальности в вертикальном направлении.

Область, имеющая изменения на каждом деформационном процессе, является прикромочная зона. Дефекты в виде «крыша» и «яблоко» являются следствием недоформовки или переформовки прикромочной области, а отклонения или дефекты в виде смещения кромок и нахлеста возникают из-за асимметрии трубной заготовки после подгибки кромок, шаговой формовки и доформовки при производстве толстостенных труб.

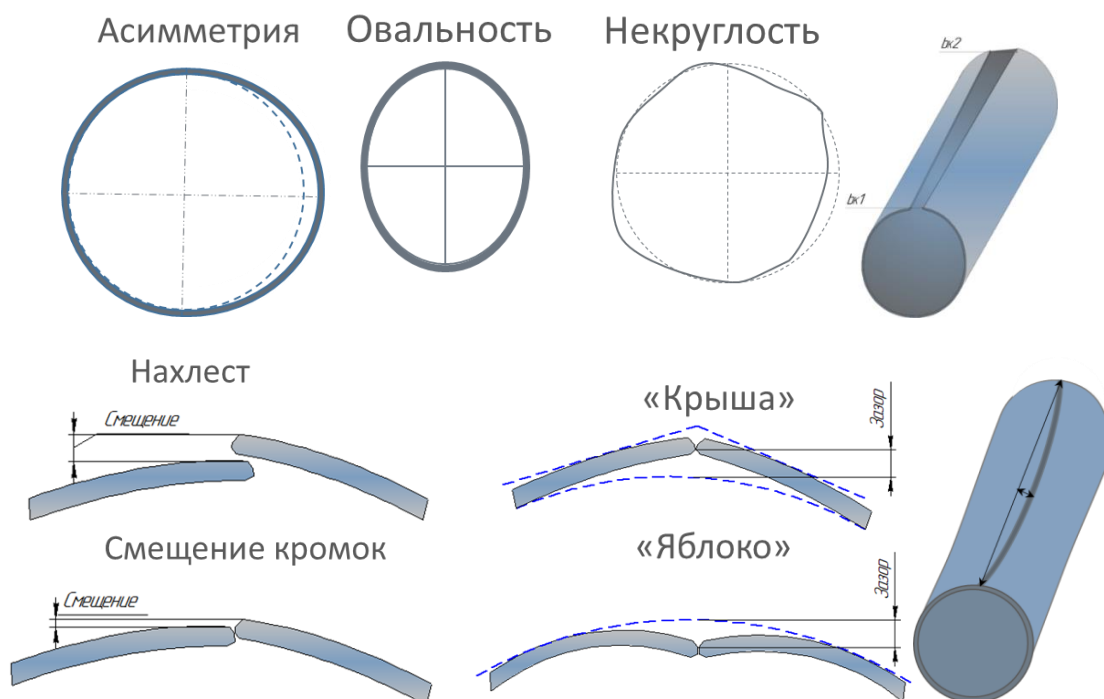


Рис. 4.2 – Основные виды дефектов по геометрии труб большого диаметра

При отклонении по пределу текучести от заданного значения, не достигает необходимое значение по перемещению инструмента при подгибке кромок, в результате прикромочная область недоформовывается, либо переформовывается, особенно в области фаски, что может привести к дефекту по сварке.

В отличие от предшествующих процессов, при доформовке возможно исправить отклонение по высоте крайних точек прикромочной области, т.е. произвести дополнительную операцию доформовки одной из сторон. Однако по результатам математического моделирования установлено, что при доформовке одной из сторон асимметрия трубной заготовки может сохраниться при $D1_{\text{вер}} = D2_{\text{вер}}$, если длина дуги первой половины будет превышать длину дуги второй, то $X1 > X2$. Причиной данного отклонения являются неверные настройки оборудования и неверно подобранные режимы формоизменения при подгибке кромок и шаговой формовке, а также неверно выбранное расстояние от кромки до точки формовки при доформовке.

Из-за неравномерного распределения механических свойств труба имеет отклонение по периметру, что приводит к отклонению по прямолинейности по всей длине в виде отклонения расстояния между кромками и кривизны трубы в продольном направлении.

На изменение трубы в процессе и после сварки наружных швов влияют не только настройка оборудования и механические свойства исходной заготовки, но и величина и область распределения температуры, форма околошовной трубы зоны перед началом сварки. После сварки твердость волокон, входящих в область термического влияния повышается, причем области имеющие наименьшую прочность имеют наибольшее изменение [6 - 10]. Данные факторы влияют на отклонение диаметров с передних и задних торцов труб.

Отклонение от округлости являются следствием отсутствия контактных областей при шаговой формовке и экспандирования, а также неравномерного распределения радиуса по периметру после деформации.

4.2 Степень влияния факторов на отклонение по геометрии заготовки по основным деформационным участкам

По результатам измерений системой фотограмметрии и твердомером было выявлено, что исходный листовой прокат, до подгибки кромок имеет отклонение от плоскостности по ширине равной 0,5 – 0,7%, а по твердости 8-12%, что привело к асимметрии заготовки после подгибки кромок, где радиусы одной стороны превышал радиус второй на 20%, а высота – 1,1%.

Для остановки процесса гибки кромок усилие деформирования должно достигнуть величины равное $P=r \times F$, где r – давление, развиваемое цилиндром, F – рабочая площадь плунжера. Остановка процесса подгибки кромок происходит одновременно с левой и правой стороны, а именно при достижения заданного значения нижнего деформирующего инструмента одной из сторон. Максимальное значение усилия деформирования прессы составляет 24 МН, а остановка происходит при достижении нижнего инструмента (Bottom Die) 18 МН, при этом верхний деформирующий инструмент (Top Die) испытывает нагрузку на 15% больше, чем нижний, так как контактная зона верхнего инструмента больше (см. рис. 4.3), т.е. при отсутствии отклонений по геометрическим параметрам и механическим свойствам исходной заготовки, высота трубной заготовки на 7 – 10% превышает требуемое значение

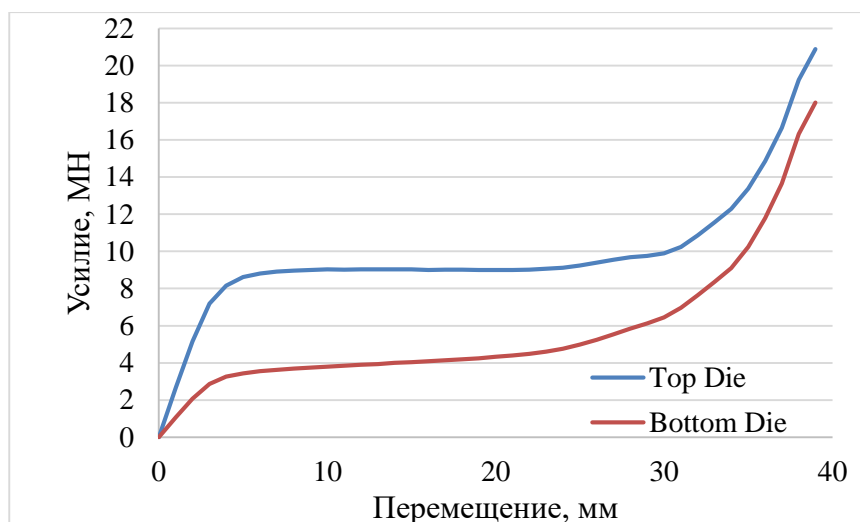


Рис. 4.3 – Усилие деформирования при подгибке кромок

С целью определения влияния неравномерного распределения механических свойств было проведено исследования в производственных условиях и методом математического моделирования и установлено, что после подгибки кромок максимальную высоту имела прикромочная область, с минимальным значением твердости, минимальную высоту имела кромка с торца, где значение твердости максимально, причем отклонение по твердости равное 10% приводит к отклонению по радиусу до 25% и высоте до 2 %. Отклонение по радиусу может привести к дефекту «крыша» и «яблоко», а по высоте – к смещению кромок и сварного шва.

Для оценки влияния отклонения по форме провели математическое моделирование подгибки кромок с учетом отклонения от плоскостности исходной заготовки и сравнили с результатом моделирования заготовки, имеющее идеальную прямолинейную форму по ширине (рис. 4.4). В результате было установлено, что трубная заготовка не доформовывается на 3-5% по высоте, так как не вся прикромочная область входит в очаг деформации, а асимметрия исходной заготовки приводит к отклонению по радиусу 10,5% и высоте 0,7%, что может привести смещению сварного шва.



Рис. 4.4 – Результаты расчета без и с учетом отклонения по форме исходной заготовки

Трубные заготовки после шаговой формовки исследуемых труб имели асимметрию в виде отклонения по радиусу по периметру трубы сторон 2 относительно стороны 1 (см. рис. 2.4, 2.19). На основе математического моделирования установлено, что при одинаковой величине хода с обеих сторон, либо недостаточной величине хода со второй стороны деформации в контактных участках одной стороны в зависимости от расположения на 15-35% превышает вторую, вследствие чего вторая сторона не доформовывается (см. рис. 3.17).

Наибольшее отклонение по радиусу трубной заготовки после шаговой формовки наблюдалась в прикромочной области из-за отклонения по радиусу подогнутой кромки и механических свойств, где в зависимости от сортамента трубы составляло 21-35%.

Для оценки влияния неравномерного распределения механических свойств исходной заготовки на форму трубы в продольном направлении были проведены испытания на образцах, отобранных с головной части, по середине и хвостовой части однократных и двукратных листовых прокатов. На основе данных результатов получен график зависимости разности переднего и заднего торцов расстояния между кромками и предела текучести. Следовательно, величина расстояния между кромками прямо пропорциональна пределу текучести, а отклонение по пределу

текучести при производстве труб диаметром 1420 мм на 15-17% приводит к отклонению до 45%.



Рис. 4.5 График зависимости разности расстояния между кроками и разности предела текучести переднего и заднего концов.

Основным параметром после шаговой формовки является овальность. Асимметрия заготовки уменьшает овальность в горизонтальном направлении на 5-7%, неравномерность распределения механических свойств увеличивает отклонение от заданного значения по овальности до 7-15%.

При отклонении величине хода на 2-3% в боковых и прикромочных зонах при гибке трубной заготовки на прессе шаговой формовки отклонение по диаметрам возрастает на 1,5 – 2,5%.

Отклонение величины поворота трубной заготовки на расстояние от кромки до точки формовки (приложения усилия) на 5-10% приводит к недоформовке до 17% или переформовке на 10-12% участков в позициях от 3 ч. до 5 ч. При превышении перемещения деформирующего инструмента на 8 -12% на первом этапе расстояние между кромками трубной заготовки будут меньше допустимого до 20 -25%, а смещение кромок заготовки увеличится на 4 – 9%.

Так как основной задачей доформовочного пресса является получение трубной заготовки, с расстоянием между кромками в определенном диапазоне, то при получении трубной заготовки с большой величиной расстояния между кромками, можно произвести дополнительную операцию догибки. При этом превышение величины хода на 5-8% при повторной доформовке либо доформовке второй стороны возникает дефект в виде нахлеста трубной заготовки, либо приводит

к малой величине расстояния между кромками, что усложняет сборку на сборочно-сварочном стане и может привести к дефекту сварки. Чаще всего из-за отклонения по величине расстояния между кромками при сборке и сварке образуются участки сварного соединения, где отсутствует сплавление между основным и наплавленным металлом.

Процесс сборки и сварки высокопрочных толстостенных труб на сборочно-сварочном стане в линии ТЭСА 1420, при величине расстояния и смещения кромок свыше 80-90 мм и 12-15 мм соответственно, усложняется либо становится невозможным, вследствие недостаточности усилия при гибке верхними и боковыми роликами, а при сборе заготовки с расстоянием между кромками более 70-75 мм растягивающие напряжения возрастают на 20-30 %.

Трубная заготовка с отклонением расстояния между кромками по длине превышающее допустимое значение на 25-35% приводит к неравномерности формы и размера сварного шва в продольном направлении, либо дефекту «непровар».

При сварке наибольшему изменению подвергаются области имеющие наименьшее значение по пределу текучести. В данном случае возрастает отклонение в виде «яблоко», вызванные угловыми деформациями, а из-за неравномерного нагрева металла при сварке и отклонения по механическим свойствам с левой и правой стороны более 7-10%, асимметрия прикромочной области возрастает на 2-3%. В процессе экспандирования удастся уменьшить величину асимметрии трубы, вызванные сварочными до 70% и отклонения в виде «крыша» тонкостенных труб в 1,2 – 1,5 раза.

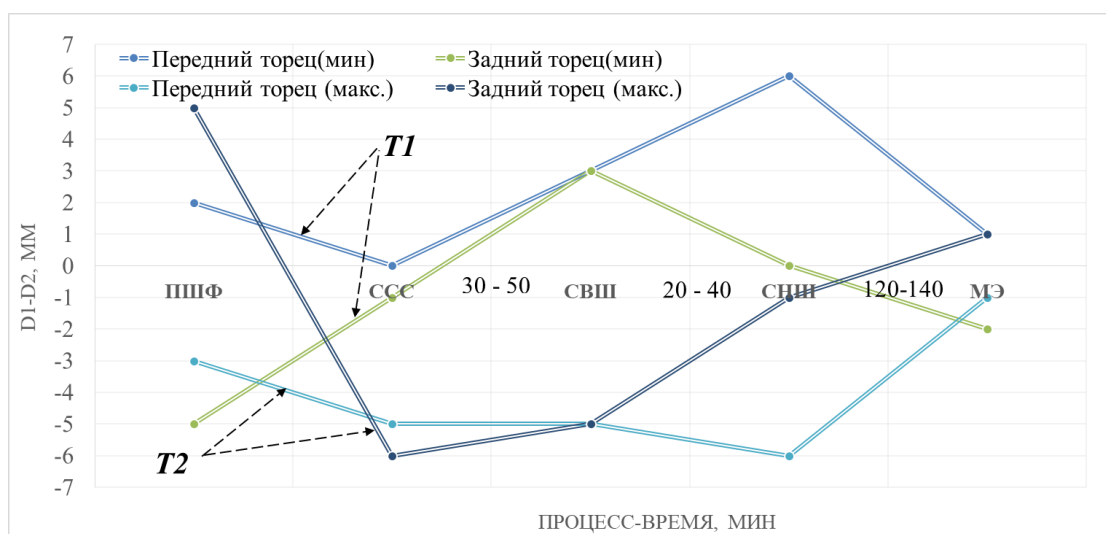


Рис. 4.6 - Разность диаметров D1 и D2 труб на стадии ПШФ-МЭ

Так как при шаговой формовке и экспандировании заготовка не полностью контактирует с деформирующим инструментом, труба после экспандирования имеет отклонение от округлости равное 1– 1,2% при $L_{н.к.} > 0,2L_k$.

