

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(национальный исследовательский университет)»
Политехнический институт
Факультет Материаловедения и металлургических технологий
Кафедра процессов и машин обработки металлов давлением

ПРОЕКТ ПРОВЕРЕН

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Рецензент

Заведующий кафедрой

_____ Л.В. Радионова

«_____» _____ 20__ г.

«_____» _____ 20__ г.

Тема работы: «Анализ качества и разработка рекомендаций по выбору режимов формовки трубной заготовки на базе компьютерного моделирования»

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ**

ЮУрГУ-22.04.02-2018-185-00.00.00 ПЗ

Руководитель работы:

_____ / Ф.С. Дубинский /

Автор работы:

_____ / Д.С. Григорьев /

студент группы П-244

АННОТАЦИЯ

Григорьев Д.С. Анализ качества и разработка рекомендаций по выбору режимов формовки трубной заготовки на базе компьютерного моделирования. - Челябинск: ЮУрГУ, 2018, 61 с. 21 ил., 7 табл., библиогр. список - 27 наим., 5 листов плакатов ф. А1.

Тема данной работы относится к технологии изготовления труб большого диаметра и направлена на решение проблемы возникновения геометрических отклонений в трубах после формовочных операций.

Целью данной работы является анализ влияния разности исходных механических свойств листового проката на геометрию получаемой трубной заготовки при помощи компьютерного моделирования.

В данной работе проанализированы основные промышленные способы производства стальных электросварных прямошовных труб большого диаметра.

Рассмотрено основное технологическое оборудование, применяемое на современных трубных заводах для формовки трубной заготовки из исходного листового проката.

Проанализированы основные требования потребителей к геометрии сварных труб большого диаметра.

Разобраны возможные виды дефектов труб большого диаметра.

Выполнена имитация процесса подгибки кромок исходного листового проката при помощи компьютерного моделирования в программном комплексе DEFORM.

На основании компьютерного моделирования приведены рекомендации по выбору режимов формовки трубной заготовки.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСВАРНЫХ ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА.....	9
1.1 Промышленные способы производства сварных труб большого диаметра.....	9
1.2 Основные требования к геометрии труб большого диаметра.....	14
1.3 Анализ возможных видов дефектов сварных труб большого диаметра.....	17
2 АНАЛИЗ ТИПОВОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА СВАРНЫХ ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА.....	27
2.1 Технологические операции участка подготовки листа.....	27
2.2 Технологические операции участка формовки.....	30
2.3 Технологические операции участка сварки.....	37
2.4 Технологические операции участка отделки.....	38
3 КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОДГИБКИ КРОМОК ИСХОДНОГО ЛИСТОВОГО ПРОКАТА.....	41
3.1 Введение системы допущений и упрощений.....	42
3.2 Разработка компьютерной модели процесса подгибки кромок листа.....	43
3.3 Результаты компьютерного моделирования.....	46
4 РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ВЫБОРУ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ПРОЦЕССОВ ФОРМОВКИ.....	53
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	57
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	58

ВВЕДЕНИЕ

Выгодное географическое расположение России, безмерные нефтяные и газовые залежи, сформированная за длительное время система нефтепроводов и газопроводов с выходом магистралей за рубеж делают ее основным игроком на рынке трубной промышленности.

Современные нефтегазопроводы это высоконагруженные стальные электросварные, преимущественно прямошовные, трубы, работающие в тяжелых условиях под действием высокого внутреннего давления и внешней агрессивной среды. Трудные геологические и климатические условия, высокие требования к надежности труб при эксплуатации предъявляют повышенные требования к их пластическим и прочностным характеристикам.

Требования к характеристикам сталей для труб большого диаметра (ТБД) совершенствуются по мере усложнения условий строительства магистральных трубопроводов [1-2]. К металлу современных сталей предъявляют внушительный перечень требований, зависящий от условий строительства и эксплуатации: химический состав; временное сопротивление; предел текучести; относительное удлинение; ударная вязкость на образцах с V-образным и U-образным надрезами; доля вязкой составляющей в изломе образцов ИПГ (DWTT); стойкость к водородному растрескиванию; стойкость к сероводородному растрескиванию под напряжением; требования к структуре и параметру трещиностойкости при сварке; величина критического раскрытия трещины CTOD и др. Повышение требований к трубным сталям за последнее время простимулировало металлургов и трубников к разработке более совершенных технологий получения сталей, которые позволяют, как производить стали высоких групп прочности и стали со специальными свойствами, так и эффективней и экономичней производить существующие виды сталей.

При этом необходимо отметить, что в настоящий момент, как для строительства новых магистральных трубопроводов, так и для капитального ремонта существующих газопроводных сетей применяют в большинстве случаев трубы, изготовленные из стали категории прочности К60 и К65. Листовой прокат из стали категории прочности выше К65 активно разрабатываются на ведущих металлургических заводах мира и в ближайшее время будет представлен на рынке сварных ТБД.

Повышение качества продукции, выпускаемой трубным заводом, выражается и в уменьшении уровня остаточных механических напряжений в готовой трубе, а также в обеспечении труб требуемыми геометрическими размерами после всех технологических операций.

Любой способ изготовления ТБД неизбежно связан с необходимостью упруго-пластического деформирования исходного листового проката и трубы в холодном состоянии на этапах получения трубной заготовки на формовочных прессах и экспандирования готовой трубы на прессе-расширителе.

Таким образом, каждая изготовленная труба имеет некий уровень остаточного напряженно-деформированного состояния, который в свою очередь влияет на геометрические показатели качества трубы: овальность поперечных сечений концов и тела трубы, отклонение тела трубы от номинальных диаметров, продольную кривизну тела трубы, а также прочие геометрические показатели.

Большое влияние на остаточное напряженно-деформированное состояние оказывают операции формовки трубной заготовки из листового проката. Многие показатели качества готовой продукции зависят от качества исполнения операций формовки.

В настоящее время главное отличие технологии производства стальных электросварных прямошовных ТБД заключается в способе получения трубной заготовки из листа. В промышленности используют три основных способа получения трубной заготовки:

1. Способ формовки листа в цилиндрическую заготовку на стане валковороликовой формы, непрерывном валковом стане, либо на вальцах;
2. Способ формовки листа в цилиндрическую заготовку на прессах, так называемый способ UO-образной формовки;
3. Способ формовки листа узким бойком, способ шаговой формовки, также известный как способ JCOE.

Из всех этих способ в последние годы на рынке производства сварных ТБД применяются трубы изготовленные с использованием процесса шаговой формовки. С применением данного способа возможно производство труб для строительства морских трубопроводов, таких как «Северный поток» и «Северный поток 2».

Основные потребители труб большого диаметра в России - компании топливно-энергетического комплекса, такие как Газпром и Транснефть. Потребность этих компаний в ТБД образуется за счет строительства крупных магистральных проектов, а также необходимостью ремонта существующих трубопроводов.

В настоящее время для обеспечения газовой и нефтяной промышленности отечественными ТБД, функционируют 5 крупных трубных заводов, на которые приходится около 85% всего объема выпуска данного вида продукции: Челябинский трубопрокатный завод, Выксунский металлургический завод, Волжский трубный завод, Ижорский трубный завод, Загорский трубный завод.

1 ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСВАРНЫХ ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА

1.1 Промышленные способы производства сварных труб большого диаметра

В настоящее время в промышленности распространены следующие виды стальных электросварных труб большого диаметра:

- одношовные прямошовные трубы;
- двухшовные прямошовные трубы;
- спиральношовные трубы.

Кроме распространенных конструкций электросварных труб довольно длительное время активно продвигалась разработка новых видов сварных труб, которые обладают уникальными свойствами. К этим разработкам можно отнести как технологию получения многослойных труб, так и изготовление труб с нестандартными геометрическими размерами [3-4]. Однако применение данных технологий по получению уникальных труб не получило широкого применения из-за дороговизны процесса изготовления. Поэтому в трубной промышленности применяются сварные трубы большого диаметра, изготовленные классическими способами.

В настоящее время для транспортировки углеводородов в мире используются сварные трубы большого диаметра в основном следующих типоразмеров:

- прямошовные трубы диаметром от 508 до 1420 мм с толщиной стенки от 7 до 45 мм и длиной от 12 до 18 м;
- спиральношовные трубы диаметром от 529 до 2500 мм с толщиной стенки от 3 до 25 мм и длиной от 12 до 24 м.

При этом для изготовления труб применяется преимущественно автоматическая сварка под слоем керамического флюса, которая обеспечивает высокие механические свойства сварного шва трубы.

Различают следующие способы изготовления стальных труб большого диаметра, сваренных дуговой электрической сваркой под слоем керамического флюса [5]:

- из одного листа с формовкой заготовок по схеме УО;
- из двух полуцилиндров с формовкой полуцилиндров по схеме УО;
- из одного листа с помощью формовки в вальцах;
- из одного листа методом шаговой формовки по схеме JSOE;
- из листов, гибка которых выполняется в непрерывном трубоформовочном стане;
- из листов определенной длины с помощью формовки и сварки спирального шва.

В настоящее время на ведущих заводах и компаниях Российской Федерации внедрены и освоены все выше перечисленные способы производства сварных ТБД.

Наибольшую же популярность в отечественной практике производства сварных труб получили прямошовные трубы. Способы формовки трубной заготовки для прямошовных сварных труб представлены на рисунке 1.

При производстве сварных труб, за исключением способа изготовления труб с помощью формовки в вальцах, первой формовочной операцией является подгибка кромок листа. Операция подгибки кромок в случае формовки трубы в вальцах может выполняться либо до формовки, либо сразу же после нее.

Процесс подгибки кромок необходим для придания заготовке необходимого радиуса на расстоянии до 350 мм от края продольных кромок [6]. В настоящее время известны два способа подгибки кромок листа: с помощью прессы и профильных роликов.

При подгибке кромок с помощью профильных роликов лист проходит через одну или несколько пар роликов. При этом в начале и в конце листа кромки деформируются не до конца, что приводит впоследствии к геометрическим несовершенствам заготовки. Эти несовершенства могут

послужить причиной возникновения различных дефектов при сварке. Именно поэтому трубные заводы отдают свое предпочтение способу подгибки кромок на прессе.