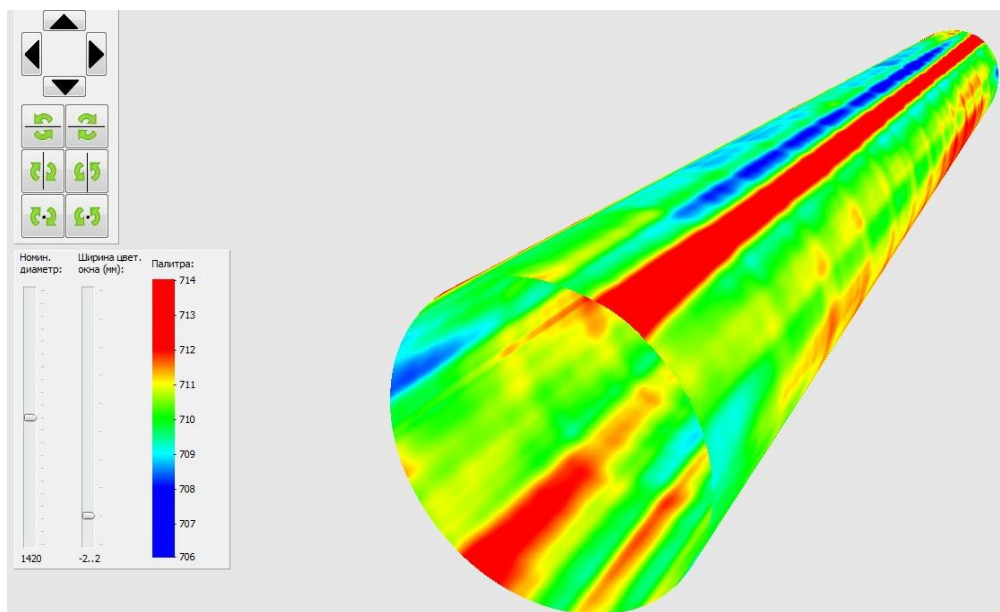


Рис. Отклонение от округлости и прямолинейности трубы 1420x25,8 мм

4.3 Причинно-следственная связь отклонения по геометрии трубы

Отклонения по геометрии трубной заготовки после деформационных процессов возникают по следующим причинам: отклонение по механическим свойствам и геометрическим параметрам исходной заготовки, неверные настройки оборудования; неверно подобранные режимы формоизменения.

На основе результатов математического моделирования и экспериментальных исследований проведем анализ влияния ранее указанных причин на отклонения по геометрии трубной заготовки. Одна из основных причин отклонений по геометрии является неверно подобранные режимы формовки трубной заготовки.

Для определения причин отклонения по геометрии трубной заготовки, использовали причинно-следственную диаграмму Исикавы (см. рис. 4.7) для графического отображения взаимосвязи между решаемой проблемой и причинами, влияющими на ее возникновение в виде «рыбьей кости».

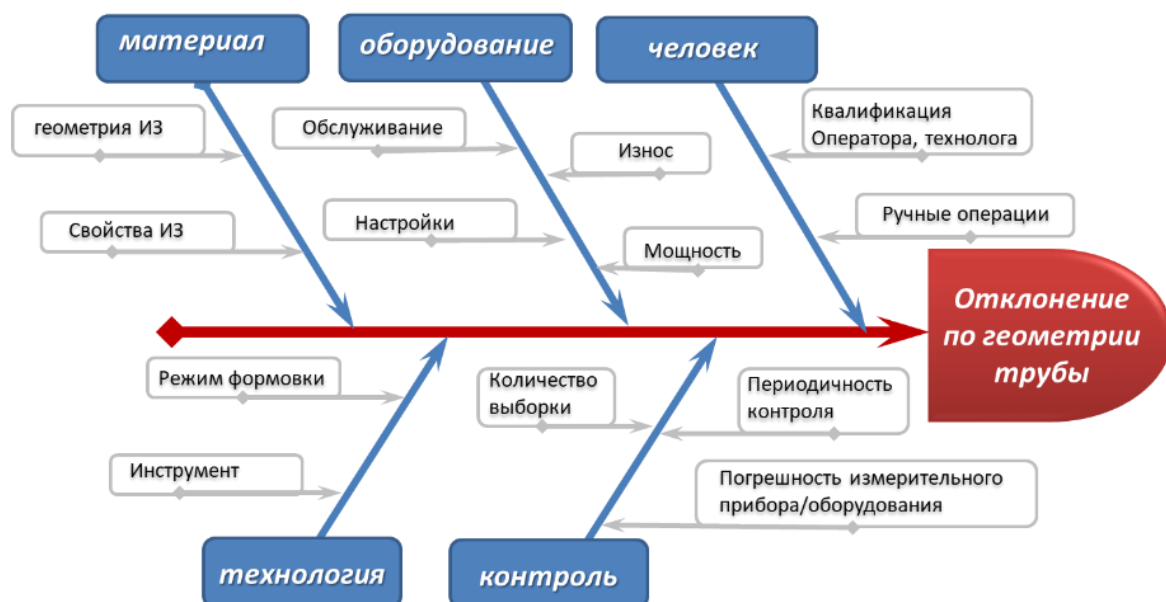


Рис. 4.7 - Диаграмма Исикавы в виде «рыбьей кости»

В качестве примера рассмотрим основные технологические параметры процесса подгибки кромок, влияющие на режим формоизменения трубной заготовки. Такими параметрами являются перемещение нижних деформирующих инструментов, расстояние между верхними деформирующими инструментами, смещение верхнего деформирующего инструмента относительно верхнего. Выбор значений указанных параметров зависят как от свойств деформируемого материала, так и от геометрии деформирующего инструмента.

На отклонение по геометрии параметрам также влияет погрешность величины хода, связанное с погрешностью работы деформационного оборудования, например, отклонения в работе гидропривода, которое не обеспечивает необходимое давление в гидроцилиндре. Данная проблема может быть причиной несвоевременного обслуживания либо низкой квалификацией обслуживающего персонала.

Одна из основных причин отклонений, связанное с деформирующим оборудованием является износ деформирующего инструмента. При производстве трубы по технологии JCOE фирмы SMS «MEER» контроль нового и износа эксплуатируемого технологического инструмента пресса подгибки кромок имеет наибольшую сложность, так как из-за сложности геометрии профиля требуется высокотехнологическое устройство для измерения. В главе 2 в качестве такого

устройства предложен 3d сканер, используемый АО «ВМЗ», что позволило значительно снизить степень влияния данного фактора.

Система фотограмметрии и 3d сканер не обеспечивают необходимую производительность, а ручной метод измерения имеет большие погрешности и колебания при измерении, т.е. возрастает влияния человеческого фактора. При отсутствии автоматизированного контроля фиксируются данные не по каждой заготовке и не по всем параметрам.

Для оценки количественного показателя каждой категории провели качественный и количественный анализ степени влияния на основные виды дефектов труб. На основе опытных данных заводов по производству прямошовных сварных труб большого диаметра определены соотношения дефектов (отклонений) по геометрии готовых труб и для каждого вида дефекта определены степени 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.

Основной причиной отклонений по геометрическим параметрам, имеющее наибольшее количество (см. рис. 4.1), является технология (30-35%) формовки, сварки и экспандирования. Некорректный выбор технологических режимов связана с отклонения по параметрам исходного материала и отсутствие контроля необходимых параметров заготовки (по всему периметру и длине) до и после каждого деформационного процесса.

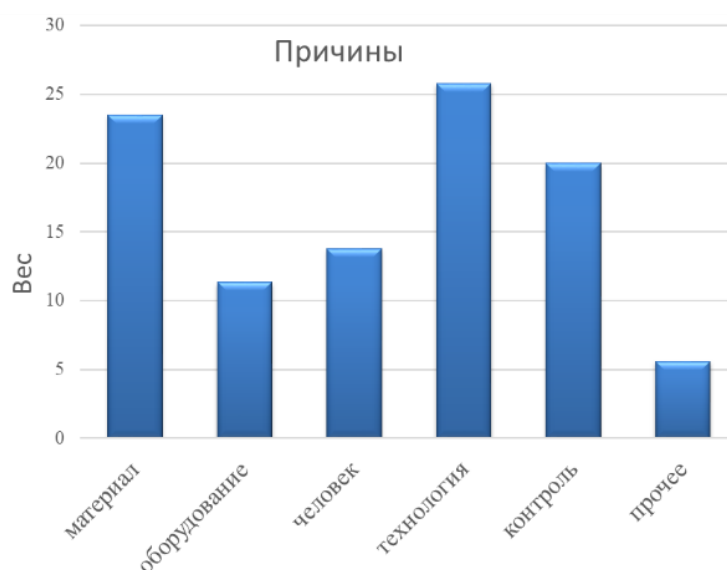


Рис. 4.8 - Вес категорий по исследуемым дефектам

4.4 Методы и предложения по устранению

Для получения трубы с минимальными отклонениями от заданных параметров необходимо определить требования к исходной заготовке или трубы в зависимости от этапа производства.

Экспандирование. Последним этапом деформационного процесса является экспандирование, как ранее было указано при экспандировании происходит увеличение диаметра на степень остаточной деформации основная цель, которой уменьшить овальность трубы и снизить величину остаточной деформации (глава 3).

На данный момент пределы отклонения диаметра, приведенные в стандартах [126-133] по телу трубы $\pm 0,005 D$ или ± 3 мм а по концам $\pm 1,6$ мм, причем допуск в меньшую и большую сторону одинаковы. Так как после экспандирования производят гидроиспытание труб, то отклонение от диаметра и периметра труб после экспандирования следует уменьшить допуск «+» и увеличить допуск «-». При коррекции допусков необходимо также учитывать, что во время эксплуатации труба находится под постоянным внутренним давлением, в результате чего при достижении величины растягивающих окружных напряжений значения предела текучести увеличивается диаметр и периметр трубы.

Овальность труб не должна превышать 1,0% по концам труб с толщиной стенки менее 20 мм и 0,8 % по концам труб с толщиной стенки 20 мм и более. Разница наружных диаметров на концах одной трубы не должна превышать 2,4 мм. Процесс экспандирования позволяет значительно уменьшить разность диаметров и снизить овальность труб, но при больших отклонения по овальности труб, возрастает нагрузка на деформирующий инструмент зонах с наименьшим диаметром, так как в начале процесса деформации возрастает нагрузка на деформирующий инструмент в области контакта. При максимальной степени раздачи равной 1,5 % не представляется возможным устранение овальности более 4 %. Данное значение может меняться в зависимости от соотношения диаметра к толщине стенки и прочностных свойств не экспандируемой трубы. При экспандировании овальность труб (не превышавшее 1,5% до экспандирования) близка к нулю и не превышает 0,1-0,5 мм, после разгрузки величина овальности возрастает 3 – 5 мм. По результатам исследований, представленные в главах 2 и 3, было установлено, что максимальная допустимая овальность труб до экспандирования с соотношением $D/S \leq 30$ не должна

превышать 1,5–2%, а с соотношением $D/S > 40$ не более 3%. Овальность в 4% допустимо для труб с соотношением $D/S > 55$.

Допустимая кривизна труб до экспандирования с соотношением $D/S \leq 25-30$ не должна превышать 0,22 - 0,25% длины трубы, а с соотношением $D/S > 40 - 55$ не более 0,27-0,32%.

При определении требований к отклонению от теоретической окружности необходимо учитывать положение трубы относительно углубления для сварного шва при отклонении в виде «яблоко» величина h (см рис. 2.15) не должна превышать половину величины углубления при горизонтальном овале. В отклонении в виде крыша угол стыка сварного шва не должна быть более 120 град.

Сборка и варка. При сборке трубной заготовки горизонтальный овал уменьшается, а при сварке внутреннего и наружного швов увеличивается вертикальный диаметр трубы (см. глава 2.1), поэтому до сборки трубная заготовка должна иметь горизонтальный овал, при этом чем больше D/S и меньше прочность заготовки, тем больше горизонтальный овал. Величина овала также зависит от диаметра трубы, так как со значением диаметра возрастает и величина расстояния между кромками. В таблице 4.1 представлена допускаемая величина овальности и расстояния между кромками в зависимости от соотношения D/S и прочностных свойств заготовки. При определении требований к расстоянию между кромками и смещению кромок следует учитывать силовые возможности оборудования.

На рис. 4.8 представлена зависимость суммарного изменения овальности труб класса прочности K60 под влиянием сварочных деформаций от отношения диаметра к толщине стенки. Зависимость необходимо установить прежде всего с того торца, с которого осуществляют настройку положения и перемещения роликов сборочно-сварочного стана. Зависимость имеет линейное уравнение $\Delta O_3 = 0,26D/S + 11,5$.

Важным параметром при сварке технологического шва является положение кромки относительно линии сварки, т.е. кромки должны быть расположены в одной плоскости.

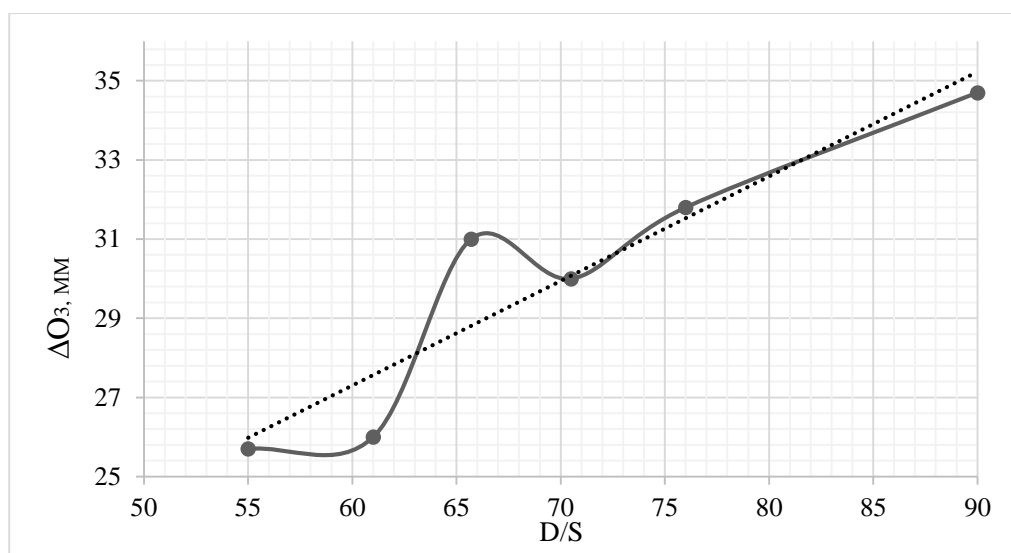


Рис. 4.8 - Зависимость изменения овальности труб класса прочности К60 под действием сварочных деформаций от D/S

После сборки на сборочно-сварочном стане труба должна иметь круглую форму, а допуск на овальность после сборки толстостенных высокопрочных труб соответствует требованиям, предъявляемым к трубам до экспандирования. Трубы, имеющие отношение $D/S > 40$ после сборки, могут иметь горизонтальный овал не превышающей 3%.

Доформовка. Основная задача процесса доформовки уменьшение расстояния между кромками при производстве толстостенных труб. Расстояние между кромками должна находиться в пределах 50 – 80 мм в зависимости от исходной овальности заготовки, которая не должна превышать 1,5 % до доформовки и 2 % после доформовки, причем наибольшим должен быть горизонтальный диаметр при раскрытии менее 60 мм.

При сборке толстостенных труб наибольшие остаточные напряжения возникают у основания трубы, что в дальнейшем может значительно повлиять на неравномерное распределение остаточных напряжений по периметру трубы до и после экспандирования. Для снижения величины остаточных напряжений при доформовке заготовки предложено уменьшить расстояние между кромками толстостенных труб до 20 %.

Формовка основного профиля.

Форма трубной заготовки зависит от режимов формоизменения и исходных характеристик листового проката. В стандартах [134] предъявляются следующие требования к геометрии листового проката: толщина ± 1 ; ширина 10 – 25 мм в

зависимости от толщины стенки и номинальной ширины листового проката; серповидность не должна превышать 10 мм на длине 3м.

Для определения отклонения по толщине необходимо определить значение отклонения по радиусу каждого шага, так как отклонение по толщине влияют на величину разгрузки. Отклонение по среднему радиусу каждого участка не должна превышать 0,5%, а по толщине 4%; отклонение по пределу текучести не более 10 %.

Профиль трубной заготовки, соответствующая требованиям по овальности и расстояния между кромками, формируется за счет получения необходимого среднего радиуса в очаге деформации на каждом шаге формовки. Распределения радиуса зависит от диаметра готовой трубы и положения по периметру трубы. Условно периметр трубной заготовки можно разделить на четыре зоны: прикромочная зона (от позиции 12 часов до 2 часов); боковые зоны (от позиции 2 часов до 4 часов), основание трубной заготовки (от позиции 4 часов до 6 часов) (1,008-1,012) Dт.

Из полученных данных на участке формовки установлено, что коэффициент корреляции расстояния между кромками трубной заготовки и предела текучести листового проката с заднего торца в 5 раз выше, чем с переднего. Для снижения влияния неравномерного распределения твердости по длине следует проводить измерение в процессе формовки на каждом шаге с обоих торцов.

Подгибка кромок.

Для получения ровного шва при сварке необходимо предъявлять требование и к отклонению по геометрии кромок относительно друг друга, а именно отклонение по высоте кромок с одной и другой стороны не должны превышать 2%.

Твердость прикромочной области исходной заготовки не должна быть меньше, чем у основного металла, так как прикромочная область с меньшей твердостью подвергается большему изменению при сварке, увеличивающее отклонение от теоретической окружности в виде «яблоко», которое сложнее поддается исправлению в процессе экспандирования, чем отклонение в виде «крыша».

В результате исследования установлено, что наибольшему изменению от сварочных деформаций подвергаются трубы с наибольшим соотношением толщины стенки к диаметру трубы и наименьшем значении прочности. После

экспандирования наименьшее отклонение от теоретической окружности в околошовной зоне имели трубы с формой «крыша», а именно трубы, имеющие прочность в околошовной зоне выше, чем в основном металле трубы. Следовательно, для снижения отклонения от теоретической окружности прочность и толщина краев исходного листа не должны быть меньше заднего значения.

При использовании четырехкратного листового проката значительно возрастает асимметрия после подгибки кромок из-за большего отклонения по механическим свойствам прикромочных участков по ширине исходного листа. Для учета неравномерного распределения механических свойств по длине и упрощения настройки оборудования наиболее благоприятными являются двукратные листовые прокаты с отклонением от плоскостности не более 0,5%, так как при однократном нет возможности производить коррекцию положения верхнего инструмента по длине, что может осложнить процесс сборки на сборочно-сварочном стане и привести к дефектам сварочного шва в средней области трубы.

5 Совершенствование технологии JCOE при производстве сварных труб большого диаметра

5.1 Способ шаговой подгибки кромок

Недостатком известных способов является то, что при подгибке кромок не учитываются неравномерное распределение механических свойств и отклонение формы исходной заготовки.

В предлагаемом изобретении шаговую подгибку кромок осуществляется с учетом отклонения формы исходной заготовки и неравномерности механических свойств листа в поперечном и продольном направлениях, при этом до подгибки кромок листа производят комплексное измерения геометрии бесконтактным методом и механических свойств неразрушающим методом по всему периметру исходной заготовки.

Распределение механических свойств по периметру и толщине исходной листовой заготовки зависит от сортамента и способа производства листового проката. Разброс механических свойств исходной заготовки по длине и ширине приводит к отклонению по геометрическим параметрам трубной заготовки в прикромочной области, т.к. прочностные свойства влияют на величину разгрузки заготовки на каждом шаге.

На рис. 5.1 представлено конечное положение нижнего инструмента (матрицы) i -ом шаге, где b_f – ширина фаски, z – зазор между пуансоном и прикромочной области заготовки, $\alpha_{\text{наг}}$ – угол подогнутой кромки при нагрузке. Деформирующими инструментами прессы подгибки кромок (ППК) являются пуансон 2 и матрица 3, заготовка фиксируется с помощью верхней балки 4 и нижней балки 5.

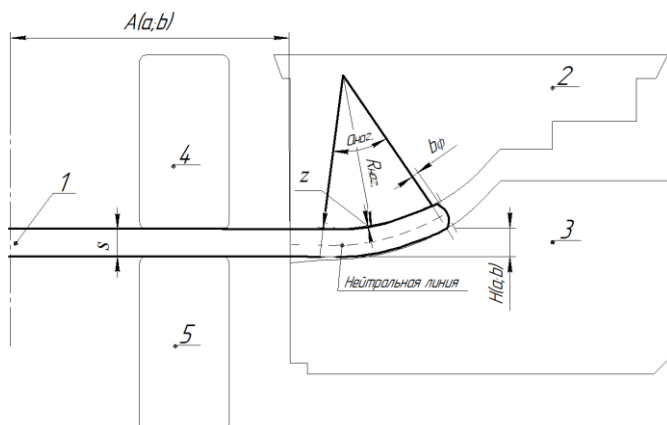


Рис. 5.1 –Параметры деформирующего инструмента при нагрузке

Для устранения отклонения по геометрии трубной заготовки в продольном направлении, подгибку листовой заготовки, следует производить с учетом отклонения механических свойств и толщины исходной заготовки от номинального значения.

После подгибки кромок радиус и высота подогнутой кромки после разгрузки на каждом шаге с левой и правой стороны должны быть равны, т.е. $R_{\text{раз1}} = R_{\text{раз2}} = \dots R_{\text{рази}} = R_{\text{раз.н}}$. Радиус после разгрузки на i -ом шаге равен $R_{\text{ипраз}} = R_{\text{инаг}} \beta_i = R_{\text{ннаг}} \beta_n$, где $R_{\text{ипраз}}$ - усредненный радиус в очаге деформации при нагрузке с левой и правой сторон на i -ом шаге, мм; $R_{\text{ннаг}}$ - номинальное значение радиуса в очаге деформации при нагрузке, мм; β_n - номинальное значение коэффициента разгрузки; β_i - коэффициент разгрузки на i -ом шаге с левой и правой сторон.

$$\beta_i(\sigma_T) = k_1 \times 10^{-9}(\sigma_{Ti} - \sigma_{Tn})^3 + k_2 \times 10^{-6}(\sigma_{Ti} - \sigma_{Tn})^2 + k_3 \times 10^{-3}(\sigma_{Ti} - \sigma_{Tn}) + k_4 \quad (5.1)$$

где σ_{Tn} - номинальное значение предела текучести исходной заготовки, МПа; σ_{Ti} - предел текучести исходной заготовки на i -ом шаге, МПа; k_1, k_2, k_3, k_4 - коэффициенты, учитывающие отношение толщины стенки исходной заготовки к номинальному значению радиуса кривизны прикромочной области деформируемой заготовки $R_{\text{нраз}}$.

Значение коэффициентов k_1, k_2, k_3, k_4 выбирается в зависимости от соотношения толщины стенки S к радиусу подогнутой кромки R из таблицы 5.1.

Коэффициент, учитывающий отклонение механических свойств от номинального значения определяют из уравнения:

$$\Delta_\sigma = 2 \sin \frac{\alpha_p}{2} (\beta_i(\sigma_T) + \beta_n) \sin \frac{\alpha_p}{2} (\beta_i(\sigma_T) - \beta_n) - \frac{\beta_i(\sigma_T) - \beta_n}{\beta_i(\sigma_T) \times \beta_n} \quad (5.2)$$

где α_p - угол подогнутой кромки после разгрузки, град; L - длина очага деформации, мм.

Определим зависимость отклонение толщины исходной заготовки от номинального значения и величины разгрузки

$$\beta_i(s) = \delta_1 \times 10^{-6}(s_i - s_n)^4 + \delta_2 \times 10^{-5}(s_i - s_n)^3 + \delta_3 \times 10^{-4}(s_i - s_n)^2 + \delta_4 \times 10^{-3}(s_i - s_n) + \delta_5 \quad (5.2)$$

$\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$ и δ_5 - коэффициенты, учитывающие соотношение предела текучести и модуля упругости исходной заготовки.

Значение коэффициентов $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$ и δ_5 выбирается в зависимости от относительного удлинения ε из таблицы 5.1

Таблица 5.1 – Коэффициенты соотношения k и δ

№	S/R	k1	k2	k3	k4	ε	δ_1	δ_2	δ_3	δ_4	δ_5
1	0,023	5	2	1,5	1,5	0,015	0,1	0,3	0,3	1,1	1,054
2	0,027	3	0,9	1,1	1,39	0,016	0,1	0,4	0,3	1,2	1,056
3	0,031	3	0,6	0,8	1,32	0,017	0,2	0,4	0,4	1,3	1,058
4	0,035	2	0,4	0,7	1,27	0,02	0,2	0,5	0,4	1,5	1,063
5	0,04	2	0,3	0,5	1,23	0,021	0,2	0,5	0,4	1,6	1,065
6	0,043	2	0,2	0,5	1,21	0,023	0,2	0,6	0,5	1,7	1,068
7	0,052	2	0,2	0,4	1,17	0,024	0,3	0,6	0,5	1,8	1,07
8	0,056	2	0,1	0,4	1,17	0,025	0,3	0,7	0,5	1,9	1,072
9	0,059	2	0,1	0,3	1,15	0,027	0,3	0,7	0,6	2	1,076
10	0,07	2	0,08	0,2	1,13	0,029	0,3	0,8	0,6	2,2	1,08
11	0,078	2	0,07	0,2	1,11	0,03	0,4	0,9	0,6	2,3	1,082
12	0,085	2	0,063	0,2	1,1	0,031	0,4	0,9	0,6	2,3	1,084
						0,033	0,4	1	0,7	2,5	1,089
						0,035	0,5	1	0,7	2,6	1,092

Коэффициент, учитывающий отклонение толщины исходной от номинального значения равен

$$\Delta_s = 2 \sin \frac{\alpha_p}{2} (\beta_i(s) + \beta_n) \sin \frac{\alpha_p}{2} (\beta_i(s) - \beta_n) - \frac{\beta_i(s) - \beta_n}{\beta_i(s) \times \beta_n} \quad (5.3)$$

Следовательно, величина хода инструмента при подгибке кромок i -го шага равна $H_i = H_0 \pm \Delta_\sigma \pm \Delta_s$.

Как показали исследования шаговая подгибка кромок заготовки одновременно с двух сторон, при равномерном распределении механических свойств в поперечном направлении, приводит к отклонению от теоретической окружности и асимметрии трубы в прикромочной зоне, т.к. листовой прокат в поперечном и продольном направлении имеет отклонения прямолинейности (плоскостности), чаще всего выпуклую или вогнутую форму.

На данный момент позиционирование листовой заготовки относительно пресса подгибки кромок осуществляют с помощью центрирующих роликов. Центрирующие ролики регулируют положение листовой заготовки и предотвращают смещение заготовки относительно оси пресса подгибки кромок.

При подгибке исходной листовой заготовки для получения заготовки с симметричным профилем, расстояние A между верхними деформирующими

инструментами определяется с учетом отклонения от прямолинейной формы и корректируется на каждом шаге после бесконтактного измерения периметра листовой заготовки:

$$A_i = A_i(a) + A_i(b) \quad A_i(a,b) = B\Delta i/2 - l(\Delta i_{a,b}) - b_{\phi} \quad (5.5 - 5.6)$$

где $A_i(a)$ – расстояние от центра до деформирующего инструмента с левой стороны, $A_i(b)$ – расстояние от центра до деформирующего инструмента с правой стороны, B – ширина листа, Δi – общее отклонение от плоскостности по ширине заготовки i -го шага; l – длина контактного участка, Δi_a – локальное отклонение от плоскостности от левого края заготовки на расстоянии длины контакта i -го шага, Δi_b – локальное отклонение от плоскостности от правого края заготовки на расстоянии длины контакта i -го шага, b_{ϕ} – ширина фаски.

Устройство для измерения геометрии заготовки 7 (рис. 5.2а) для автоматического измерения и контроля геометрии заготовки до и после подгибки кромок, установленное на участке кромкогибочного прессы (рис. 5.2б) состоит из: устройства 11 закрепленной на станине для динамического и статического измерения нижней поверхности заготовки; закрепленное на каркасе 16 по меньшей мере одного устройства 12 для измерения верхней поверхности заготовки, по меньшей мере двух устройств для измерения параметров фаски, толщины и профиля деформируемого участка до и после подгибки кромок 13а, 13б, 14а, 14б.

Контроль и измерение осуществляется следующим образом: производится измерение профиля и позиционирование исходной заготовки 1 центрирующими роликами 8а и 8б, с учетом полученных данных по геометрии с лазерных датчиков 15, производят последовательное измерение геометрических параметров исходной заготовки до подгибки кромок в позиции 7/2, коррекцию режима гибки i -го шага, измерение геометрических параметров после подгибки кромок в позиции 7/3.

До подгибки кромок производится коррекция положения деформирующего инструмента с левой 6а и правой 6б стороны, дополнительное позиционирование центрующими роликами 9а и 9б. Данные с приемника датчиков бесконтактного лазерного устройства и стационарного твердомера обрабатываются онлайн режиме в специальной программе, где производят пересчет значения по перемещению деформирующего инструмента и усилию гибки.

Ограничения по усилию гибки и перемещению деформирующего инструмента позволит предотвратить переформовку прикромочной области и снизить дефекты по сварке.

Участок кромкогибочного пресса состоит минимум из одного устройства для измерения верхней поверхности заготовки 12 и двух устройств для измерения геометрии прикромочного участка 13а и 13б, закрепленные на каркасе 16 и снабжение приводом, позволяющие перемещаться и осуществлять измерения до и после подгибки кромок и сократить количество измеряемых устройств, при этом измерение возможно проводить как при движении деформируемой заготовки по рольгангам 10, так и при перемещении измерительного устройства.

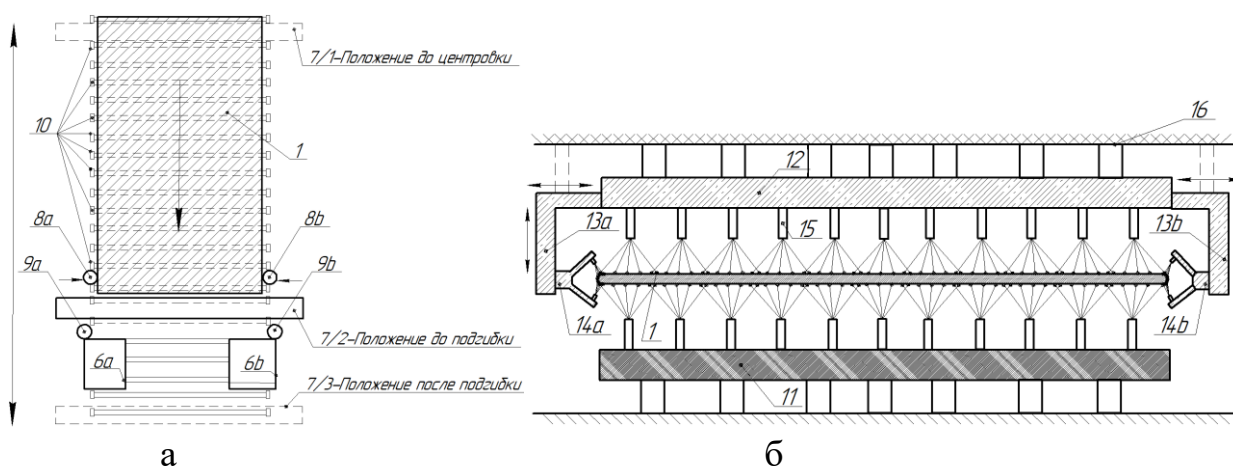


Рис. 5.2 – Устройство для измерения параметров заготовки

Технический результат изобретения предусматривает повышение качества продукции и сокращения количества дефекта по овальности трубы на 17% за счет снижения величины отклонения от теоретической окружности прикромочной области и смещения кромок (асимметрии) на 15-20%, снижение количества дефектов сварного соединения, связанные с геометрией зоны сварки на 27%, а также увеличение производительности за счет сокращения времени настройки оборудования при подгибке кромок, сборке и сварке.