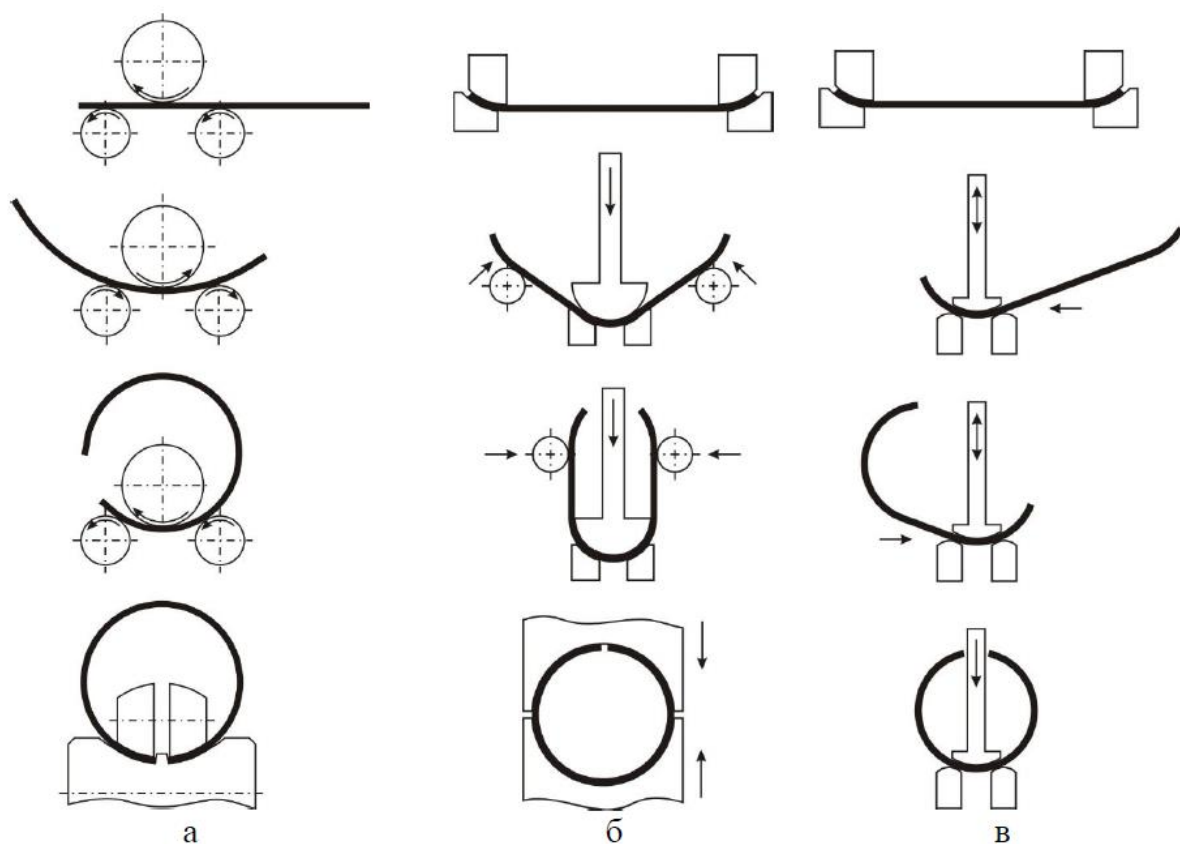


Рисунок 1 – Способы формовки трубной заготовки для прямошовных сварных труб большого диаметра:

а – формовка на вальцах; б – формовка на прессах; в – шаговая формовка.

При подгибке кромок листа с помощью гидравлического пресса у обеих кромок листа одновременно в штампе с профилем, выполненным по эвольвенте, формируется кривизна необходимого радиуса. Использование гидравлических прессов обеспечивает более высокое качество подгибки кромок из-за равномерной их деформации [6].

Расчету технологических параметров таких прессов и воздействию настроечных параметров на получаемую геометрию подогнутой кромки посвящено множество научных трудов [7-8].

После подгибки кромок формовку основной части листа производят с помощью двух прессов (предварительной и окончательной формовки), формовки в вальцах или же с использованием процесса шаговой формовки.

При формовке трубы с помощью прессов предварительной и окончательной формовки лист с подогнутыми кромками подается на гидравлический пресс предварительной формовки, где ему придается U-образная форма, при этом боковые стороны заготовки становятся параллельными между собой, а радиусгиба соответствует радиусу готовой трубы [9-10].

На втором прессе, в зависимости от используемой оснастки, возможно получать полуцилиндры или трубные заготовки. При этом радиус верхнего и нижнего инструмента соответствует радиусу получаемой заготовки, а длина инструментов соответствует длине готовой трубы.

Научные труды по данному виду формовки представлены в работах Кондратова Л.А., Чечулина Ю.Б., Матвеева Ю.М. и других [11-13].

В настоящее время в России данный способ формовки труб используется на Челябинском трубопрокатном заводе, где располагаются две линии с прессами UO-образной формовки (линия ТЭСА «530-820» для производства сварных ТБД с одним швом и линия ТЭСА «1020-1220» для производства труб из двух полуцилиндров), а также на Выксунском металлургическом заводе в линии ТЭСА «1020», где изготавливают трубы с одним и двумя швами.

Формовка трубной заготовки в вальцах заключается в изгибе листа между тремя валками. Расположение верхнего валка относительно нижних определяет диаметр формируемой трубной заготовки, а диаметра верхнего валка предопределяет минимальный диаметр формируемой заготовки. Лист деформируется в вальцах последовательно в несколько проходов до получения требуемой геометрии.

Однако при формовке листа в вальцах невозможно обеспечить идеальную геометрическую форму заготовки, так как края листа остаются

прямолинейными. Для улучшения геометрии трубной заготовки прямые участки на концах листа догибаются до необходимого диаметра на валковом формовочном стане.

В России такой способ формовки стальных электросварных прямошовных труб используется на Волжском трубном заводе в линии ТЭСА «530-1420».

В настоящее время большой популярностью пользуются сварные трубы большого диаметра, изготовленные с использованием процесса шаговой формовки. В России данным методом производства труб пользуются на Челябинском трубопрокатном заводе (в линии ТЭСА «530-1420»), Выксунском металлургическом заводе (в линии ТЭСА «1420»), а также на Ижорском трубном заводе (в линии ТЭСА «530-1420»).

Активно используемый в настоящее время процесс шаговой формовки выполняется следующим образом. После получения на кромкогибочном гидравлическом прессе листа с подогнутыми кромками его устанавливают специальными манипуляторами в положение гибки на прессе шаговой формовки и подвергают процессу шаговой формовки по всей длине плоской части листа с помощью пуансона, размеры которого выбираются в соответствии с сортаментом получаемой трубы.

На первом шаге лист загибается 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 противоположной стороны листа, после которой листовая заготовка получает С-образный профиль и на последнем формовочном шаге по центру листовой заготовки – О-образный профиль сформованной трубы с открытым швом, при этом трубная заготовка имеет достаточно круглую геометрическую форму с плоскопараллельными кромками.

Получение трубной заготовки способом шаговой формовки отличается особенной гибкостью в отношении сортамента формуемых трубных заготовок как по диаметру, так и по толщине стенки.

Главным поставщиком прессового оборудования для изготовления стальных электросварных прямошовных ТБД по схеме JCOE, предназначенных для магистральных газопроводов, является немецкая фирма «SMS Meer».

С использованием такого способа формовки трубной заготовки возможно производство труб для строительства морских трубопроводов.

Теория процесса шаговой формовки отражена в научных работах: Шинкина В.Н., Галкина В.В., Самусева С.В. и других [14-16].

В зависимости от сортамента формуемых труб выбирается количество шагов. Оптимальный выбор количества шагов при шаговой формовке предложен в научной работе Шинкина В.Н. [17]. По результатам его исследования, если выполнять количество шагов меньше расчетного значения, то между формуемыми шагами неминуемо будут образовываться недопустимые прямолинейные участки.

Так как исходные механические свойства листового проката имеют некоторые расхождения, то необходимо регулировать ход пуансона на каждом его шаге для получения необходимой геометрии трубной заготовки. Неверный выбор хода верхнего рабочего инструмента на следующем шаге может привести к дефектам геометрии формуемой трубной заготовки. Решение данной проблемы было предложено с помощью измерения получаемого радиуса трубной заготовки в момент ее формовки и последующей корректировки хода верхнего рабочего инструмента при последующем шаге в режиме реального времени [18].

1.2 Основные требования к геометрии труб большого диаметра

Трубы большого диаметра, используемые при транспортировке нефти и газа, относятся к опасным техногенным объектам. Из-за возможности их аварии и нанесения ущерба населению, инженерным сооружениям и природе

к ним предъявляют повышенные требования по обеспечению надежности и безопасности при эксплуатации.

Главную роль в обеспечении безотказной работы трубопровода в течение установленного срока службы играют прочностные, пластические и геометрические параметры трубы.

Так, опыт строительства и эксплуатации трубопроводов в условиях Севера показал, что для обеспечения надежной работы трубопроводов надо применять трубы со следующими механическими свойствами: $\sigma_{\text{в}} \geq 500$ МПа, $\sigma_{\text{т}} \geq 300$ МПа, $\delta \geq 16$ % [1-2]. Металл трубы должен иметь достаточное сопротивление зарождению трещины и распространению лавинной трещины. Материал трубы должен хорошо свариваться дуговой контактной сваркой при низких температурах.

Особые требования устанавливаются к трубам, изготавливаемым для морских участков. Так для проекта «Северный поток 2» труба должна обладать следующими механическими свойствами: $\sigma_{\text{в}} \geq 570$ МПа, $\sigma_{\text{т}} \geq 485$ МПа, $\delta \geq 17$ % [1-2].

При изготовлении электросварных труб большого диаметра к ним предъявляют большое количество геометрических требований, которые определяют состав и мощность строительной техники, а также влияют на качество монтажно-сварочных работ.

К геометрическим требованиям относятся [1-2]:

- отклонение номинального внутреннего диаметра концов трубы не должно превышать 1 мм;
- отклонение номинального диаметра тела трубы не должно превышать 3 мм;
- овальность концов трубы не должна превышать 0,5 % от номинального диаметра;
- отклонение от теоретической окружности в зоне разделки под сварку шва не должно превышать 0,13 % от диаметра трубы;

— отклонение от прямолинейности тела трубы вдоль всей ее длины не должно превышать 0,1 % от длины трубы.

Также необходимо обеспечить перпендикулярность концов труб, требуемые геометрические параметры сварных швов, отсутствие металлургических дефектов на теле трубы и т.д.

Следует отметить, что текущие требования к прочностным, пластическим и геометрическим параметрам основываются на требованиях предъявляемых потребителями трубной продукции. Так как главными потребителями сварных труб большого диаметра являются компании топливно-энергетического комплекса, которые постоянно стремятся увеличить количество освоенных месторождений углеводородов, то и требования к вышеуказанным параметрам непрерывно растут.