На рис. 5.3 представлена величина хода инструмента прессы подгибки кромок на каждом шаге при производстве трубы 813x39 мм, произведенного из четырехкратного листового проката. Гибкая технология подгибки кромок позволяет максимально предотвращать 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.

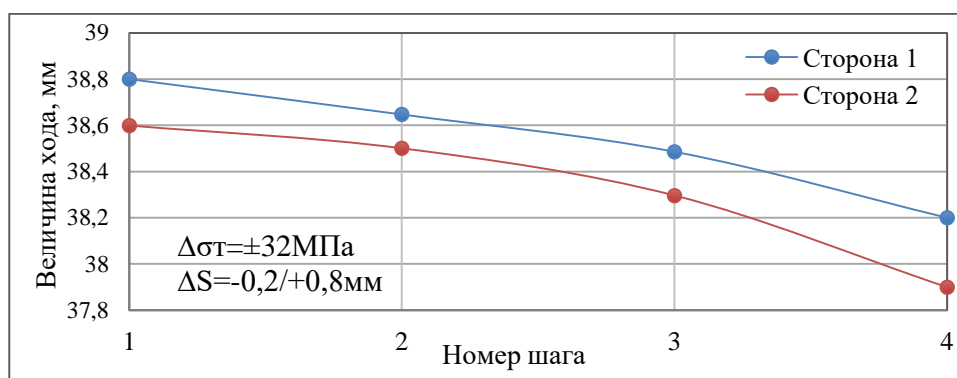


Рис. 5.3 – Величина хода при подгибке кромок с учетом отклонения по параметрам

5.2 Способ шаговой формовки

Недостатками свободной многопереходной гибки являются сложность контроля и жесткой фиксации геометрических параметров заготовки при её формовке по шагам, что может приводить к дефектам трубной заготовки, а также связано с недостаточной проработкой кривизны заготовки, приводящие к неравномерной кривизне профиля заготовки.

На прессе шаговой формовки не учитываются отличия деформационных режимов второй стороны от первой и неравномерное распределение механических свойств заготовки, что может привести к превышению значения овальности и отклонения формы по длине, связанной с ее пружинением, а также к асимметрии заготовки относительно сварного шва.

На основе результатов комплексного исследования предложено осуществлять шаговую формовку с учетом отличия деформационных режимов второй стороны заготовки от первой и неравномерного распределения механических свойств листа в поперечном и продольном направлениях.

Как показали исследования, шаговая формовка первой и второй стороны заготовки с идентичным ходом пуансона для двух половин, при равномерном распределении механических свойств в поперечном направлении, приводит к асимметрии трубы, т.к. вторая половина недоформовывается. Асимметрия заготовки, после шаговой формовки, визуально определяется в виде смещения кромок по высоте, при отсутствии указанного отклонения данный дефект можно выявить после сборки и сварки.

При гибке исходной листовой заготовки для получения О-образной заготовки с зазором и симметричным профилем, величина хода верхнего инструмента для каждого шага определяется индивидуально, как для первой стороны, так и для второй. С целью сокращения времени настройки оборудования, величину хода второй половины h_2 определяем из следующего соотношения $k=h_2/h_1$, где h_1 – величина хода первой половины, мм.

Коэффициент асимметрии определим в зависимости расположения O_i -го шага по периметру заготовки, разделив области трубной заготовки на следующие четыре отрезка (рис. 5.4):

- от позиции 12 часов до 2 часов величина хода второй половины больше или равно величине хода первой, т.е. $k_1=1 - 1,05$;
- от позиции 2 часов до 3 часов величина хода второй половины больше величине хода первой, т.е. $k_1=1,05 - 1,1$;
- от позиции 3 часов до 4 часов величина хода второй половины больше или равно величине хода первой, т.е. $k_1=1,1 - 1$;
- от позиции 4 часов до 6 часов величина хода второй половины равно величине хода первой, т.е. $k_1=1$.

Режим формовки заготовки следует разрабатывать с учетом распределения механических свойств. В зависимости от сортамента и способа производства листового проката исходная листовая заготовка имеет различное распределение механических свойств по ширине и длине.

Как отмечалось в главе 4, причинами асимметрии трубной заготовки при правильно выбранных режимах является неравномерное распределение механические свойства, т.к. прочностные свойства влияют на величину разгрузки заготовки на каждом шаге. Для учета влияния неравномерного распределения механических свойств по ширине используем коэффициент асимметрии k_2 .

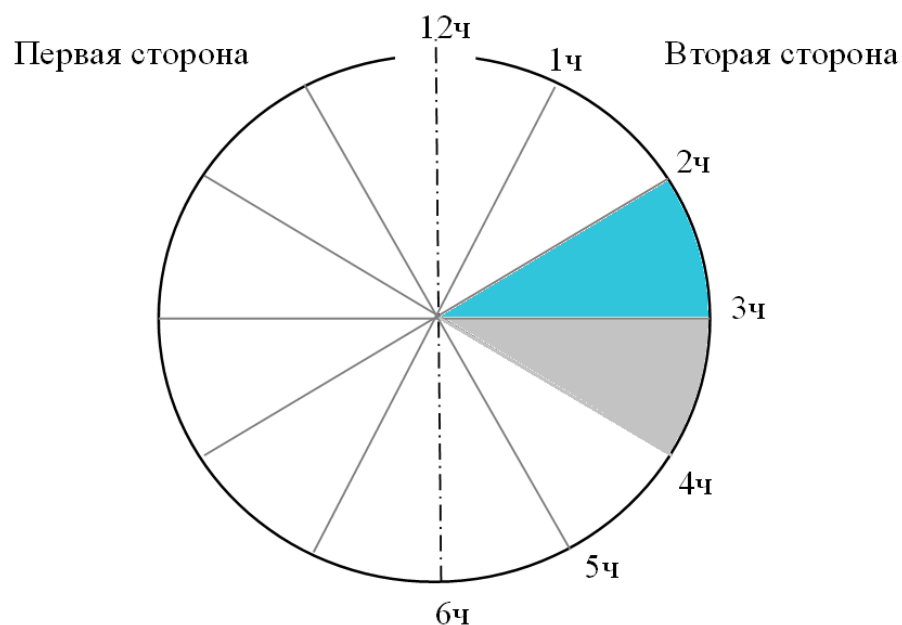


Рис. 5.4 – Области трубной заготовки после шаговой формовки

На ПШФ (рис. 5.5) представлен очаг деформации заготовки на i -ом шаге, включающий заготовку (1), пуансон (2) и матрица (бойки) (3). Для решения поставленной задачи на i -ом шаге (рис. 5.4 а) формовку второй стороны ведут при условии, что $R_{1p} = R_{2p} = R_p$; где R_{1p} и R_{2p} – усредненные радиусы в очаге деформации после разгрузки с первой и со второй соответственно; т.е. $R = R_{1n}\beta_1 = R_{2n}\beta_2$; R_1 и R_2 – усредненные радиусы в очаге деформации при нагрузке с первой и со второй стороны соответственно, мм; β_1 и β_2 – коэффициенты разгрузки на i -ом шаге с первой и со второй стороны.

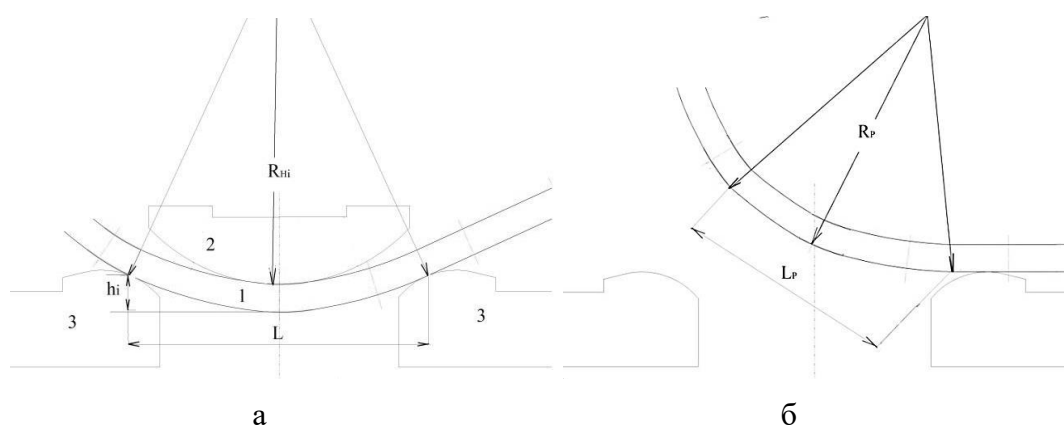


Рис. 5.5 – Параметры в очаге деформации: а – при нагрузке; б – после разгрузки

Формовку со второй стороны выполняют на величину обжатия h на i -ом шаге, исходя из указанного условия согласно параметрам, определенным по следующим формулам (5.7-5.8):

$$(\sigma_{T1} - \sigma_{T2}) = 123 \times (\beta_1 - \beta_2) \quad (5.7)$$

$$k_{2i} = 1 - \frac{\beta_2 \left(1 - \cos \left(\arcsin \frac{\beta_1 L}{2R_p} \right) \right)}{\beta_1 \left(1 - \cos \left(\arcsin \frac{\beta_2 L}{2R_p} \right) \right)} \quad (5.8)$$

где σ_{T1} и σ_{T2} – предел текучести исходной заготовки на i -ом шаге с первой и со второй стороны соответственно, МПа; L – длина очага деформации, мм.

Следовательно, величина хода инструмента при шаговой формовке второй стороны

$$h_2 = h_1 \times k_1 + k_2. \quad (5.9)$$

Шаговая формовка заготовки на ПШФ выполняется одновременно по всей длине. Из-за разности по механическим свойствам исходной заготовки по длине, после шаговой формовки отклонение определенных геометрических параметров по длине, а именно расстояние между кромками переднего и заднего торцов, трубной заготовки превышает 40%.

Для устранения отклонения по геометрии трубной заготовки в продольном направлении, следует производить формовку трубной заготовки с учетом условия, что радиусы после разгрузки $R_{p1} = R_{p2} = \dots R_{pi}$ на i -ом шаге с переднего $R_{пр}$ и заднего $R_{зр}$ торцов равны $R_{пр} = R_{зр} = R_p$. Следовательно, радиус после разгрузки на i -ом шаге равен $R_p = R_{пн} \beta_{п} = R_{зн} \beta_{з}$, где $R_{п.т.}$ и $R_{з.т.}$ – усредненные радиусы в очаге деформации при нагрузке с переднего П.Т. и заднего торцов З.Т. соответственно, мм; $\beta_{п}$ и $\beta_{з}$ – коэффициенты разгрузки на i -ом шаге с переднего и заднего торцов.

$$(\sigma_{Tп.} - \sigma_{Tз.}) = 123 \times (\beta_{п} - \beta_{з}) \quad (5.10)$$

$$k = 1 - \frac{\beta_{з} \left(1 - \cos \left(\arcsin \frac{\beta_{п} L}{2R_p} \right) \right)}{\beta_{п} \left(1 - \cos \left(\arcsin \frac{\beta_{з} L}{2R_p} \right) \right)} \quad (5.11)$$

где $\sigma_{Tп.}$ и $\sigma_{Tз.}$ – предел текучести исходной заготовки на i -ом шаге с переднего и заднего торцов соответственно, МПа.

Следовательно, величина хода инструмента при шаговой формовке заднего торца $h_3 = h_{п} + k$

где $h_{п}$ – величина хода переднего торца верхнего инструмента.

На рис. 5.6 представлено положение верхнего инструмента пуансона 2 и формовочного ножа 3 на i -ом шаге. по длине и изменение подъема заднего торца относительно переднего 3в: в позиции 1 $k = \Delta l$ – разность величины хода переднего

и заднего торцов верхнего инструмента при условии, что прочность заднего торца ниже переднего, т.е. k меньше 0; в позиции 2 $k=\Delta 2$ – разность величины хода переднего и заднего торцов верхнего инструмента при условии, что прочность заднего торца трубной заготовки выше переднего, т.е. k больше 0; в позиции 0 не производится изменение положение инструмента, т прочность заднего торца равна прочности переднего, т.е. $k=0$.

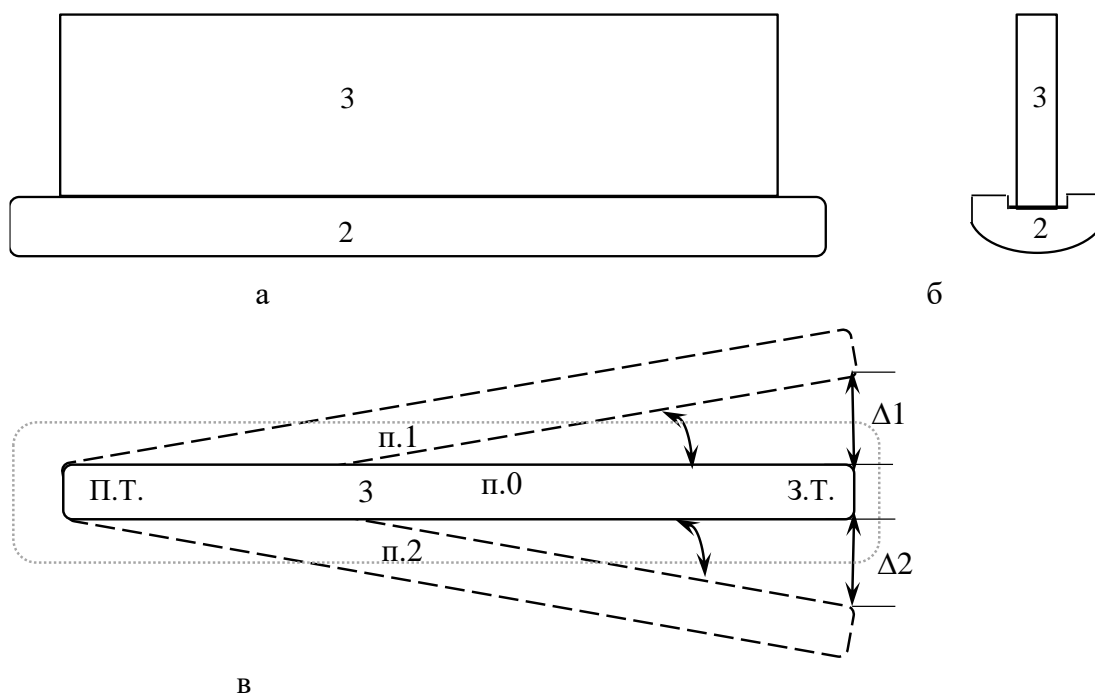


Рис. 5.6 – Положение верхнего инструмента по длине

Проверка способа шаговой формовки

Проверку способа провели при шаговой формовки трубных заготовок для производства трубы 1420x25,8мм. Пример расчета коэффициента асимметрии для определения величины хода инструмента при шаговой формовке трубной заготовки второй стороны относительно первой.

Исходной заготовкой является лист с подогнутыми кромками. Высота подогнутой кромки $Y' = 100$ мм; расстояние между кромками $X = 4320$ мм. Определяем коэффициент асимметрии k_1 в зависимости от расположения шагов второй стороны по периметру трубной заготовки после шаговой формовки

Таблица 5.2 – Коэффициент асимметрии k_1

№ шага	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Поз. час	12 – 2	12 – 2	2 – 3	2 – 3	3 – 4	3 – 4	3 – 4	4 – 6	4 – 6	4 – 6
k_1	1	1,02	1,05	1,07	1,09	1,05	1,01	1	1	1

Определяем коэффициент k_2 по формулам (5.7-5.8)

Таблица 5.3 – Коэффициент асимметрии k_2

$\Delta\sigma_T$	12	29	17	11	-9	10	15	22	11	7
β_1	1,24	1,3	1,283	1,24	1,3	1,31	1,25	1,26	1,25	1,25
R_p	734,2	897,2	885,7	733,3	985	991	801	802,5	797	794,7
β_2	1,14	1,06	1,251	1,215	1,35	1,25	1,13	1,08	1,16	1,19
k_2	-0,2	-0,52	-0,27	-0,17	0,9	-0,14	-0,24	-0,38	-0,17	-0,1

В таблице представлены отношение h_2/h_1 при формовке двух трубных заготовок: 1 – соответствует данным полученным с первого прессы шаговой формовки (ПШФ-1); 2 – данные со второго прессы шаговой формовки (ПШФ-2), соответствующая способу формовки, без учета (2-1) и с учетом (2-2) неравномерности распределения механических свойств.

Таблица 5.4 – Коэффициенты соотношения h_2/h_1

Шаг	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1,01	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2-1	1	1,03	1,05	1,07	1,09	1,05	1,01	1	1	1
2-2	0,99	1,02	1,045	1,07	1,091	1,047	1	0,99	1	1

В соответствии с полученными данными было проведено математическое моделирование по режимам, соответствующим данным в табл. 5.5 (см. рис. 5.7)

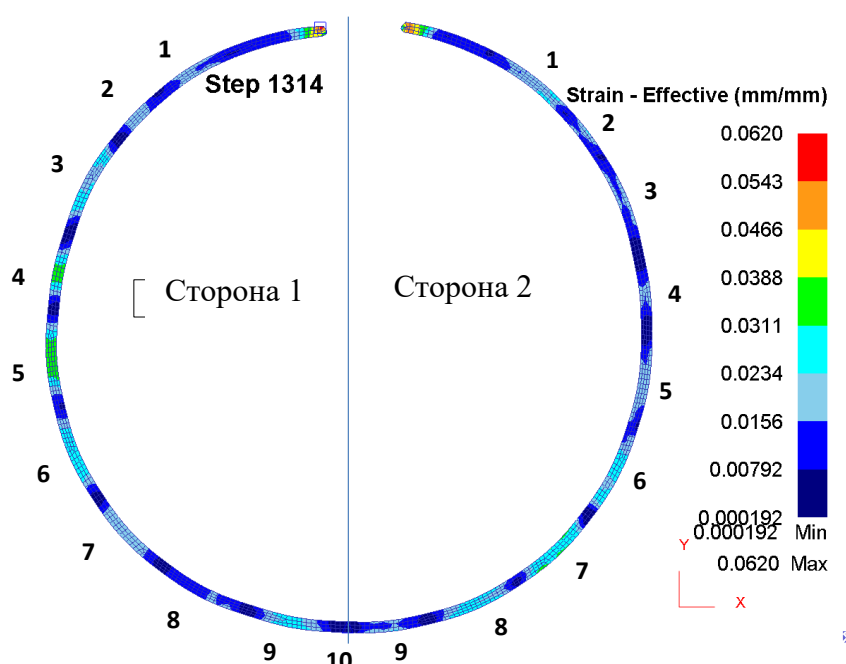


Рис. 5.7 – Распределение деформаций трубной заготовки 1420x25,8 К60 после формовки

В результате математического моделирования было установлено, что отклонение по деформации и радиусу в боковых зонах трубной заготовки, соответствующей условию 2-1 на 13 – 18% меньше, чем при условии 1.

В результате производственного эксперимента асимметрия трубной заготовка 1 составляло 3,4%, а трубная заготовка 2 при условии 2-2 - 1,8%, при этом смещение кромок трубной заготовки 2 в три раза меньше, чем у трубной заготовки 1.

Таблица 5.5 – геометрические параметры заготовок после шаговой формовки

Условия	Дгор., мм	Двер., мм	S_p , мм	D_1 , мм	D_2 , мм	C , мм
1	1452	1446	196	1463	1477	15
2	1441	1412	142	1442	1442	5

По методикам (5.10 – 5.12) предложено соотношение величины хода переднего и заднего торцов. На рис 5.8 видно, что отклонение расстояния между кромок с заднего (четные цифры) и переднего торцов (нечетные цифры) трубные заготовки ΔS_p с учетом неравномерности распределения по длине (красные линии), позволило получить заготовки с относительным отклонением S_p равное 3-5%.

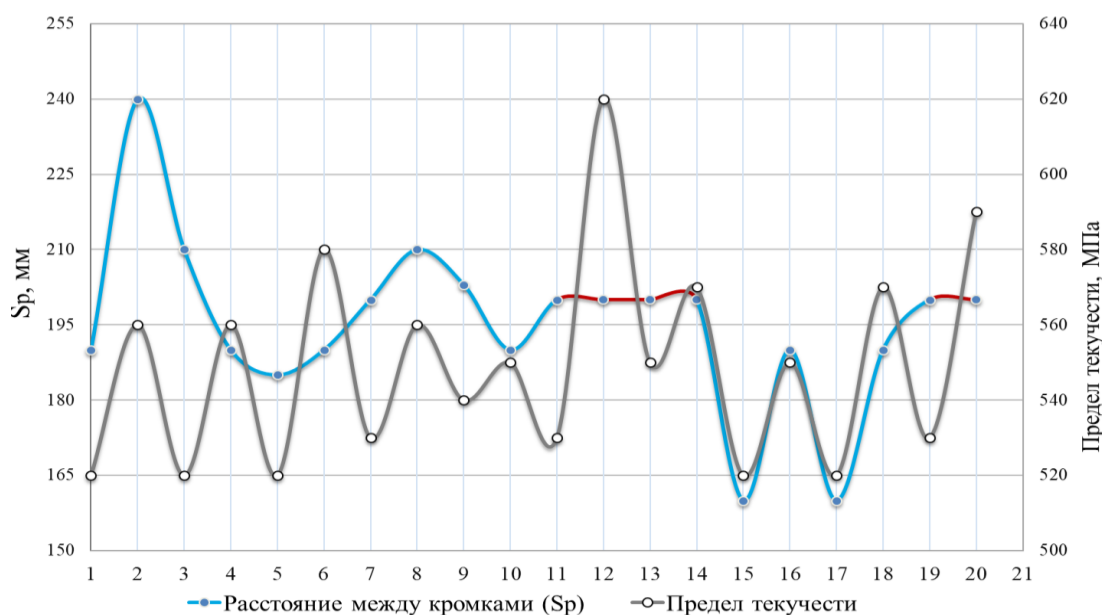


Рис. 5.8 – Отклонение по пределу текучести и расстоянию между кромками 10 трубных заготовок

Новые решения для шаговой формовки 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 на настройку оборудования до 2 раз.

1.3 Способ экспандирования

Калибровку сварной трубы осуществляют раздачей по всей длине на прессе-расширителе. При производстве труб большого диаметра используют пресс-расширители (экспандер) с гидравлическим приводом и механическим воздействием на форму трубы [58, 1119].

Основной проблемой данного процесса являются большие нагрузки на оборудование и высокие требования к исходной заготовке, так как при больших отклонениях от заданной формы, например, превышения овальности, нагрузка на деформирующий инструмент может превысить допустимые значения либо деформирующий инструмент пресса может не войти в трубу. Например, при экспандировании трубы 813x39 мм, из-за асимметрии, возникшее вследствие недоформовки области, усилие деформирования, соответствующая второму сегменту, превышает заданное значение на 18%.

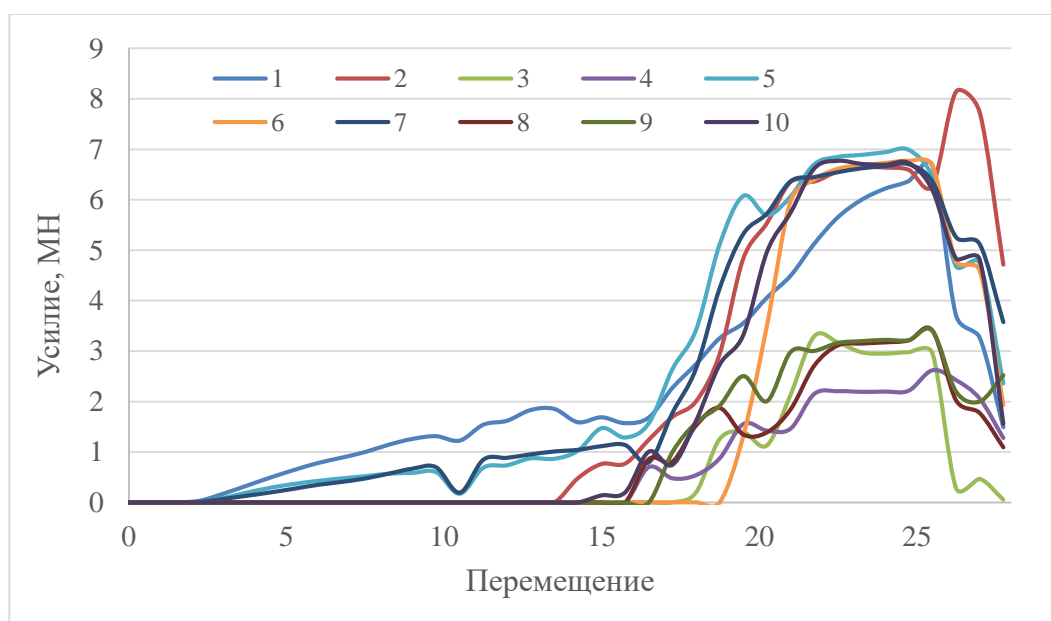


Рис. 5.9 – Усилие деформирования при экспандировании

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. 5.10), что приводит к неравномерному распределению НДС по периметру трубы и превышению значений остаточных напряжений отдельных участков.

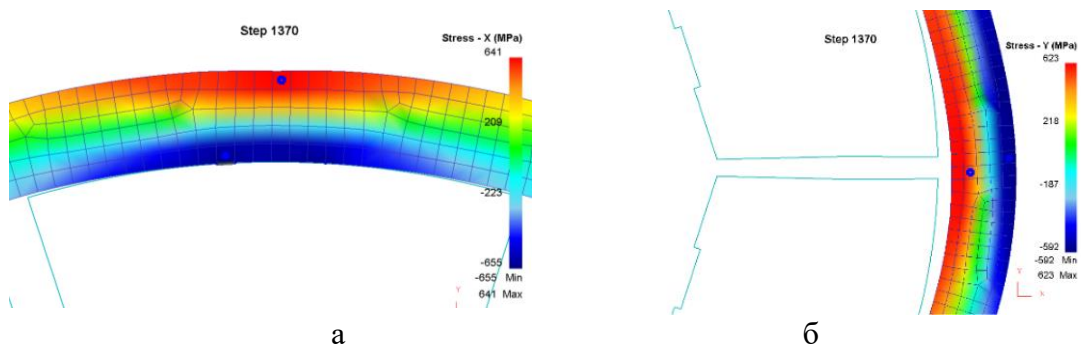


Рис. 5.10 – Распределение напряжений: а – в контактных и б – в неконтактных областях в начале процесса экспандирования.

В соответствии с предлагаемым изобретением экспандирование каждого шага состоит из следующих этапов: измерение формы трубы до экспандирования, коррекция режима при отклонении фактических параметров трубы от заданных, после наступления пластической деформации и получения круглой формы производят поворот трубы на угол α_m , обеспечивающий перекрытие неконтактных зон и соответствующей углублению для сварного шва, производят раздачу трубы до получения необходимых значений по геометрии трубы и отвод головки экспандера для перемещения трубы на следующий шаг (рис. 5.11 а, б). Угол поворота определяется по формуле:

$$\alpha_T = l_N / R_{NHK} + (45 \div 360 / (2n + (N - n))) \quad (5.12)$$

где n – количество сегментов; N – номер сегмента относительно которого произведен поворот; l_N – длина дуги в неконтактной зоне, мм; R_{NHK} – радиус дуги в неконтактной зоне, мм.

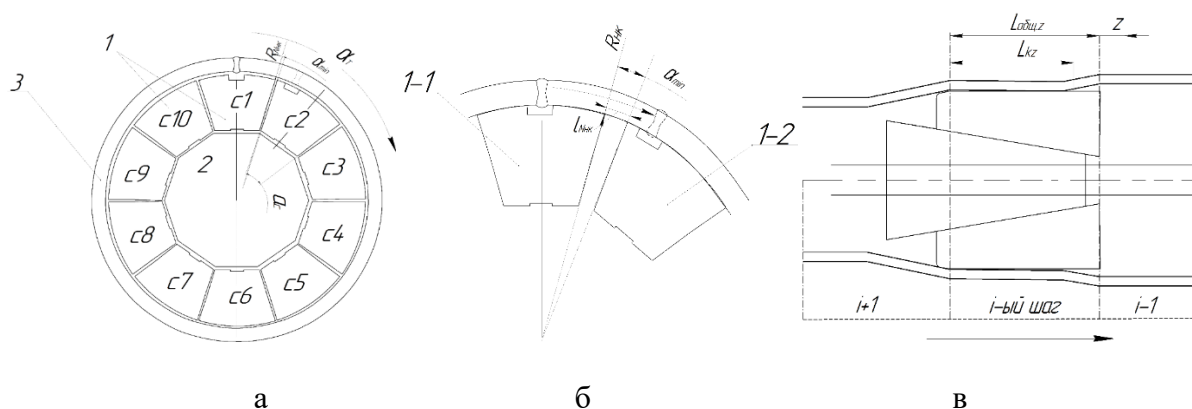


Рис. 5.11 - Положение головки экспандера и трубы на i -ом шаге

Шаговую раздачу трубы осуществляют с учетом неравномерного распределения механических свойств, отклонения по геометрическим параметрам

трубы до получения постоянного периметра по всей длине, возникшее на предшествующих процессах и силовых возможностях оборудования, при этом на каждом шаге осуществляют измерение геометрии трубы бесконтактным методом.

Распределение механических свойств по периметру и толщине исходной листовой заготовки зависит от сортамента и способа производства листового проката. Разброс механических свойств исходной заготовки по длине и ширине приводит к отклонению по геометрическим параметрам трубы, т.к. прочностные свойства влияют на величину разгрузки заготовки на каждом шаге.

Для устранения отклонения по форме трубы в продольном направлении, экспандирование, следует производить с учетом отклонения механических свойств и толщины исходной заготовки от номинального значения.