Реализация новых проектов таких, как, например, газопровод «Северный поток 2», предполагает прокладку трубопроводов по дну Балтийского моря, где существует необходимость учитывать воздействие морской воды и высокого давления на трубопроводы. Другой газопровод «Сила Сибири» предполагает проведение трубопроводов в зонах тектонической активности, что также увеличивает потребность в высоких механических свойствах трубопроводов.

В настоящее время одним из главных направлений по увеличению механических свойств труб является повышение их группы прочности на стадии производства листового проката путем высокоточного регулирования параметров контролируемой прокатки и ускоренного охлаждения [19]. Из-за того, что магистральные трубопроводы все чаще сооружают в регионах с неблагоприятным климатом, и трубы для них должны обладать достаточно высокой деформационной способностью, что исключало бы локальную потерю устойчивости и разрушение кольцевых сварных швов при деформации из-за смещения грунта, активно продвигается разработка труб класса прочности X100 и X120. Однако все текущие трубопроводы строят с использованием труб большого диаметра класса прочности K65 (X80).

1.3 Анализ возможных видов дефектов сварных труб большого диаметра

Одним из основных требований к производству сварных труб является обеспечение высокого качества готовой продукции. При оценке качества трубной заготовки и труб существенное внимание уделяется дефектам.

Под дефектами понимаются отклонения качественных показателей от допустимых по назначению и спецификации величин (ГОСТ, СНиП, ТУ, и др.).

В данной работе были рассмотрены наиболее часто встречающиеся в трубоэлектросварочном цехе «Высота 239» ПАО «ЧТПЗ» дефекты сварных труб.

Дефекты стальных электросварных ТБД по технологическим признакам можно разделить на 4 группы [20]:

1 группа – поверхностные и внутренние дефекты металлургического происхождения в основном металле сварных труб: закаты, следы коррозии, расслоения, раковины, плены, трещины;

2 группа – линейно-протяженные поверхностные дефекты механического происхождения на стенках труб: царапины, задиры, риски, вмятины;

3 группа – геометрические дефекты в трубах: отклонения по диаметру, толщине стенки, прямолинейности, овальности, смещению свариваемых кромок, размерам сварного шва;

4 группа – поверхностные и внутренние дефекты технологического происхождения в сварном соединении труб: трещины, непровары, подрезы, поры, шлаковые включения, утонения, свищи.

Классификация дефектов первой группы и возможные причины их возникновения представлены в таблице 1. Более подробно причины возникновения металлургических дефектов изложены в научных трудах Правосудович В.В. [21].

Таблица 1 – Дефекты металлургического происхождения


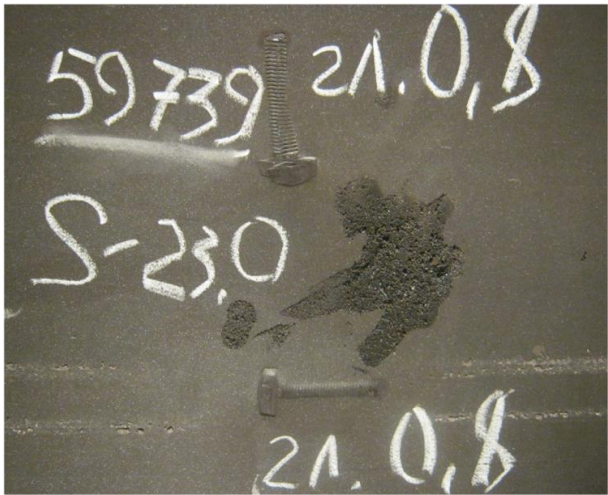
№	Изображение дефекта	Причина образования
1	<p data-bbox="300 293 392 322">Закат</p> 	<p data-bbox="946 293 1471 454">Закаты являются следствием износа прокатных валков завода изготовителя листа.</p>
2	<p data-bbox="300 871 568 900">Следы коррозии</p> 	<p data-bbox="946 871 1471 1223">Дефект характерен для металла зарубежного поставщика (Япония, Корея, Германия) из-за морской транспортировки. Глубина дефекта обычно 0,2–0,4 мм.</p>
3	<p data-bbox="300 1449 488 1478">Расслоение</p> 	<p data-bbox="946 1449 1471 1935">Трещина на кромках и торцах листов и других видов проката, образующаяся при наличии в металле усадочных дефектов, внутренних разрывов, повышенной загрязненности неметаллическими включениями и при прожоге.</p>

Окончание таблицы 1

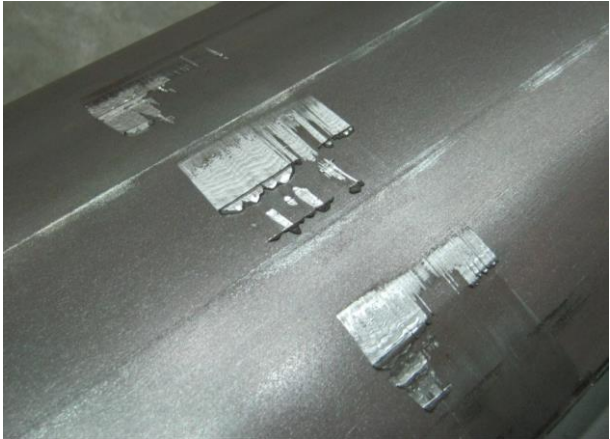


№	Изображение дефекта	Причина образования
4	<p data-bbox="300 286 464 320">Раковины</p> 	<p data-bbox="946 286 1474 645">Дефект поверхности в виде одиночного или группового углубления, образовавшегося при выпадении вкатанной инородной частицы, может располагаться вдоль направления прокатки.</p>
5	<p data-bbox="300 866 413 900">Плены</p> 	<p data-bbox="946 866 1474 1415">Дефект поверхности, представляющий собой отслоение металла языкообразной или неправильной формы, соединенное с основным металлом одной стороной, явившийся следствием раскатки дефектов сляба (трещин, пузырей) или следов его грубой зачистки.</p>
6	<p data-bbox="300 1447 448 1480">Трещина</p> 	<p data-bbox="946 1447 1474 1805">Дефект поверхности, представляющий собой разрыв металла, образовавшийся при раскатке (расковке) продольной или поперечной трещины слитка или литой заготовки.</p>

Дефекты по второй группе, именуемые также дефектами внутрицехового происхождения, могут быть образованы как на заводе производителя листового проката, так и в самом трубоэлектросварочном цехе в процессе изготовления трубы. Данный вид дефектов может быть удален механическим способом или отрезкой участка трубы с дефектом. Дефекты внутрицехового происхождения представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Дефекты внутрицехового происхождения

№	Изображение дефекта	Причина образования
1	<p data-bbox="300 674 927 775">Вдав от стружки на кромкофрезерной установке</p> 	<p data-bbox="943 674 1473 1025">Вдав от стружки, проволоки по внутренней и наружной стороне листа образуется из-за попадания стружки и проволоки в зону действия копирующих роликов.</p>
2	<p data-bbox="300 1312 927 1480">Вдавы от посторонних предметов на листе, образованные на прессе подгибки кромок</p> 	<p data-bbox="943 1312 1473 1738">Дефект образуется в зоне действия инструмента при наличии на листе посторонних предметов (стружка, проволока, дробь). Дефект повторяется через каждые 3,5 – 4 метра (шаг пресса).</p>

Продолжение таблицы 2

№	Изображение дефекта	Причина образования
3	<p>Задир от манипуляторов на прессе шаговой формовки</p> 	<p>В случае сбоя работы автоматики на ПШФ либо износа накладок возможны образования задиров от манипуляторов.</p>
4	<p>Вдав от выводных роликов пресса шаговой формовки</p> 	<p>В случае повреждения выводных роликов при выводе трубы из пресса возможно образование вдавов на противоположной шву стороне трубы. Протяженность дефекта от 2 до 8 метров. Дефект имеет глубину от 0,1 до 0,6 мм.</p>
5	<p>Задир от роликовых балок сборочной клетки на сборочно-сварочном стане</p>  <p style="color: red; text-align: center;">Сварочный шов</p>	<p>В случае выхода некачественной заготовки с пресса шаговой формовки либо сбоя в работе сборочно-сварочной клетки возможно образование задиров от роликовых балок сборочно-сварочной клетки. Дефект вытянут параллельно сварному шву на расстоянии около 50 мм.</p>

Окончание таблицы 2

№	Изображение дефекта	Причина образования
6	<p data-bbox="304 286 925 387">Вдав от шлаковой корки при экспандировании</p> 	<p data-bbox="951 286 1471 707">Дефект образуется при экспандировании трубы, в случае если на внутренней поверхности трубы есть остатки шлаковой корки. Дефект повторяется через каждые 650 – 900 мм (шаг экспандера).</p>

Геометрические дефекты в трубах обусловлены наличием в них некоего уровня остаточного напряженно-деформированного состояния после упруго-пластической деформации исходного листового проката на этапах формовки трубной заготовки. Помимо этого, причиной геометрических отклонений в трубах является разность исходных механических свойств листового проката. Таким образом, геометрические отклонения в трубах закладываются еще на этапе формовки трубных заготовок.

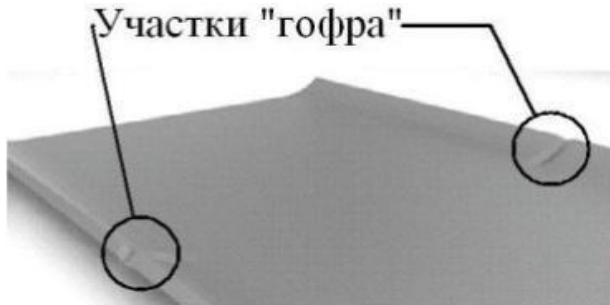
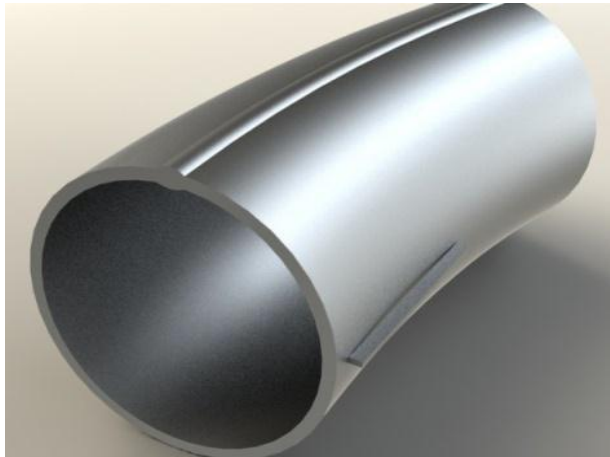
Главными геометрическими показателями качества трубных заготовок являются [5]:

1. Отсутствие плоских участков вдоль кромок;
2. Прямолинейность и параллельность кромок;
3. Постоянство периметров на длине заготовки;
4. Отсутствие резких изломов профиля заготовки.