Введем условие, при котором периметр и диаметр трубы после разгрузки на каждом шаге должны быть равны, т.е. $P_{раз1} = P_{раз2} = \dots P_{рази} = P_{раз.n}$ и $D_{раз1} = D_{раз2} = \dots D_{рази} = D_{раз.n}$. Периметр после разгрузки на i -ом шаге равен:

$$P_{iраз} = P_{инаг} (e_i + 1) = P_{н.наг} (e_n + 1), \quad (5.13)$$

где $P_{инаг}$ – периметр трубы при нагрузке на i -ом шаге при конечном положении головки экспандера, мм; $P_{н.наг}$ – номинальное значение периметра трубы при нагрузке, мм; e_n – номинальное значение степени остаточной деформации; e_i – степень остаточной деформации на i -ом шаге.

$$e_i = e_{нагi} - e_{рази} \quad (5.14)$$

Так как периметр трубы до экспандирования может быть больше или меньше номинального значения, то целесообразнее проводить настройку не по степени остаточной деформации, а по конечному положению головки экспандирующего устройства, то есть по периметру и перемещению сегментов в радиальном направлении.

Процесс изменения головки экспандера в зависимости от формы и размера трубы состоит из 3-х непрерывных циклов. На первом цикле производится перемещение сегментов до усреднения диаметров и получения значения исходного периметра трубы. На данном цикле происходит изменение формы трубы от овальной к круглой: $U_{н1} = R_u - R_0$

R_0 – расстояние от центра головки экспандера до крайней точки сегмента в исходном положении; R_u – расстояние от центра головки экспандера до крайней точки сегмента в положении равном исходному периметру трубы

На втором цикле перемещение сегментов определяется в зависимости от степени раздачи трубы. Как и в процессе доформовки величина остаточных напряжений (ОН) влияют на конечную форму трубы, так как данный параметр влияет на степень остаточной деформации e_n . Степень разгрузки $e_{раз}$ без учета остаточных напряжений составляет в 1,5 – 2 раза больше, чем с учетом остаточных напряжений и составляет 0,2%.

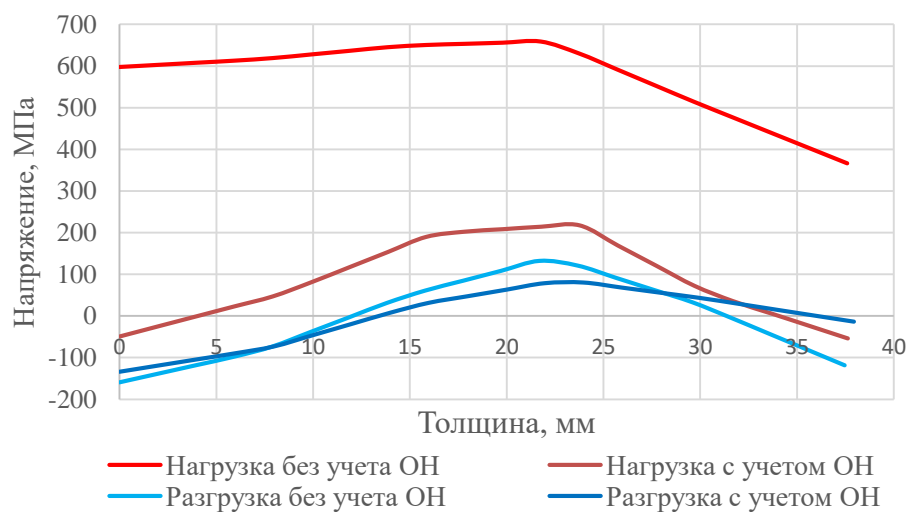


Рис. 5.12 – Напряжения по толщине стенки трубы с учетом и без учета ОН

Для обеспечения постоянства e_n , степень раздачи необходимо определять по формулам (5.15-5.24):

$$U_{n2} = R_k - R_u \quad (5.15)$$

$$e_{ki} = e_n + e_{рази} \quad P_{к.п.} = P_{и.п.} (e_{к.} + 1) \quad (5.16-5.17)$$

$$e_n = \frac{P_{г.м.} - P_{и.п.}}{P_{г.м.}} = \frac{R_{г.м.} - R_u}{R_{г.м.}}, \quad (5.18)$$

R_k – расстояние от центра головки экспандера до крайней точки сегмента в конечном положении, мм; $P_{к.п.}$ – периметр головки экспандера в конечном положении головки экспандера, мм; $P_{и.п.}$ – периметр головки экспандера в положении равное исходному периметру трубы, мм; $P_{г.м.}$ – периметр готовой трубы, мм.

$$e_{рази} = \frac{\beta \sigma_{Ti} - \sigma_{остi}}{E_i}; \quad e_{ki} = e_n + \frac{\beta \sigma_{Ti} (1 - \ln \frac{R_k + s}{R_k}) - \sigma_{остi}}{E_i} \quad (5.19 - 5.20)$$

$$R_k = (e_n + \frac{\beta \sigma_{Ti} - \sigma_{остi}}{E_i}) R_{Ni} + R_{Ni}; \quad U_k = (e_n + \frac{\beta \sigma_{Ti} - \sigma_{остi}}{E_i}) R_{Ni} \quad (5.20 - 5.21)$$

$$U_{h2i} = U_{ki} = \frac{(e_n + \frac{\beta \sigma_{Ti}(1 - \ln \frac{P_i + 2\pi s_i}{P_i}) - \sigma_{остi}}{E_i}) P_i}{2\pi} \quad (5.22)$$

Перемещение N - го сегмента на i-ом шаге равно:

$$u_{h2N} = u_{kN} = (e_n + \frac{\beta \sigma_{TN}(1 - \ln \frac{R_N + s_N}{R_N}) - \sigma_{остi}}{E_i}) R_{Ni} \quad (5.23)$$

где σ_{Ti} – предел текучести трубы на i-ом шаге, МПа; $\sigma_{остi}$ – суммарное остаточное напряжение, возникающее в трубе после разгрузки на i-ом шаге, МПа; E_i – модуль упругости трубы на i-ом шаге, МПа; $s_{i,N}$ – усредненная толщина стенки трубы по периметру на i-ом шаге в сечении, соответствующая N-ому сегменту, мм; $\beta = 0,5 \div 0,9$ – коэффициент, учитывающий напряженное состояние на i-ом шаге, соответствующая N-ому сегменту.

Участок экспандирования снабжен комплексным устройством для измерения выявления отклонения по геометрии трубы (рис. 5.10), состоящая из устройства 4 для измерения геометрии трубы по наружной и минимум одного устройства 5 для измерения по внутренней по поверхности, где измерение осуществляется с помощью датчиков 6 и 7, закрепленных на корпусах (внутреннего и наружного) измерительного устройства, которая может перемещаться вдоль оси экспандирования для измерения геометрии до экспандирования, в процессе раздачи и после разгрузки, при этом в процессе экспандирования фиксируются следующие параметры: горизонтальный и вертикальные диаметры, радиусы в околошовной зоне, диаметры на расстоянии от шва 50, 100, 200 мм до и после получения периметра готовой трубы с учетом степени раздачи.

До процесса экспандирования осуществляется позиционирование сварного шва трубы относительно деформирующего устройства экспандера 10 в позиции 12 часов с помощью рольгангов 8, измерение профиля трубы по всей длине с помощью устройства 9 и фиксация трубы с помощью клещевой тележки 11 (рис. 5.13б).

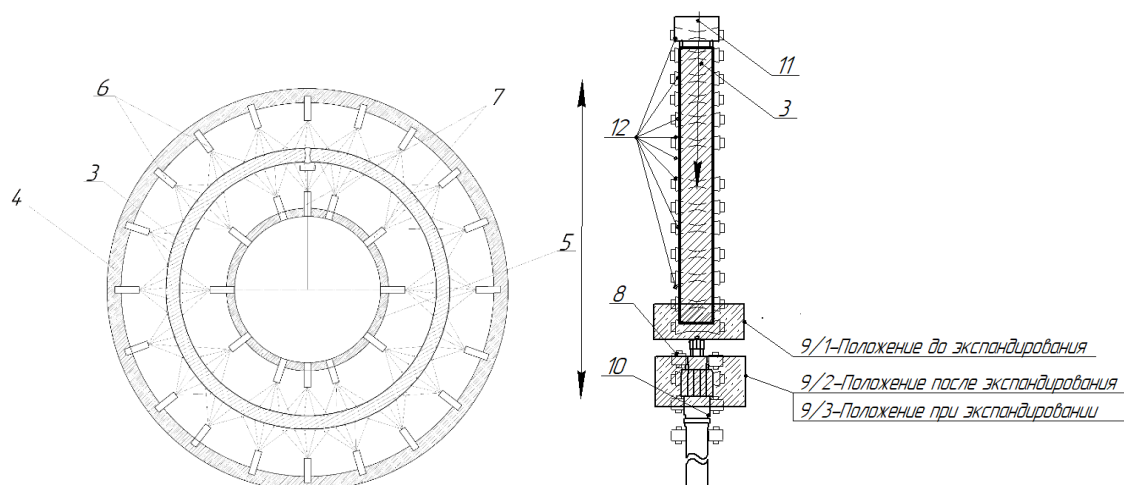


Рис. 5.13 – Комплексное устройство для измерения параметров трубы

Так как труба до экспандирования имеет форму отличной от формы головки экспандера нагрузка на сегменты распределяется неравномерно, а при превышении нагрузки на один из сегментов может вывести из строя деформирующее оборудование. Для предотвращения превышения периметра трубы после экспандирования из-за отклонений по геометрии и механическим свойствам и допустимых значений по нагрузке на экспандирующее устройство вводят ограничение по перемещению и усилию деформирования и предварительно рассчитывают нагрузку на каждый сегмент по формуле:

$$F_N = \beta \frac{\sigma_{Ti(N)} S_{i,N}}{R_{i(N)}} \left(1 + \frac{u_N}{R_N} \right) L_{KZ} L_{KT} ; \quad (5.24)$$

$$F_i = \sum F_N = \beta \frac{\sigma_{Ti} S_{i,i}}{R_i} \left(1 + \frac{U_H}{R_i} \right) L_{KZ} L_{KT} \quad (5.25)$$

$$F_{imax} = \beta \frac{\sigma_{Ti} S_{i,i}}{R_i} \left(1 + \frac{U_H}{R_i} \right) L_{общZ} P_H; \quad F_{Nmax} = k F_{imax} / n \quad (5.26 - 5.27)$$

Где F_N – нагрузка на N-ый сегмент на i-ом шаге, МН; F_i – усилие деформирования на i-ом шаге, МН; $\sigma_{Ti(N)}$ – предел текучести на i-ом шаге в сечении, соответствующая N-ому сегменту, МПа; $R_{i(N)}$ – радиус трубы на i-ом шаге в сечении, соответствующая N-ому сегменту, мм; R_N – радиус N-ого сегмента, мм; L_{KZ} , L_{KT} – длина контактной зоны сегмента и секции трубы на i – ом шаге в продольном и поперечном направлении, мм; $L_{общZ}$ – максимально возможная длина контакта сегмента с трубой в продольном направлении; $k=(\sigma_{Ti(N)}/\sigma_T)(s_{i(N)}/s)$ – коэффициент, учитывающий отклонение по механическим

свойствам и толщине стенки трубы по периметру; σ_T , s – номинальное значение предела текучести и толщины стенки трубы соответственно.

При превышении расчетной нагрузки как минимум на один из сегментов F_N максимальной допустимой нагрузки F_{Nmax} , уменьшают величину перемещения трубы на следующий шаг, а при достижении величины перемещения сегментов, соответствующая величине $(0,8 \div 1) \times F_{Nmax}$ в процессе экспандирования производится остановка, отвод головки экспандера, поворот трубы на угол α_T и перемещение трубы в сторону предыдущего шага на длину z обеспечивающей снижение нагрузки как минимум до 5%. Если нагрузка не превышает $0,95 F_{Nmax}$, то можно провести повторное экспандирование не перемещая трубу на предыдущий шаг. Нагрузку на деформирующий инструмент при контакте с трубой измеряется датчиками силы, передающих данные с помощью устройств, выполненных в виде пластин, нанесенных на сегменты

Нагрузка на деформирующий инструмент снижается за счет уменьшения контактной зоны по длине сегментов, при этом рекомендуемое значение перемещения равно $(0,1 \div 0,5) L_{Kz}$ (рис. 5.11в).

В таблице 5.6 представлены режимы экспандирования с учетом отклонения по механическим свойствам и особенности контактного воздействия.

Таблица 5.6 – Параметр экспандирования трубы 1420x25,8

Шаг	1	2	3	4	5	6-10	7	8	9
$e_k, \%$	1,07	1,09	1,1	1,12	1,11	1,1	1,09	1,1	1,13

Технический результат заявленного изобретения предусматривает повышение точности геометрических параметров за счет снижения отклонения по геометрии, остаточных напряжений труб, увеличения производительности за счет сокращения времени настройки оборудования и необходимости повторного экспандирования, а также снижение нагрузки на экспандирующее устройство.

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; 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 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 установлено 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 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 труб и увеличить производительность за счет сокращения времени настройки оборудования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Периодическое издание

1. Бороздин А.Н. Особенности развития нефтедобывающей и трубной промышленности как объекта исследования для выявления стратегических ориентиров их взаимодействия // Вестник университета, 2016. – № 4. – С. 5–11.
2. Волкова С.В., Губарев А.В. Проблемы внедрения концепции бережливого производства в трубной промышленности и пути их решения // Современные наукоемкие технологии, 2018. – № 10. – С. 27–31.
3. Гурова С.А., Кондратов Л.А. О производстве стальных труб // Сталь, 2016. – № 7. – С. 47–52.
4. Гусева Т.А. Нормативная документация на трубы для магистральных трубопроводов как фактор выпуска конкурентоспособной продукции / Гусева Т.А., Кершенбаум В.Я., Поликарпов Н.П. // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса, 2018. - №4 – С 69 – 76.
5. Ермаков Б.С., Шапошников Н.О. Влияние технологических факторов на формирование свойств металла труб магистральных нефтепроводов // Metallurg, 2018. – № 78 – С. 39–43.
6. Зайцев Н.В. ОМК – крупнейший в мире производитель труб большого диаметра // Сталь, 2007. – № 11. – С. 117.
7. А.Г. Колмаков, В.Ф. Терентьев, М.Б. Бакиров Методы измерения твердости: справ. изд./ - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Интермет Инжиниринг, 2005. -150 с.
8. Кондратов Л.А. «Металл-Экспо» как драйвер и генератор идей развития индустрии // Metallurg, 2017. – № 12. – С. 90-92.
9. Лифанов В.Я. Инновации и импортозамещение в трубной промышленности (обзор материалов XXII международной научно-практической конференции "трубы - 2016") // Сталь, 2016. – № 12. – С. 51 – 57
10. Лифанов В.Я. Трубная промышленность сегодня и завтра // Metallurg, 2018. – № 10. – С. 84 – 89

11. Лифанов В.Я. Трубная промышленность сегодня и завтра (к итогам XXIII международной научно-практической конференции "трубы - 2018")// Сталь, 2018. – № 11. – С. 38 – 44
12. Майшева С.В., Мальцева А.А. Развитие экспортных возможностей трубной промышленности РФ//XXI Всероссийского экономического форума молодых ученых и студентов. В 8-ми частях, 2018. – С. 25 – 27.
13. Маркин В. Важно сосредоточиться на повышении эффективности бизнеса // Металоснабжение и сбыт. 2017. – С. 28 – 31.
14. Новиков Н.И. Загороднова Л.В. Инновационная деятельность в черной металлургии в России и за рубежом: сходство и отличие // Экономика в промышленности, 2015. - №4 – С. 18 – 23
15. Осадчий В.Я., Комаров В.А. Разработка и освоение инновационных технологий, обеспечивающих импортозамещение и производство труб для атомной промышленности, нефтегазового и оборонного комплексов//Международная научно-техническая конференция «информатика и технологии. инновационные технологии в промышленности и информатике» («МНТК ФТИ-2017»), 2017. – С. 44 – 47.
16. Урасова А.А., Нечаев А.А. Стратегическое позиционирование предприятий металлургической промышленности в регионе // Экономика в промышленности 2017. – № 3 – С. 242 – 247
17. Ушаков А.С., Контдратов Л.А. О производстве стальных труб // Сталь, 2017. – № 7. – С. 36 – 40
18. Шабалов И.П. Механические свойства труб большого диаметра с повышенной деформационной способностью (для зон АТР) / Шабалов И.П., Настич С.Ю., Великоднев В.Я. // Металлург, 2018. – № 9. – С. 52 – 59
19. Юзов О.В. Тенденции изменения производственных и экономических показателей металлургических и трубных предприятий / Юзов О.В., Седых А.М., Петракова Т.М.//Сталь, 2018. – № 6. – С. 70 – 77
20. Цыкарева Е.Ю., Мальцев А.А. Конкурентоспособность трубной промышленности России на мировом рынке//XXI Всероссийского экономического форума молодых ученых и студентов. В 8-ми частях, 2018. – С. 34 – 36.
21. Хохлов Е. Лидер технологической модернизации // Нефть-газ-трубы, 2011. – С. 26 – 29.