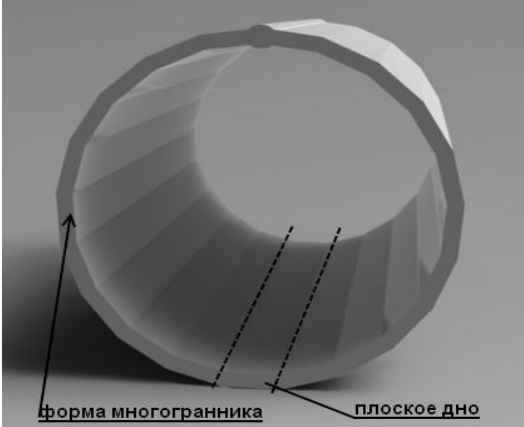
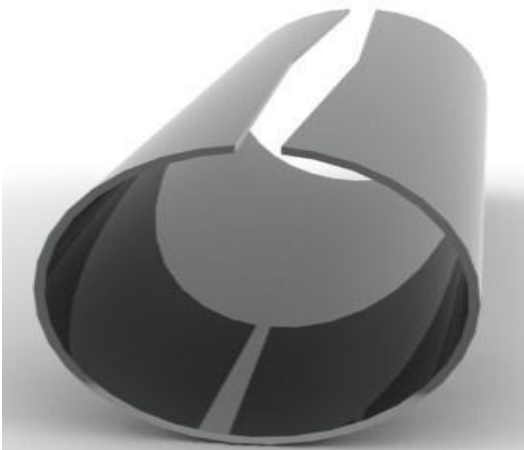

Обеспечение вышеуказанных показателей гарантирует положительное влияние на качество выполнения технологических операций на участках сварки и отделки труб. Следовательно, учитывание исходных механических свойств листового проката, а также выбор оптимальной технологии и

оборудования для осуществления процесса формовки трубной заготовки является решающим условием получения высококачественной готовой продукции. Основные геометрические дефекты труб представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Геометрические дефекты труб большого диаметра

Геометрические дефекты трубы		
№	Изображение дефекта	Причина образования
1	<p>Разная высота подгибки кромок</p> 	<p>Дефект образуется в связи с разбросом исходных механических свойств у листового проката, а также из-за возможного смещения листа перед началом процесса подгибки кромок на кромкогибочном гидравлическом прессе.</p>
2	<p>Гофрообразование кромки</p> 	<p>Дефект образуется в результате подгибки кромок на гидравлическом прессе «внахлест» между шагами.</p>
3	<p>Продольная кривизна трубы</p> 	<p>Данный дефект образуется в результате нарушения синхронной работы всех манипуляторов, расположенных вдоль листа, при котором подача шагов у каждого манипулятора осуществляется на разные величины.</p>

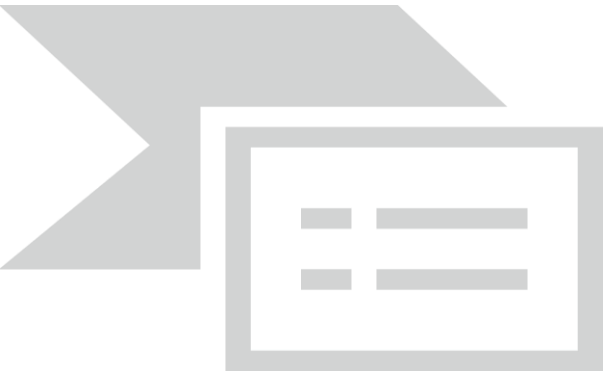

Окончание таблицы 3

№	Изображение дефекта	Причина образования
4	<p>Многогранная форма трубы с плоским дном</p> 	<p>Дефект возможен из-за разброса исходных механических свойств листа, неправильно подобранного количества шагов процесса шаговой формовки, а также нарушения работы манипуляторов (подача шагов не по разметке).</p>
5	<p>Различный зазор между кромками</p> 	<p>Данный вид дефекта характерен при чрезмерно интенсивной подгибке кромок на гидравлическом прессе, когда возможна их частичная вытяжка (удлинение по сравнению с остальной частью продольных кромок листа).</p>
6	<p>Овальность трубы</p> 	<p>Дефект возможен из-за разброса исходных механических свойств листа, неправильно подобранных режимов шаговой формовки, нарушения работы манипуляторов (подача шагов не по разметке), а также возможной овализации трубной заготовки в сборочно-сварочном стане.</p>

Сварка стальных прямошовных труб большого диаметра выполняется преимущественно способом многодуговой сварки под керамическим флюсом [22]. При этом вносимая в место сварки погонная энергия, зависящая от силы тока и напряжения дуги, а также от скорости перемещения дуги вдоль разделки, определяет получаемые механические свойства сварного соединения: прочность, пластичность, ударную вязкость металла шва и прилегающей зоны термического влияния.

Неверно выбранные режимы сварки, настройки сварочного оборудования, а также плохая подготовка сварочных материалов и поверхности разделки приводят к появлению различных недопустимых дефектов в сварном соединении: шлаковых включений, пор, непроваров, подрезов, трещин, повышению деформаций и напряжений в сварном соединении. Помимо дефектов, располагаемых в сварном соединении труб, процесс сварки трубы может привести к изменению геометрии трубы, а именно к появлению недопустимого значения по прямолинейности. Основные виды дефектов в сварном соединении ТБД представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Дефекты в сварном соединении труб

1	<p>Горячая трещина</p> 	<p>К причинам образования горячих трещин относится сегрегация таких элементов как сера, фосфор, кислород или различных окислов.</p>
2	<p>Свищ</p> 	<p>Причиной развития свища чаще всего является некачественная подготовка поверхности и присадочной проволоки под сварку.</p>

Окончание таблицы 4

№	Изображение дефекта	Причина образования
3	<p>Подрез</p> 	<p>Появляются из-за излишне большой силы сварочного тока и из-за большой длины электрической дуги.ё</p>
4	<p>Прожог</p> 	<p>Образуется при излишне большой силе сварочного тока и при малых скоростях сварки, а также при недостаточном при-туплении кромок.</p>
5	<p>Шлаковые включения</p> 	<p>Причиной образования является наличие загрязнений на сварочных кромках (ржавчины, шлака), слишком маленькая сила тока и излишне большая скорость сварки.</p>

2 АНАЛИЗ ТИПОВОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА СВАРНЫХ ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА

Рассмотрим технологический процесс производства стальных электросварных прямошовных ТБД современного цеха «Высота 239» ПАО «ЧТПЗ» с производительностью до 600 тыс. тонн/год. Данный цех был запущен в эксплуатацию в 2010 году и может производить стальные трубы диаметром от 508 до 1420 мм с толщиной стенки от 8 до 48 мм.

На рисунке 2 представлена общая схема производства труб диаметром от 508 до 1420 мм в ТЭСЦ «Высота 239» ПАО «ЧТПЗ».

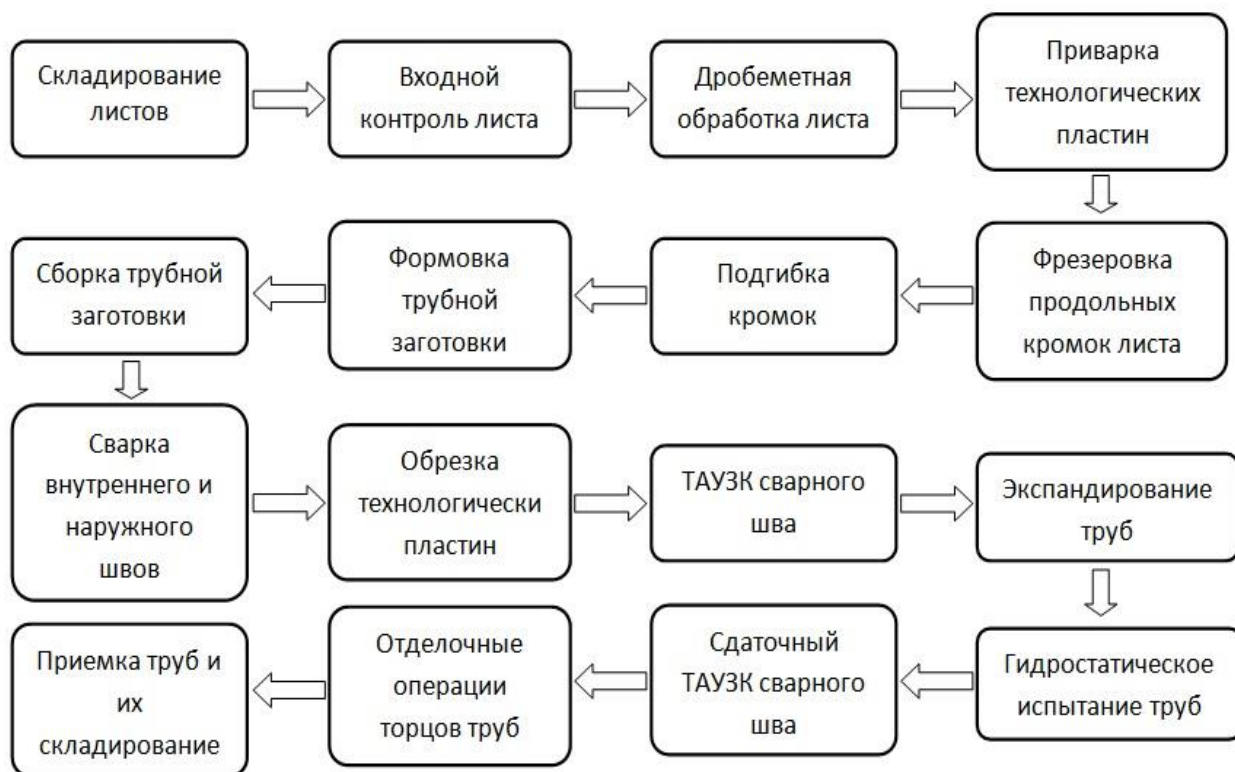


Рисунок 2 - Технологический процесс производства ТБД в ТЭСЦ «Высота 239» ПАО «ЧТПЗ»

2.1 Технологические операции участка подготовки листа

Со склада листов мостовым краном лист подают на кантователь, где производится обязательный входной контроль листового проката.