22. Романцев Б.А., Коликов А.П., Самусев С.В. Развитие теории и технологии производства бесшовных и сварных труб // Сталь, 2009. – № 3. – С. 46.
23. Самусев С.В., Люскин А.В., Больдт В.В. Анализ способов формовки заготовки для производства труб большого диаметра // Сталь, 2009. – № 12. – С. 46.
24. Садыков В.В., Чикалов С.Г. Развитие российского рынка труб и металлургического машиностроения // Сталь, 2007. – № 11. – С. 121.
25. Садыков В.В. Освоение новых видов труб для проекта ВСТО // Сталь, 2006. – № 11. – С. 111.
26. Садыков В.В. Позиции российских производителей труб на рынках стран СНГ // Сталь, 2005. – № 11. – С. 93.
27. Седых А.М. Стратегические задачи трубной промышленности России на современном этапе // Сталь, 2005. – № 11. – С. 89.
28. Степанов П.П. Реализация инвестиционной программы ЗАО ОМК, включая обеспечение производства ТБД собственным толстолистовым прокатом // Сталь, 2012. – № 11. – С. 47.
29. Степанов П.П. Инновационное развитие металлургического и трубного комплексов ОМК // Сталь, 2010. – № 11. – С. 57.
30. Степанов П.П. Освоение производства электросварных труб большого диаметра на ТЭСА 1420 // Сталь, 2006. – № 6. – С. 94.
31. К вопросу определения трещиностойкости высокопрочных труб большого диаметра / Пышминцев И.Ю., Струин А.О., Мартынова Н.А., Валов М.А., Насыбулина Е.Р. // Сталь, 2011. – № 2. – С. 49-52.
32. Совершенствование сортамента и качества труб для нефтяной промышленности / Поярков В.Г., Гончарук А.В., Романцев Б.А., Фартушный Р.Н., Поливец А.В. // Сталь, 2008. – № 1. – С. 47.
33. Совершенствование технологии производства электросварных прямошовных труб / Барабанцев Г.Е., Тюляпин А.Н., Колобов А.В., Юсупов В.С. // Производство проката, 2005. – № 12. – С. 21.
34. Митрохин М.А., Чубунов М.В. Определение предельно допустимых значений овальности трубы по условию недопустимости пластических деформаций. // Эксплуатация и ремонт, 2012. - № 1. – С. 34 – 36.

35. Методика расчета геометрических параметров кромки на участке кромкогибочного пресса в линии ТЭСА-1420 в условиях Челябинского трубопрокатного завода / Самусев С.В., Романцов А.И., Жигунов К.Л., Люскин А.В., Сигида М.С. // Известия ВУЗов. Черная металлургия, 2012. – № 1. – С. 25-29.

36. Разработка технологических режимов участка формовки трубной заготовки в линии ТЭСА-1420 ОАО «Челябинский трубопрокатный завод» / Самусев С.В., Романцов А.И., Жигунов К.Л., Больдт В.В., Сигида М.С. // Производство проката, 2011. – № 10. – С. 20-28.

37. Экспериментальное исследование формоизменения трубной заготовки в линии ТЭСА-1420 ОАО «ЧТПЗ» для производства газонефтепроводных труб / Самусев С.В., Романцов А.И., Больдт В.В., Жигунов К.Л., Люскин А.В., Сигида М.С. / Инновационные технологии обработки металлов давлением: сборник тезисов. – М.: НИТУ «МИСиС», 2011. – 135 с.

38. Самусев С.В., Люскин А.В., Больдт В.В. Способ сборки профиля заготовки после пресса пошаговой формовки в линии ТЭСА 1420 // Известия ВУЗов. Черная металлургия, 2010. – № 3. – С. 9-13.

39. Самусев С.В., Больдт В.В., Люскин А.В. Расчет параметров формоизменения трубной заготовки в линии производства труб большого диаметра / Прогрессивные технологии пластической деформации: сборник тезисов. – М.: НИТУ "МИСиС", 2009. – 125 с.

40. Методика расчета параметров формоизменения трубной заготовки в линии ТЭСА-1420 ЗАО «Ижорский трубный завод» / Самусев С.В., Величко А.А., Люскин А.В., Андреев Ю.П., Воронцов А.Н. // Известия ВУЗов. Черная металлургия, 2009. – № 5. – С. 36-40.

41. Самусев С.В., Люскин А.В. Методика расчета параметров заготовки в процессах производства труб большого диаметра // Известия ВУЗов. Черная металлургия, 2009 – № 3. – С. 21-23.

42. Самусев С.В., Люскин А.В. Методика расчета геометрических параметров трубчатой заготовки при формоизменении в различных линиях ТЭСА // Известия ВУЗов. Черная металлургия, 2009. – № 1. – С. 10-12.

43. Самусев С.В., Больдт В.В. К расчету механизма гофрообразования трубной заготовки при производстве прямошовных сварных труб // Известия ВУЗов. Черная металлургия, 2010. – № 11. – С. 22-24.

44. Самусев С.В., Люскин А.В., Больдт В.В. Производство труб большого диаметра по «КСОЕ» схеме / Прогрессивные технологии пластической деформации. – М.: НИТУ «МИСиС», 2009 – 125 с.

45. Самусев С.В., Больдт В.В. Совершенствование технологии и оборудования для производства сварных труб и профилей / Прогрессивные технологии пластической деформации. – М.: НИТУ «МИСиС», 2009 – 125 с

46. Технологические режимы процесса формоизменения заготовки в линии ТЭСА 1420 ЗАО «Ижорский трубный завод» // Самусев С.В., Величко А.А., Люскин А.В., Андреев Ю.П., Воронцов А.Н., Больдт В.В. // Известия ВУЗов. Черная металлургия, 2009. – № 9. – С.18-21.

47. Занковец П.В. Степень влияния подготовки и сборки под сварку на качество сварных соединений технологических трубопроводов // Автоматическая сварка, 2011. - № 6 – С. 48 – 53.

48. Методика определения пружинения и геометрических параметров при предварительной формовке трубной заготовки труб большого диаметра на прессах // Боклаг Н.Ю., Чечулин Ю.Б., Песин Ю.В., Кугаевский С.С. // Электронный журнал Современные проблемы науки и образования, 2014. – № 2 – 8 с.

49. Чечулин Ю.Б., Кичка А.О., Гончаров К.А. Совершенствование схемы формовки заготовки для сварки труб большого диаметра // Сталь, 2011. – № 10. – С. 38.

50. Расчет геометрии инструмента для управления формовкой труб большого диаметра // Чечулин Ю.Б., Песин Ю.В., Душкин и др. // Заготовительное производство в машиностроении, 2011. - № 10. – С. 34 – 37.

51. Гончаров К.А. Чечулин Ю. Б. Моделирование напряженно-деформированного состояния штампа для формовки труб большого диаметра // Ремонт, восстановление, модернизация, 2011. - № 7. – С. 33 – 37.

52. Шинкин В.Н., Мокроусов В.И. Критерий разрыва труб газонефтепроводов при дефекте «раскатной пригар с риской» // Производство проката, 2012. – № 12. – С. 19-24.

53. Шинкин В.Н. Критерий перегиба в обратную сторону свободной части листовой заготовки на трубоформовочном прессе SMS MEER при производстве труб большого диаметра // Производство проката, 2012. – № 9. – С. 21-26.

54. Шинкин В.Н., Коликов А.П., Мокроусов В.И. Расчет максимальных напряжений в стенке трубы при экспандировании с учетом остаточных напряжений заготовки после трубоформовочного пресса SMS MEER // Производство проката, 2012. – № 7. – С. 25-29.

55. Шинкин В.Н., Коликов А.П., Мокроусов В.И. Критерий разрушения труб большого диаметра при несплавлении сварного соединения и внутреннем давлении // Производство проката, 2012. – № 2. – С. 14-16.

56. Шинкин В.Н., Коликов А.П. Технологические расчеты процессов производства труб большого диаметра по технологии SMS MEER // Metallurg, 2011. – № 11. – С. 77-81.

57. Шинкин В.Н., Коликов А.П. Моделирование процесса формовки заготовки для труб большого диаметра // Сталь, 2011. – № 1. – С. 54–58.

58. Шинкин В.Н., Коликов А.П. Моделирование процессов экспандирования и гидроиспытания труб большого диаметра для магистральных трубопроводов // Производство проката, 2011. – № 10. – С. 12-19

59. Шинкин В.Н., Коликов А.П. Упругопластическое формоизменение металла на кромкогибочном прессе при формовке труб большого диаметра // Сталь, 2011. – № 6. – С. 53–56.

60. Шинкин В.Н., Коликов А.П. Формовка листовой заготовки в кромкогибочном прессе и условие возникновения гофра при производстве труб магистральных трубопроводов // Производство проката, 2011. – № 4. – С. 14-22.

61. Шинкин В.Н., Уандыкова С.К. Гибка стальной листовой заготовки на кромкогибочном прессе при производстве труб большого диаметра // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова, 2009. – № 16. – С. 110-112.

62. Шинкин В.Н. Гофр продольной кромки листа при его формовке на кромкогибочном прессе // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности, 2009. Вып. 6. – С.171-174.

63. Буркин С.П., Шимов Г.В. Экспресс-анализ остаточных напряжений в трубах // Сталь, 2012. – № 10. – С. 60-64.

64. Оценка максимально-нагруженных участков трубной заготовки при ее производстве в линиях с пошаговой схемой формовки / Шабалов И.П., Самусев С.В., Соловьев Д.М., Филиппов Г.А. // Проблемы черной металлургии и материаловедения, 2012. – № 3. – С. 94-100.

65. Определение экстремальных сечений трубной заготовки различных технологических схем производства для проведения исследований потребительских свойств труб магистральных газопроводов. / Шабалов И.П., Самусев С.В., Соловьев Д.М., Филиппов Г.А. // Проблемы черной металлургии и материаловедения, 2012. – № 2. – С. 94-100.

66. Убизький Н.Н. Остаточные напряжения в обечайках при различных способах гибки // Системное проектирование и анализ характеристик аэрокосмической техники, 2010. – С. 113-119

67. Исследование остаточных напряжений в сварных трубах методом рентгеновской дифрактометрии / Коликов А.П., Котелкин А.В., Лютцау А.П., Звонков А.Д., Корниенко А.В. // Сталь, 2010. – № 10. – С. 50-52.

Литература

68. Айнбиндер А.Б. Расчет магистральных и промысловых трубопроводов на прочность и устойчивость. Справочное пособие – М: 1991 – 287 с.

69. Беляев Н.М. Сопротивление материалов. – М.: Наука, 1965. – 856 с.

70. Биргер И.А. Остаточные напряжения. – М.: Машгиз, 1963. – 232 с.

71. Буланов В.Е, Гузачев А.Н. Основы теории упругости и пластичности: Учебно-методическое пособие для вузов. – Тамбов. Высшая школа, 2002 – 44 с

72. Громов Н.П. Теория обработки металлов давлением. – М.: Металлургия, 1967. – 334 с.

73. Жилин П.А. Прикладная механика. Основы теории оболочек. – СПб: Изд-во СПбГПУ, 2006. – 167 с.

74. Ильюшин А.А. Труды. Т. 1 (1935-1945) / Составители Е.А. Ильюшина, М.Р. Короткина. – М.: Физматлит, 2003. – 352 с.

75. Ильюшин А.А. Труды. Т. 2 (1946-1966) Пластичность / Составители Е.А. Ильюшина, М.Р. Короткина. – М.: Физматлит, 2004. – 480 с.
76. Ильюшин А.А. Механика сплошной среды. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1978. – 287 с.
77. Ильюшин А.А. Пластичность. – М.: Гостехиздат, 1948. – 376 с.
78. Ишлинский А.Ю. Механика: Идеи, задачи, приложения. – М.: Наука, 1985. – 624 с.
79. Иванов И.И., Соколов А.В., Соколов В.С. Основы обработки металла давлением: учебник для вузов. – М.: ИНФРА-М, 2007. – 144 с.
80. Качанов Л.М. Основы теории пластичности: Учеб. Пособие для студентов вузов. – 4-е изд., перераб. – М. Высшая школа, 1969 – 420 с.
81. Коликов А.П., Романенко В.П., Самусев С.В. Машины и агрегаты трубного производства: учебное пособие для вузов. – М.: МИСиС, 1998. – 536 с.
82. Лосик А.В., Чимаров С.Ю. Научно-технический прогресс: драматизм развития (Страницы отечественной истории. Вторая половина 50-Х-80- е годы). С-Пб., 1995.
83. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести: учебник для вузов. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Машиностроение, 1975. – 400 с.
84. Матвеев Ю.М. Теоретические основы производства сварных труб. – М.: Металлургия, 1967. – 168 с.
85. Матвеев Ю.М. Сварные трубы. – М.: Металлургиздат, 1950. – 335 с.
86. Матвеев Ю.М. Производство сварных труб. Тематический отраслевой сборник, №3. – М.: Металлургия, 1974. – 160 с.
87. Матвеев Ю.М. Производство сварных труб. Тематический отраслевой сборник, №2. – М.: Металлургия, 1973. – 104 с.
88. Матвеев Ю.М. Производство сварных труб. Тематический отраслевой сборник, №1. – М.: Металлургия, 1972. – 121 с.
89. Матвеев Ю.М. Производство сварных и бесшовных труб. Сборник статей, №13. – М.: Металлургия, 1972. – 153 с.
90. Матвеев Ю.М. Производство сварных и бесшовных труб. Сборник статей, №12. – М.: Металлургия, 1971. – 153 с.