Под входным контролем качества продукции следует понимать контроль качества продукции поставщика, поступившей к потребителю и предназначенной для дальнейшего ее использования.

Основными показателями качества листовой стали являются: химический состав; структура металла; основные и технологические свойства; геометрические размеры и качество поверхности листов. Листовая сталь должна поставляться термообработанной, с допускаемыми отклонениями номинальных размеров по ГОСТ 19903, прошедшей 100% ультразвуковой контроль поверхности на сплошность на заводе-изготовителе, а также соответствовать требованиям технических условий или стандартов.

Первым этапом проверки является проверка сопроводительных документов, удостоверяющих качество продукции. При соответствии установленным требованиям листовая сталь, прошедшая контроль по сертификатным данным проходит дальнейший контроль качества поверхности, ее геометрических размеров (ширина, длина, толщина, серповидность) и маркировки. Трубные заготовки, прошедшие все этапы контроля качества, задаются в производство.

Задача листа осуществляется на участке ввода листа на линию мостовым краном. После этого листы снова подвергаются контролю геометрии, но уже автоматизированному. При соответствии геометрических параметров, листовой прокат, прошедший контроль, направляют для прохождения дальнейших технологических операций.

Следующая операция предназначена для очистки поверхности листа. Лист попадает в закрытую камеру, где выполняют дробеструйную очистку листа от загрязнений, посторонних предметов, а также отслаивающейся окалины. При этом используется чугунная дробь с острыми краями. Ее добавляют в струю с сжатым воздухом, которая с силой выбрасывается через сопло на обрабатываемую поверхность листа и очищает ее.

После дробеструйной очистки поверхность листа осматривают на возможные раскрытые дефекты металлургического происхождения и наносят автоматическим способом маркировку с номером будущей трубы. Далее лист направляют на участок по приварке технологических пластин к продольным кромкам в конце и начале листа.

Приварку пластин выполняют четыре робота-манипулятора с помощью полуавтоматической сварки в защитных газах. Лист по входному рольгангу поступает на станцию приварки пластин. После того, как лист занимает требуемое положение, прижимное устройство выполняет его фиксацию с входной стороны. Два робота-манипулятора извлекают технологические пластины из кассет, производят их центровку, перемещают к листу и фиксируют в положении, в котором будут выполнять сварку. Два сварочных робота начинают приварку пластин к листу с входной стороны. По окончании процесса сварки сварочный робот перемещается в исходную позицию. Прижимное устройство поднимают вверх, лист с помощью промежуточного рольганга транспортируют в положение для приварки пластин с выходной стороны и повторяют процедуру. После приварки технологических планок лист по отводящему рольгангу перемещают на кромкофрезерную установку (КФУ).

На кромкофрезерной установке осуществляется подготовка продольных кромок листа под сварку. В качестве металлорежущего инструмента применяются специальные дисковые фрезы. Параметры получаемой геометрии продольных кромок приведены на рисунке 3.

Ширина листов после обработки продольных кромок под сварку зависит главным образом от заданного коэффициента экспандирования трубы на участке отделки. Поэтому допускаемое отклонение по ширине листа после обработки составляет $\pm 1,0$ мм. На кромках листа после фрезерования не допускается наличие необработанных участков (черноты), заусенцев, вмятин (раковин), задиров, величиной, выводящей толщину листа за минимальные размеры.

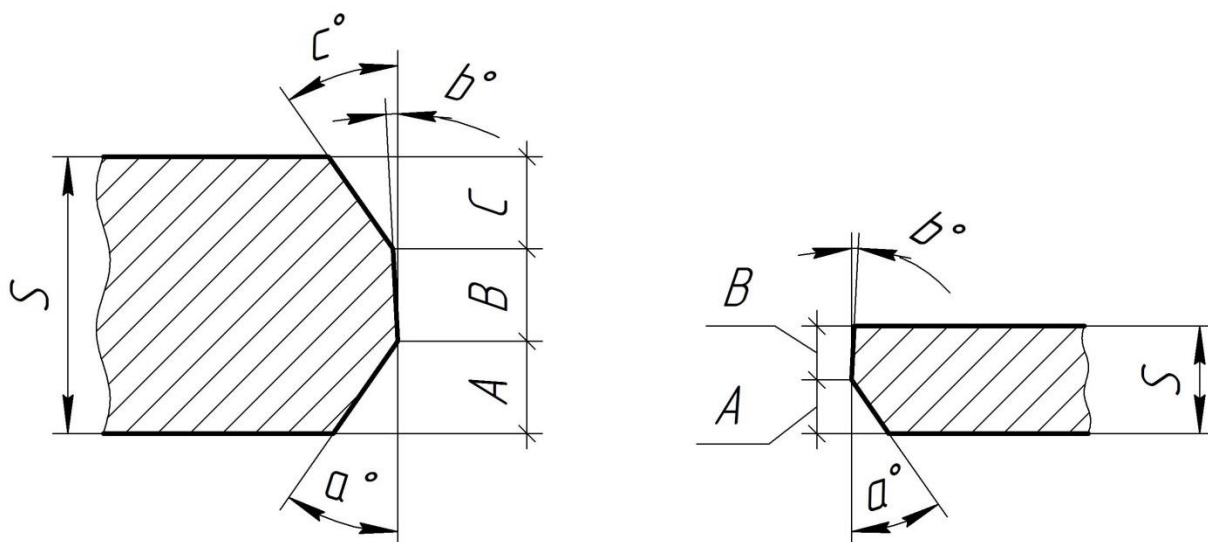


Рисунок 3 – Профиль продольных кромок листа после КФУ (слева для труб с толщиной стенки >14 мм, справа для труб с толщиной стенки ≤ 14 мм) где $A, B, C, S, a^\circ, b^\circ, c^\circ$ - геометрические параметры профиля продольных кромок.

2.2 Технологические операции участка формовки

Фрезерованные листы поступают на кромкогибочный пресс. Общий вид пресса представлен на рисунке 4. Процесс подгибки кромок листа является неотъемлемой частью технологического процесса пошаговой формовки при производстве электросварных прямошовных труб большого диаметра. Он обеспечивает требуемую геометрию трубной заготовки в околошовной зоне по всей длине. Процесс выполняется методом формовки листа на специальном оборудовании – кромкогибочном прессе с использованием штампа с профилем, выполненным по эвольвенте. Пресс развивает достаточное усилие, необходимое для пластического деформирования металла листа и сохранения в дальнейшем формы кромки листа, заданной профилем инструмента.



Рисунок 4 - Общий вид пресса подгибки кромок

На рисунке 5 представлены этапы процесса подгибки кромок на кромкогибочном прессе.

Технология подгибки кромок листового проката заключается в следующем: после установки листа в исходное положение для проведения подгибки система управления запускает рабочий цикл пресса (см. рисунок 5 - А). При этом на левом и правом гибочном блоке одновременно происходит подъём рабочими гидроцилиндрами зажимных и гибочных балок, синхронно с ними подъемные ролики поднимают лист. Подъем листа продолжается до тех пор, пока зажимная балка не подведет его к верхней прижимной неподвижной балке (см. рисунок 5 - Б). Далее, зажимные траверсы создают необходимое для зажатия усилие, и гидросистема пресса поддерживает это усилие до окончания гибки. После достижения необходимого давления зажимными траверсами рабочие цилиндры продолжают перемещать нижние гибочные балки дальше вверх, при этом происходит процесс отгибания листа нижним инструментом по контуру верхнего инструмента. Формовка продолжается до тех пор, пока усилие гибки не достигает установленного в технологической карте значения (см. рисунок 5 - В). Гидросистема выдерживает давление на протяжении определенного времени и затем разгружает нижние гибочные балки, опуская их в начальное положение.

После этого гидросистема производит разгрузку зажимных балок, опуская их в исходное положение (см. рисунок 5 - Г). Подъемные ролики синхронно с балками опускают лист на уровень подводящего и отводящего рольгангов. После этого лист перемещается на следующий шаг отгибания. Цикл гибки повторяется пока лист не будет подогнут по всей длине.

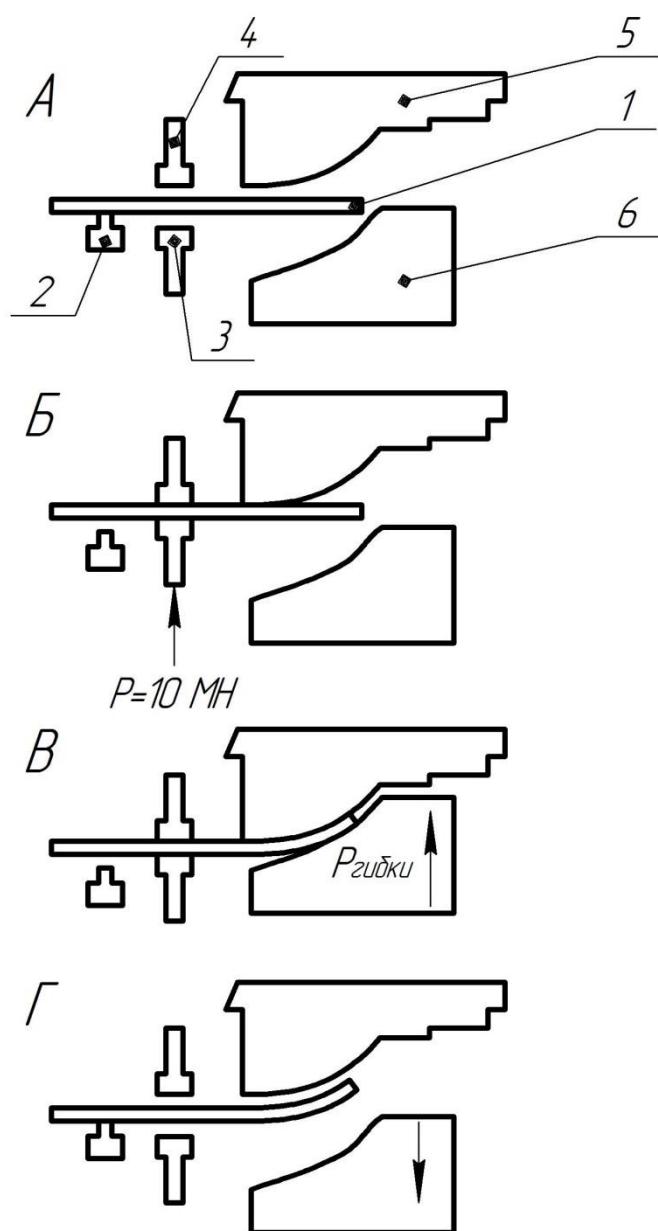


Рисунок 5 - Этапы процесса подгибки кромки на кромкогибочном прессе:
 1 – лист; 2 – рольганг; 3 – подвижная зажимная траверса; 4 – неподвижная траверса; 5 – верхний рабочий инструмент; 6 – нижний рабочий инструмент

В таблице 5 представлены технические характеристики кромкогибочного пресса.

Таблица 5 – Технические характеристики кромкогибочного пресса

Параметр	Величина
Усилие пресса (на один блок), МН	40
Зажимное усилие, МН	10
Рабочее давление, бар	max 315
Ход гибочной балки, мм	max 300
Ход зажимной балки, мм	max 160
Длина отгиба, мм	4,500
Перемещение правого пресса, мм	2,560
Перемещение левого пресса, мм	2,560
Скорость гибки, мм/с	4,5 (при максимальном усилии пресса)
	11 (при минимальном усилии пресса)

Формовку листовой заготовки для получения заданного профиля трубы производят на трубоформовочном прессе шаговой формовки, который изображен на рисунке 6.



Рисунок 6 – Общий вид пресса шаговой формовки труб

На рисунке 7 представлены этапы процесса шаговой формовки на трубоформовочном прессе.

Гибка исходной заготовки производится по всей длине плоской части листа последовательными шагами от подогнутых кромок к середине сначала с одной стороны (см. рисунок 7 – А), затем с другой стороны листа (см. рисунок 7 – Б). Последний шаг гибки пресс выполняет всегда точно посередине заготовки (см. рисунок 7 – В).

При этом формируется полуцилиндр на одной стороне листа, затем формируется полуцилиндр на противоположной стороне листа. Специальные манипуляторы перемещают лист на всех шагах формовки.

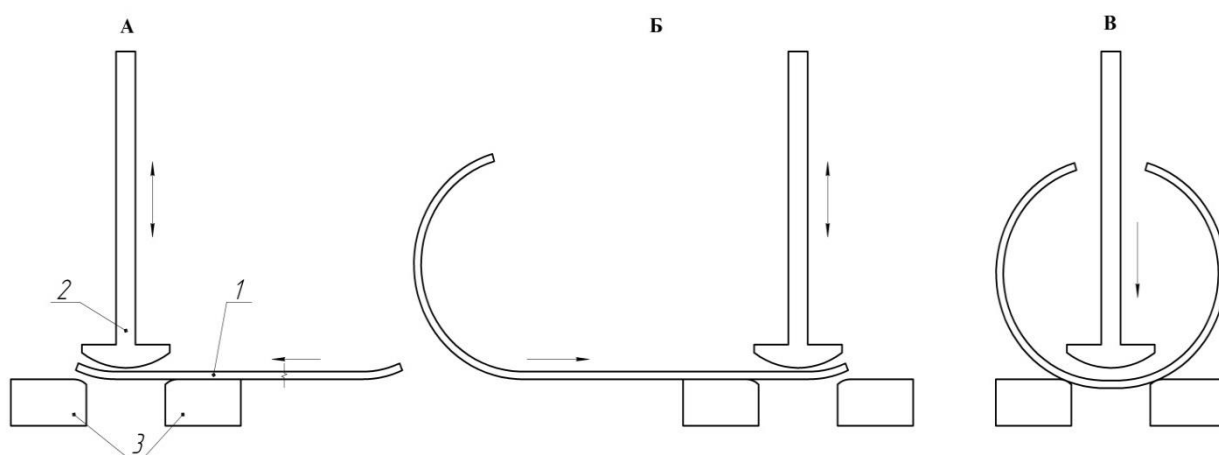


Рисунок 7 – Этапы процесса шаговой формовки:

1 – заготовка; 2 – верхний рабочий инструмент (пуансон); 3 – нижние рабочие инструменты (бойки)

Настройку пресса шаговой формовки выполняет оператор в зависимости от типоразмера трубы и механических характеристик исходной заготовки. В процессе настройки оборудования пресса шаговой формовки учитывают основные технические параметры:

- расстояние между опорами нижнего инструмента;
- величины хода пуансона;
- типоразмер пуансона;
- величины шагов подачи листа;

- количество шагов;
- положение нулевой линии в вершине опор нижнего инструмента.

Расстояние между бойками регулируют промежуточными пластинами.

Верхний инструмент подбирают на заданный диапазон типоразмеров труб. Широкий диапазон изменения различных параметров очага деформации позволяет с помощью однорадиусного инструмента получать диапазон типоразмеров труб.

Технические характеристики прессы шаговой формовки представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Техническая характеристика прессы шаговой формовки

Параметр		Величина
Погонное усилие формовки, МН/м	max	5,2
при рабочей длине 19,0 м, МН	max	100,0
при рабочей длине 12,5 м, МН	max	65,0
Рабочее давление, бар	max	315
Давление цилиндра прессования, бар	max	280
Ход гибочной балки, мм	max	360
Диаметр трубы, мм	min	508,0
	max	1422,0

Полученные трубные заготовки выборочно контролируют на участке контроля трубных заготовок, находящемся по технологической цепочке после прессы шаговой формовки труб. Затем сформованная трубная заготовка по отводящему рольгангу передается на сборочно-сварочный стан. Клеть сборочно-сварочного стана изображена на рисунке 8.

Главной целью сборочно-сварочного стана является сборка кромок и сварка прихваточного шва под заданный профиль готовой трубы. Задачами в сборочно-сварочном стане являются обеспечение заданной геометрии трубной заготовки в калибре под требуемый угол схождения кромок,

устранение зазора между кромками с последующей технологической сваркой.

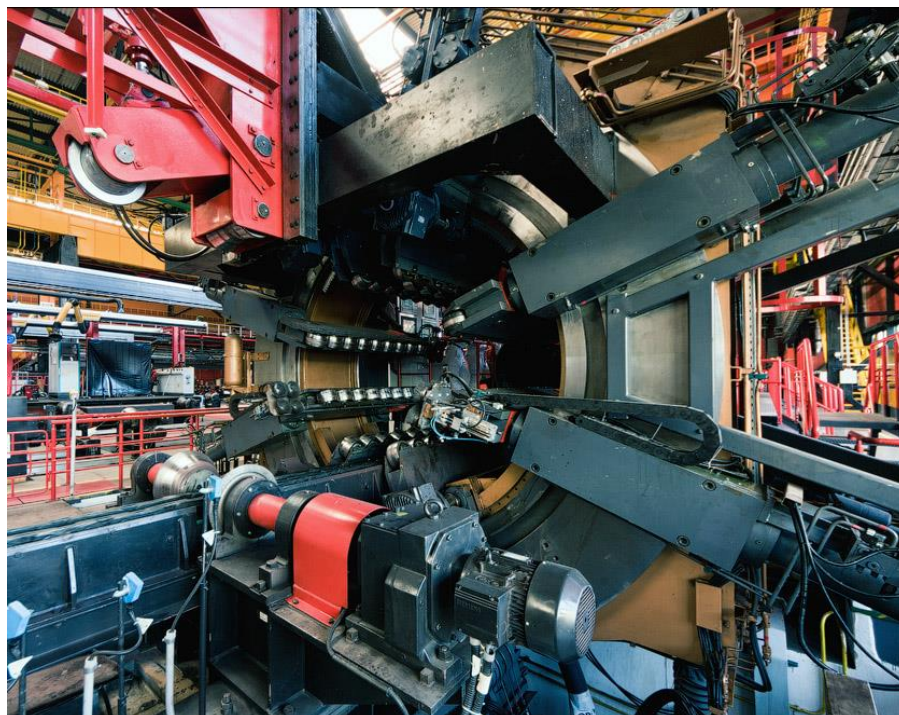


Рисунок 8 – Клеть сборочно-сварочного стана

Автоматическую сварку технологического шва выполняют электросварщики труб на стане с помощью одной сварочной дуги в смеси защитных газов.

Калибр сборочно-сварочного стана включает 9 балок с установленными на них роликами. Две неподвижные балки располагаются снизу трубной заготовки. Четыре балки располагаются в средней части профиля трубы и имеют возможность радиального перемещения. Две балки расположенные в верхней части трубной заготовки имеют возможность радиального перемещения и угла поворота. Именно они и обеспечивают устранение зазора по длине трубы и требуемую овализацию заготовки под угол схождения кромок. Самая верхняя балка направляет и доформовывает кромки, обеспечивает заданное положение кромок по высоте.

Собранную и сваренную технологическим швом заготовку осматривают, при необходимости сварщики ремонтируют технологический

шов полуавтоматической сваркой в среде защитных газов и направляют на участок сварки внутреннего шва.

2.3 Технологические операции участка сварки

Сварку внутреннего шва выполняют электросварщики труб на стане автоматической сварки под слоем керамического флюса. Такой стан состоит из тележки для подачи свариваемой трубы, эстакады, по которой передвигается тележка, штанги, на конце которой смонтированы сварочные головки и балкона, где размещена сварочная и флюсовая аппаратура.

Флюсовая аппаратура стана состоит из флюсоаппарата, воздушной и флюсовой систем и служит для подачи флюса в зону сварки, уборки флюса для дальнейшего использования, а также для отсоса газа и пыли в процессе работы.

Труба, поданная по рольгангу, останавливается упором под тележкой, подхватывается люльками тележки и поднимается ими на уровень штанги. Люльки оборудованы поворотными роликами, которые поворачивают трубу швом к низу. После этого труба надвигается на штангу с помощью тележки, перемещающейся по эстакаде.

Количество дуг в зависимости от толщины стенки может достигать четырех. Все дуги горят в одну ванну. Все мундштуки со сварочными дугами расположены под некоторым углом, причем первый электрод устанавливается "углом назад", а остальные "углом вперед". Первый электрод питается постоянным током от двух параллельно подключенных выпрямителей, остальные электроды питаются переменным током от трансформаторов.

Сварку проводят стальной омедненной проволокой диаметром 4-5 мм. Скорость подачи электродной проволоки может изменяться в пределах 60-300 м/ч.

Затем трубная заготовка перемещается на участок сварки наружного шва. Между участками происходит очистка трубы изнутри от шлаковой корки с помощью жестко закрепленной металлической щетки. Сварку наружного шва выполняют электросварщики труб на стане автоматической сваркой под слоем флюса. В случае сварки наружного шва трубы используется аналогичное стану для сварки внутреннего шва оборудование. При этом труба поворотным механизмом поворачивается разделкой кверху, где находятся сварочные головки. Количество дуг в зависимости от толщины стенки может достигать пяти.

После наружной очистки труб от шлаковой корки у сваренных труб выполняют отрезку технологических планок автоматическим способом с помощью робота-манипулятора оборудованного плазменным резаком.