91. Матвеев Ю.М. Производство сварных и бесшовных труб. Сборник статей, №11. – М.: Металлургия, 1969. – 185 с.
92. Миролубов И.Н., Алметов Ф.З., Курицын Н.А. и др. Сопротивление материалов: пособие по решению задач. – 6-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Издательство "Лань", 2004. – 512 с.
93. Мошнин Е.Н. Гибка и правка на ротационных машинах. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство "Машиностроение", 1967. – 272 с.
94. Неровный В.М. Теория сварочных процессов: учебник для вузов – 2-е изд. М: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. — 702 с.
95. Окерблом Н.О. Сварочные деформации и напряжения. Л.: Машгиз, 1948 – 271с.
96. Писаренко Г.С. Сопротивление материалов: Учебник для вузов – 4-е изд., перераб. и доп. – Киев: Наука. Высшая школа, 1979 – 696 с.
97. Рымов В.А., Полухин П.И., Потапов И.Н. Совершенствование производства сварных труб. – М.: Металлургия, 1983. – 312 с.
98. Самуль В.И. Основы теории упругости и пластичности: Учеб. Пособие для студентов вузов. – 2-е изд., перераб. – М. Высшая школа, 1982 – 264 с.
99. Седов Л.И. Механика сплошной среды. Том 1. – М.: Наука, 1970. – 492 с.
100. Седов Л.И. Механика сплошной среды. Том 2. – М.: Наука, 1970. – 568 с.
101. Скопинский В.Н., Захаров А.А. Сопротивление материалов: Учебное пособие. Часть 1. – М.: МГИУ, 1999 – 128 с.
102. Соколовский В.В. Теория пластичности: Учеб. Пособие для студентов вузов. – М. Высшая школа, 1969 – 608 с.
103. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. Учебник для вузов. Изд. 4-е, перераб. и доп. М., «Машиностроение», 1977 – 423 с.
104. Производство труб, Шевакин Ю.Ф., Гейсберг А.З. Изд-во «Металлургия», 1968, 440с;
105. Работнов Ю.М. Сопротивление материалов.–М.: Физматгиз, 1962.– 456с.
106. Технология трубного производства. Учебник для вузов. В.Н. Данченко, А.П. Коликов, Б.А. Романцев, С.В. Самусев. – М: 2002г. – 640с.

107. Феодосьев В.И. Избранные задачи и вопросы по сопротивлению материалов. – 4-е изд., перераб. и допол. – М.: Издательство "Наука", 1973. – 400 с.
108. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов: учебник для вузов. – 9-е изд., перераб. – М.: Наука. 1986. – 512 с.
109. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов: учебник для вузов. – 11-е изд., стереотип. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 592 с.
110. Эфрон Л.И. Металловедение в «большой» металлургии. Трубные стали. М: Металлургиздат, 2012. – 696 с.

Иностранное издание

111. PH Gutiérrez, FC Rodríguez, JR Mondragón. Thermo-mechanic and Microstructural Analysis of an Underwater Welding Joint. Soldagem & Inspeção. 2016;21(2):156-164. <http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/SI2102.05>
112. J. Nóbrega, D. Diniz, A. Silva. Numerical Evaluation of Temperature Field and Residual Stresses in an API 5L X80 Steel Welded Joint Using the Finite Element Method; Metals. Brazil, 2016 vol 6, i 28. DOI:10.3390/met6020028
113. SMS Group Newsletter, 2012. – № 1. – С. 16-17.
114. SMS Group Newsletter, 2011. – № 1. – С. 35.
115. Eiji TSURU*, Jun AGATA, Yukinobu NAGATA Satoshi SHIRAKAMI, Yasuhiro SHINOHARA, Forming and Buckling Simulation on High-strength UOE Pipe with Plastic Anisotropy // Nippon Steel Technical Report, January 2013 - No. 102 – P. 70-78.
116. M.D. Herynk, S. Kyriakides_, A. Onoufriou, H.D. Yun, Effects of the UOE/UOC pipe manufacturing processes on pipe collapse pressure // International Journal of Mechanical Sciences, 2006. - №12 – P. 533 – 533.
117. *UOE Pipes for Ultra Deep Water Application* — Analytical and FE Collapse Strength Prediction vs. Full-. Scale Tests of Thermally Treated Line Pipe. Andreas Liessem, Johannes Grob-Weege, Gerhard Knauf, Steffen Zimmermann // Technical Publications Europipe from 2007, 9 pages.
118. Arakawa Takekazu, Nishimura Kimihiro, Yano Koji, Suzuki Nobuhisa, Development of High Performance UOE Pipefor Linepipe //JFE Technical Report, 2013 - №18 p. 23-35.

119. Mcree D., Macre T., Cuida O. Stresses Supported by the Pipe Wall during the Expanding Process // Metallurgy and new materials researches, 2009. 17. – №4. – P. 9-18.
120. Jai Dev Chandel, Nand Lal Singh. Behaviour of Tensile Testing of X -120M Steel from Plate to Line Pipe Due to Bauschinger Effect // Global Journals Inc. (USA), 2012. - №2 – P. 30-36.
121. Fan Lifeng, Gao Ying, Li Qiang, Xu Hongshen. Quality Control on Crimping of Large Diameter Welding Pipe. Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2012, vol. 25, Issue 6, pp. 1264–1273
122. Vladimir V. Aleshin, Viacheslav V. Kobayakov, and Vadim E. Seleznev A Simulation Technology for a Full Cycle of Steel Line Pipe Manufacturing Operations // Advances in Mechanical Engineering, Volume 2011, Article ID 765739, 7 pages
123. Mechanical properties of longitudinal submerged ARC welded steel pipes used for gas pipeline of offshore oil. Z.Z. Yang, W. Tian, Q.R. Ma, Y.L. Li, J.K. Li, J.Z. Gao and H.B. Zhang, Y.H. Yang // ACTA Mechanica Sinica (Engl. Lett.) Vol.21 No.2 pp85-93 April 2008, 9 pages.
124. Jai Dev Chandel, Nand Lal Singh. Formation of X-120 M Line Pipe through J-C-O-E Technique // *Engineering*, 2011, 3, 400-410

Стандарты

125. ГОСТ 9031-78 Меры твердости образцовые. Технические условия
126. ГОСТ 26877-2008.Metalloprodukcija. Metody izmerenija otклонений формы
127. API Spec. 5L Технические условия для трубопроводов, 2007. – 196 с.
128. ГОСТ 10706-76 Трубы стальные электросварные прямошовные.
129. ГОСТ Р ИСО 3183-2015 Трубы стальные для трубопроводов нефтяной и газовой промышленности. Общие технические условия
130. ГОСТ 20295-85 Трубы стальные сварные для магистральных газонефтепроводов. ТУ
131. Технологическая инструкция. Трубы электросварные прямошовные диаметром 508 – 1422 мм.
132. ОТТ-23.040.00-КТН-051-11. Трубы нефтепроводные большого диаметра. Общие технические требования

133. ГОСТ 31447-2012 Трубы стальные сварные для магистральных газопроводов, нефтепроводов и нефтепродуктопроводов. Технические условия (с Поправкой) ГОСТ от 05 июня 2013 г. № 31447-2012

134. ГОСТ 19903-2015 Прокат листовой горячекатаный. Сортамент

Информационные ресурсы

135. <http://omk.ru/OMK>

136. <http://oao-vmz.pf>

137. <http://itz.severstal.com/rus/>

138. <http://www.severstal.ru/>

139. <http://www.chelpipe.ru/>

140. <http://tmkgroup.ru/>

141. <http://pipe.metinvestholding.com/ru>

142. <http://www.frtп.ru/>

143. <http://www.europipe.com/>

144. <http://www.sms-meer.com/>

145. <http://www.haeusler.ru/products/1/1/>

146. <http://ac.gov.ru/files/publication/a/2194.pdf>

Авторефераты и диссертации

147. Звонарев Д.М. Совершенствование процессов подгибки кромок и шаговой формовки сварных труб большого диаметра для обеспечения высокой точности размеров и форм: дис. канд. тех. наук. – Челябинск, 2015. – 153 с.

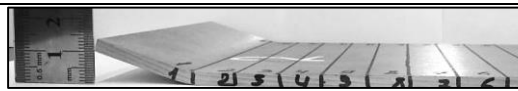
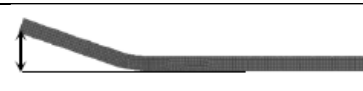

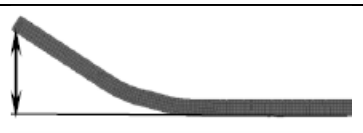

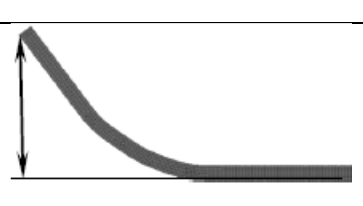
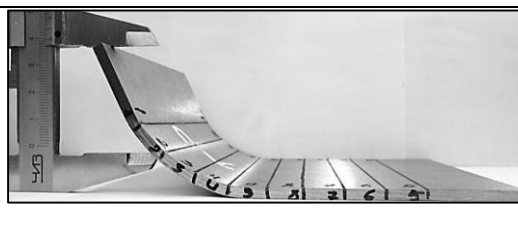
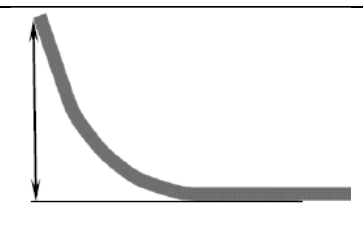
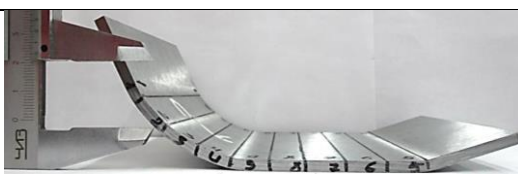
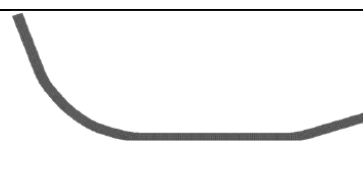
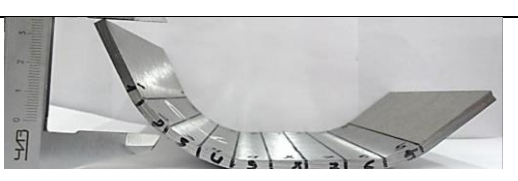
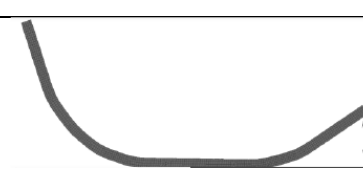

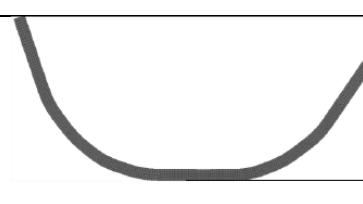

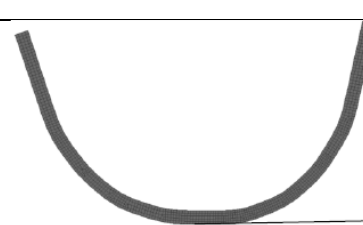
148. Больдт В.В. Исследование процесса шаговой формовки заготовок в промышленных условиях линии ТЭСА 1420 для получения прямошовных нефтегазопроводных и разработка ресурсосберегающего способа их изготовления: автореферат канд. тех. наук. – Москва, 2013. – 24 с.

149. Захаренко А.И. Уменьшение влияния сборочных отклонений на качество формирования корневого слоя шва при дуговой сварке: дис. канд. тех. наук. – Тольяти, 2011. – 234 с.

150. Репин Д.Г. Анализ остаточных напряжений в трубах большого диаметра на стадии проектирования магистральных газопроводов: дис. канд. тех. наук. – Москва, 2009. – 195 с.

Приложение А

Высота модельного образа по шагам

Шаг	Физическая модель	Математическая модель		%	
	Первая половина				
1		10,2		10,3	1
2		20,2		20,5	1,5
3		30		30,5	1,6
4		52		53	1,9
	Вторая половина				
5		10		10,15	1,5
6		23		23,5	2,1
7		41		41,7	1,7
8		58		59,3	2,2

Приложение Б

Протокол № 1

Определение погрешности измерения твердости портативным твердомером ТЭМП-2 по шкале НВ

Для определения погрешности измерения твердости портативным твердомером ТЭМП-2 в лаборатории металловедения ЦИЛ ИТЦ проведено пять замеров твердости по методу Бринелля на стандартном образце № 1189-207 НВ 2,5/187,5/10 с заявленной твердостью 207 единиц. Результаты замеров твердости и погрешность измерения приведены в табл. 1. Согласно полученным результатам погрешность в измерении твердости по методу Бринелля портативным твердомером ТЭМП-2 составила 0,77 %.

Таблица 1

Аттестованное значение на стандартном образце	Единичные результаты замеров	Среднее значение	Ошибка, %
207	213, 209, 209, 194, 202	205,4	0,77

Заведующий лабораторией
металловедения ЦИЛ ИТЦ

Должность



Подпись

Багмет О.А.

Ф.И.О.

03.02.2012 г.

Дата



УТВЕРЖДАЮ:

Директор ИТЦ АО «ВМЗ»

П.П. Степанов

2018

АКТ ТЕХНИЧЕСКОГО ОПРОБОВАНИЯ

Комиссия в составе:

научного руководителя ИТЦ Л.И. Эфрона, начальника отдела по технологии производства труб большого диаметра М.А. Бубнова, начальника отдела по математическому моделированию О.С. Хлыбова составили настоящий акт о том, что аспирантом НИТУ «МИСиС» Товмасын М.А. были проведены комплексные исследования основных деформационных процессов при производстве труб большого диаметра по схеме JCOE и получены следующие научные результаты:

В программном комплексе DEFORM разработаны математические модели плоской деформации заготовки в процессах подгибки кромок, шаговой формовки, доформовки, сборки и экспандирования в линии ТЭСА 1420. Модель опробована при производстве опытных партий труб $\varnothing 813 \times 37,4/39/40,1$ мм и $1420 \times 15,7/21,6/25,8$ мм из сталей повышенной прочности. Это позволило:

— выявить причину дефектов в сварном шве и околошовной зоне трубы после экспандирования при производстве трубы $\varnothing 813 \times 39$ мм, заключающуюся в переформовке/недоформовке прикромочной зоны трубной заготовки;

— определить причину асимметрии после шаговой формовки $\varnothing 1420 \times 21,6$ мм и доформовки $\varnothing 813 \times 39/40,1$ мм, заключающуюся в особенностях принятой схемы деформирования заготовки на ПШФ и доформовочном прессе, а также вследствие неравномерности распределения механических свойств исходной заготовки;

— определить механизм коррекции возможного отклонения формы трубной заготовки в процессе сборки при производстве тонкостенных труб, в процессе доформовки при производстве толстостенных труб, а также при экспандировании трубы;

— определить распределение остаточных напряжений по периметру заготовки/готовой трубы и максимальное значение удельного усилия деформирования после каждого этапа деформационного процесса.

Опробована схема измерения геометрических параметров трубных заготовок с использованием неконтактных методов измерения, а именно система фотограмметрии AICON DPA и лазерного 3D-сканирования ZScanner 800,

Продолжение приложения В

позволившая определить координаты контура заготовки на всех этапах формоизменения и перевести физическую форму реально деформируемого изделия в цифровую, т. е. получить геометрическую модель торца трубной заготовки.

Для определения основных параметров формовки и подтверждения выводов, полученных в результате расчетов в DEFORM, проведено имитационное моделирование шаговой формовки полуцилиндров $\varnothing 160 \times 4$ и 85×4 мм на лабораторной машине MTS Landmark 250. Относительное отклонение результатов математического и физического моделирования не превышает 3%.

Комплексное исследование процессов позволит выявить и корректировать режимы формоизменения заготовки с учетом степени влияния основных технологических параметров на отклонение по геометрии трубной заготовки для повышения качества труб, а также снизить затраты на разработку технологии и производство опытных партий труб, сократив время на освоения новых видов продукции в условиях цеха.

Председатель комиссии:



Л.И. Эфрон

Члены комиссии:




М.А. Бубнов

О.С. Хлыбов