Затем для проверки качества сварного соединения и отсутствия в нем каких-либо дефектов 100% сваренных труб подвергаются технологическому автоматизированному ультразвуковому контролю (ТАУЗК). В случае обнаружения дефекта данный участок сварного соединения отмечается мелом, и труба направляется на установку технологического автоматизированного рентгенотелевизионного контроля (ТАРТК) для оценки характера и допустимости обнаруженного дефекта. При обнаружении недопустимого дефекта труба назначается на ремонт.

Все трубы после сварки и неразрушающего контроля подаются на площадку технологического контроля, где производится визуально-измерительный контроль качества труб и ручной ультразвуковой контроль участков сварного соединения и основного металла.

2.3 Технологические операции участка отделки

Для получения точных геометрических параметров трубы и обеспечения требований к величине наружного диаметра, овальности и кривизне производят экспандирование труб на механическом прессе-

расширителе, который позволяет калибровать трубы по всей длине с одновременным упрочнением и правкой. Общий вид калибровочной части пресса-расширителя представлен на рисунке 9.



Рисунок 9 – Калибровочная часть пресса-расширителя

Экспандирование производится в несколько шагов, с перекрытием предыдущего шага. При достижении величины давления пресса, вызывающего появление в стенках трубы напряжений, равных пределу текучести металла, происходит пластическая деформация, сопровождающаяся расширением трубы по диаметру. При этом в процессе экспандирования труба незначительно укорачивается.

Величина давления пресса-расширителя зависит от марки стали, геометрических размеров труб (диаметра и толщины стенки) и заданной степени деформации. Обычно величина экспандирования не превышает 1,2-1,5 %.

Откалиброванные трубы направляются на установку по снятию усиления внутреннего и наружного сварных швов концов труб. Затем торцы

труб подвергают предварительной механической обработке, для последующей операции – гидростатического испытания труб.

Гидростатическое испытание труб заключается в раздаче трубы изнутри гидравлическим давлением воды. Величина давления раздачи сварных газопроводных труб большого диаметра может колебаться в пределах 9-15 МПа.

Гидростатическому испытанию трубу подвергают в течении 20 секунд. Во время выдержки испытательным давлением трубу обстукивают по длине испытательными молотками. Трубы считаются выдержавшими испытание, если при этом не будет обнаружено течи, запотевания или остаточных деформаций, выводящих размеры труб за пределы допусков.

Трубы не выдержавшие гидравлического испытания вследствие наличия дефектов в сварных швах, подвергают ремонту и повторному испытанию.

После испытания на герметичность трубы подают на установку автоматического ультразвукового контроля сварного соединения, где повторно проверяется качество сварных соединений. После этого готовые трубы подают транспортными рольгангами к трубообрезным станкам, на которых снимают фаски с торцов. Затем трубы подвергают рентгенотелевизионному контролю концов и магнитопорошковому контролю.

Трубы, прошедшие все технологические операции, передаточным рольгангом передают на площадку окончательной сдачи.

На площадке окончательной сдачи труб работники осуществляют следующие операции:

- измеряют фактическую длину труб рулеткой, при этом величину фаски обеих сторон трубы включают в длину трубы;
- внешним осмотром контролируют качество изготовления и соответствие требованиям технических условий и стандартов, поступивших труб;
- проверяют качество и правильность клеймовки труб, выполненной

- за прессом окончательной формовки и контролерами службы контроля качества на инспекционных площадках;
- наносят маркировку труб;
 - в обязательном порядке удаляют все меловые отметки нанесенные на предыдущих технологических операциях;
 - складировать трубы строго по размерам, маркам и назначению.

3 КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОДГИБКИ КРОМОК ИСХОДНОГО ЛИСТОВОГО ПРОКАТА

Анализ технологического процесса производства сварных труб большого диаметра в ТЭСЦ «Высота 239» на ПАО «ЧТПЗ» показал, что основными геометрическими дефектами трубной заготовки, появляющимися после процессов формовки, являются отклонение от теоретической окружности, большая овальность, а также смещение кромок. При этом любые геометрические дефекты могут привести к переводу трубы в пониженное качество, либо в окончательный брак, что колоссально отразится на экономике компании в целом.

Причинами возникновения геометрических дефектов являются разность исходных механических свойств листа, из-за которых каждый формуемый лист воспринимает прикладываемую нагрузку и деформируется по-своему, а также наличие в каждой сформованной трубе некоторого уровня остаточного напряженно-деформированного состояния, который в свою очередь также влияет на геометрические показатели качества трубы.

В связи с этим, важным является анализ влияния разности исходных механических свойств листового проката на геометрию получаемой трубной заготовки после каждой из формовочных операций.

Основными этапами формовки, на которых происходят изменения формы листовой заготовки при изготовлении сварных труб большого диаметра, являются:

- 1) подгибка кромок исходного листа;
- 2) формовки листа корытообразной формы в трубную заготовку;
- 3) экспандирование геометрии готовой трубы.

В рамках данной работы будет рассмотрено влияние разности исходных механических свойств листа на геометрию заготовки после процесса подгибки кромок.

Основным геометрическим показателем качества операции подгибки кромок является конечная высота и радиус подогнутой кромки листа. Для определения зависимости высоты и радиуса подогнутой части листа, а также усилий при подгибке кромок от варьируемых исходных механических свойств листа будут использованы:

- программный комплекс «DEFORM», позволяющий моделировать все известные в настоящее время процессы обработки металлов давлением;
- программный комплекс «КОМПАС», позволяющий создавать различные виды конструкторско-технологической документации, как на основании разработанной трехмерной модели, так и путем плоскостного двумерного проектирования объектов.

3.1 Введение системы допущений и упрощений

Для компьютерного моделирования процесса подгибки кромок в программном комплексе «DEFORM» принимаются следующие допущения:

- 1) деформируемый лист идеально упруго-пластичный;
- 2) силы контактного трения постоянны;
- 3) изгиб центральной части листа при подгибке кромок не учитывается.

Последнее допущение справедливо, так как в конструкции прессы для подгибки кромок установлен центральный промежуточный рольганг, который поддерживает листовую заготовку от прогиба. Для этих же целей

пресс оборудован прижимными траверсами, расположенными на небольшом расстоянии от подгибаемого участка.

3.2 Разработка компьютерной модели процесса подгибки кромок листа

Для достоверного вычисления радиуса и высоты подогнутых кромок листовой заготовки желательно выполнять моделирование процесса подгибки в трехмерном пространстве. Однако такой постановке задачи свойственно большое число расчетов, что приводит к большим временным затратам по вычислению (с использованием программой метода конечных элементов) и обработке данных.

Поэтому для определения радиуса и высоты подогнутой кромки листовой заготовки после первой формовочной операции целесообразно применять двумерное проектирование объектов модели.

Применение двумерных моделей связано с необходимостью определить общую зависимость между исходными механическими свойствами листа и вышеуказанными показателями.

В данной работе, в качестве исходной заготовки для компьютерного моделирования, используется листовая прокат толщиной 41 мм и шириной 3706 мм. Из листов данной ширины изготавливают трубы с внутренним диаметром 1153 мм.

В ходе производственной практики на ПАО «ЧТПЗ», руководителем практики от завода были выданы результаты испытаний на растяжение вышеуказанных листов десяти различных плавок производства ПАО «ММК», в которых указаны упругие и пластические свойства листов, выраженные модулем упругости E и условным пределом текучести $\sigma_{0,2}$ соответственно. На рисунке 10 представлен график исходных механических свойств листового проката десяти различных плавок производства ПАО «ММК».



Рисунок 10 – График исходных механических свойств листового проката

Сравнивая исходные условные пределы текучести и модули упругости листов разных плавков, можно наблюдать их отличие друг от друга. При этом относительная разность между наименьшим и наибольшим значениями условного предела текучести составляет 12,9 %, а модуля упругости 30,3%. Колебание же механических свойств в рамках одной плавки неизвестно. Абсолютная разность между наименьшим и наибольшим значениями условных пределов текучестей равна 67,18 МПа, а между модулями упругости 49,66 ГПа. Колебание же механических свойств в рамках одной плавки неизвестно.

Также, следует отметить, что наблюдается тенденция совместного роста условного предела текучести с ростом модуля упругости материала листов, но по модулю упругости есть выпадающие точки на образцах 1,3 и 7. Для уточнения характера изменения модуля упругости в зависимости от условного предела текучести материала листа необходимо иметь больше результатов испытаний листов на растяжение. Учитывая большой объем производства труб большого диаметра, это не представляет проблему.

Для определения высоты и радиуса подогнутой кромки листа в программном комплексе «КОМПАС» была спроектирована плоскостная

двумерная модель исследуемого процесса. Модель исследуемого процесса представлена на рисунке 11.

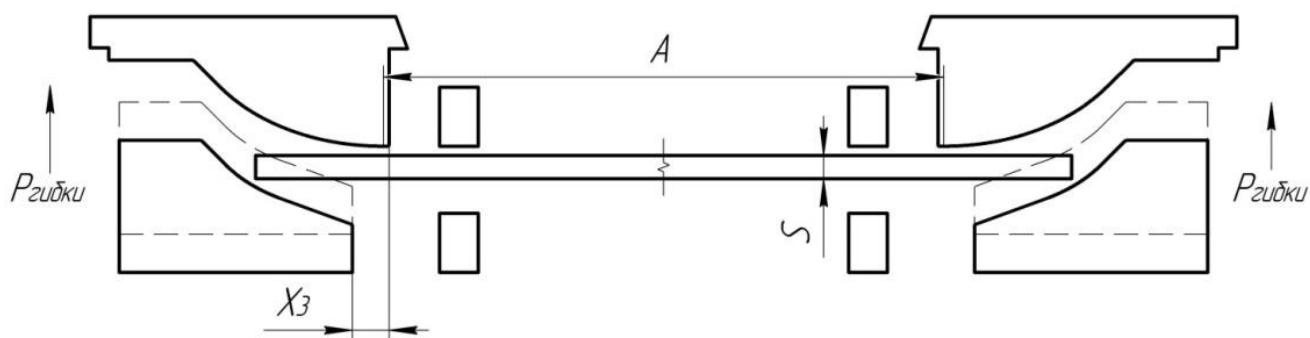


Рисунок 11 – Модель исследуемого процесса подгибки кромок листа:

S – толщина листовой заготовки; A – расстояние между гибочными блоками;

$X_з$ – смещение верхнего инструмента относительно нижнего

При создании модели рабочего инструмента и компьютерном моделировании исследуемого процесса подгибки кромок листа задавались следующие параметры:

- геометрия верхнего и нижнего инструментов (согласно чертежей, предоставленных на ПАО «ЧТПЗ» в период производственной практики);
- геометрические параметры исходной листовой заготовки без учета геометрии фаски;
- начальное положение нижнего инструмента;
- расстояние между левым и правым гибочным блоком A (до точки начала кривых на инструменте);
- расстояние по горизонтали между верхним и нижним рабочим инструментом $X_з$;
- реологическое поведение материала листа – изотропное упруго-пластическое (для оценки влияния усилия гибки на высоту подгибаемых кромок – изотропное пластическое);

- реологическое поведение материала верхнего и нижнего инструментов
- абсолютно жесткое тело;
- контактное трение. В расчетах был принят коэффициент трения соответствующий значениям сталь по стали;
- исходные упругие и пластические свойства листового проката;
- максимальное погонное усилие гибки $P_{гибки}$, при достижении которого процесс гибки прекращался.

3.3 Результаты компьютерного моделирования

Моделирование процесса подгибки кромок проводилось в двух режимах: для материала жесткопластического, без учета упругих свойств материала, и, соответственно, с учетом упругих свойств. Разница в высоте подгибки кромок объясняется упругим последствием кромок листа. При этом величина упругого пружинения составила 5,5 % от общей величины получаемой высоты подгибки. Результаты моделирования процесса подгибки кромок в двух режимах представлены на рисунке 12.

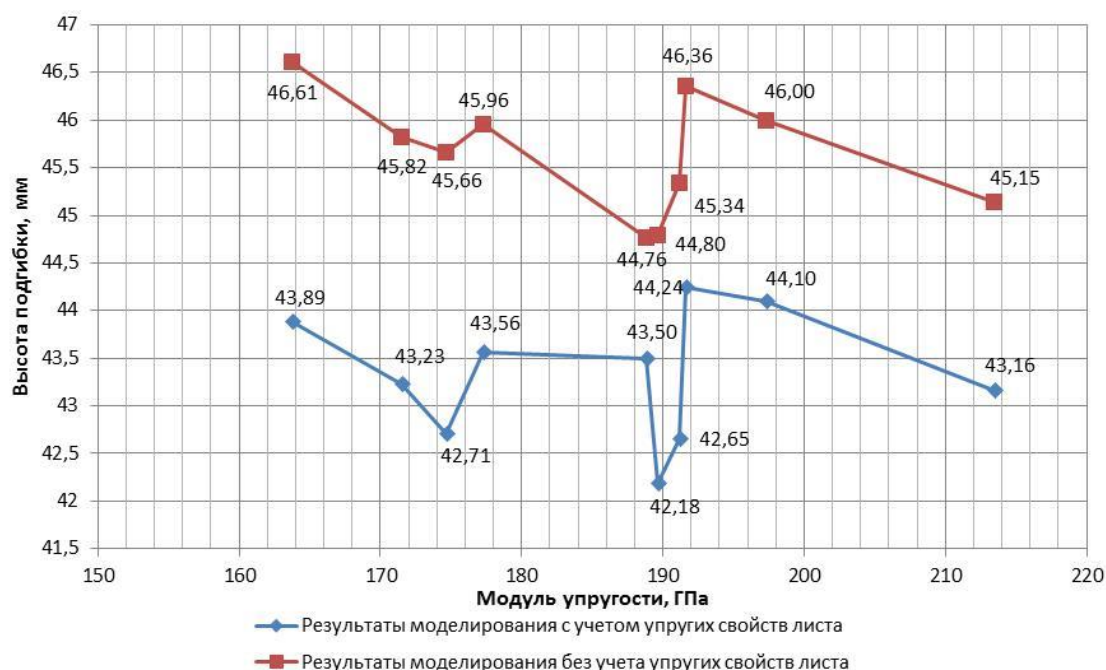


Рисунок 12 - Результаты моделирования процесса подгибки кромок в двух режимах

Помимо упругого пружинения, в результате компьютерного моделирования были определены высота и радиус подогнутых кромок листа. Результаты компьютерного моделирования сведены в таблицу 7.

Таблица 7 – Результаты компьютерного моделирования

№ плавки	$\sigma_{0,2}$, МПа	E , ГПа	Высота подгибки, мм	Радиус гибки, мм
1	520,83	191,64	44,24	480,12
2	532,31	163,76	43,89	475,04
3	534,39	197,26	44,10	465,33
4	537,05	177,26	43,56	468,44
5	538,74	171,54	43,23	476,89
6	543,21	174,63	42,71	477,02
7	549,80	213,42	43,16	475,59
8	554,68	189,60	42,18	462,20
9	557,98	188,79	43,50	471,20
10	588,01	191,17	42,65	468,23

Результаты компьютерного моделирования процесса подгибки кромок листа представлены в графическом виде на рисунках 13-16.

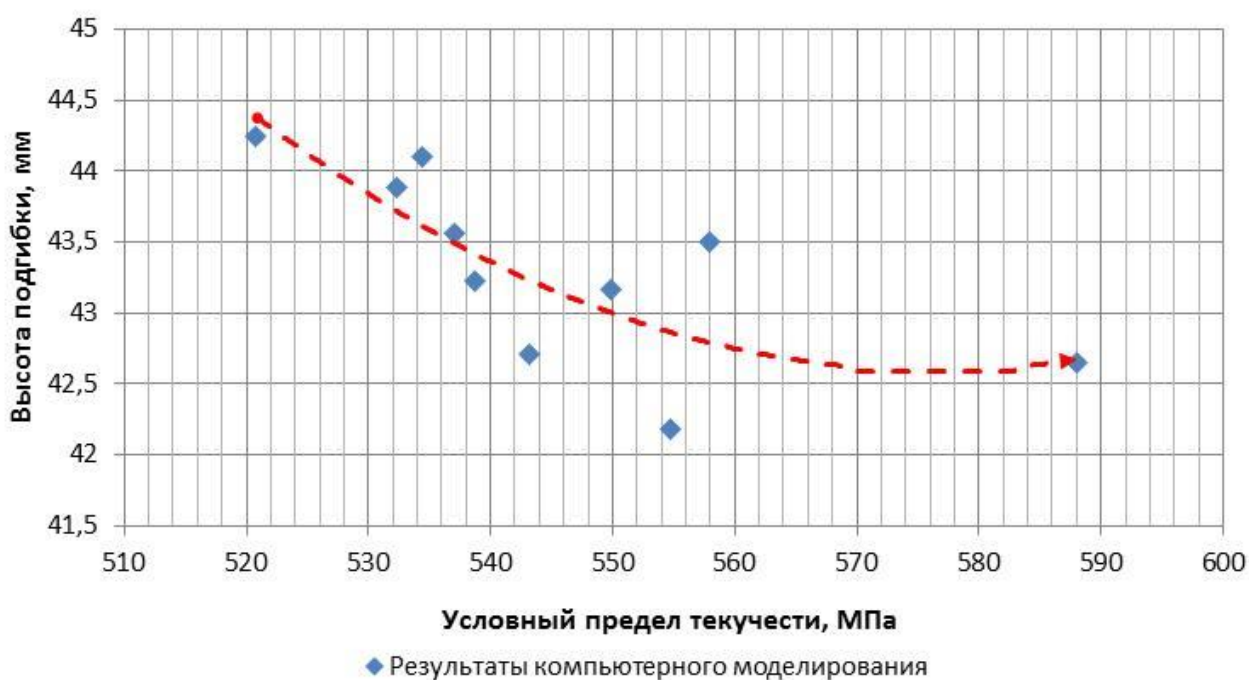


Рисунок 13 – Изменение высоты подогнутой кромки листа в зависимости от исходных пластических свойств листа

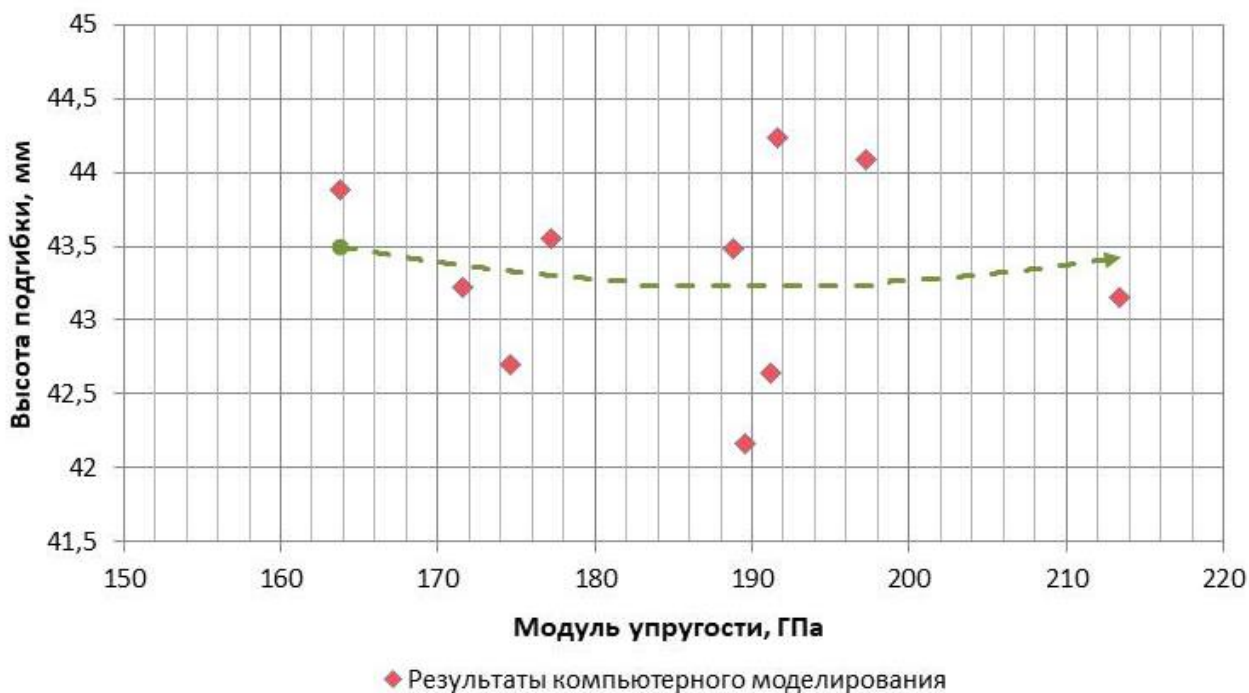


Рисунок 14 – Изменение высоты подогнутой кромки листа в зависимости от исходных упругих свойств листа

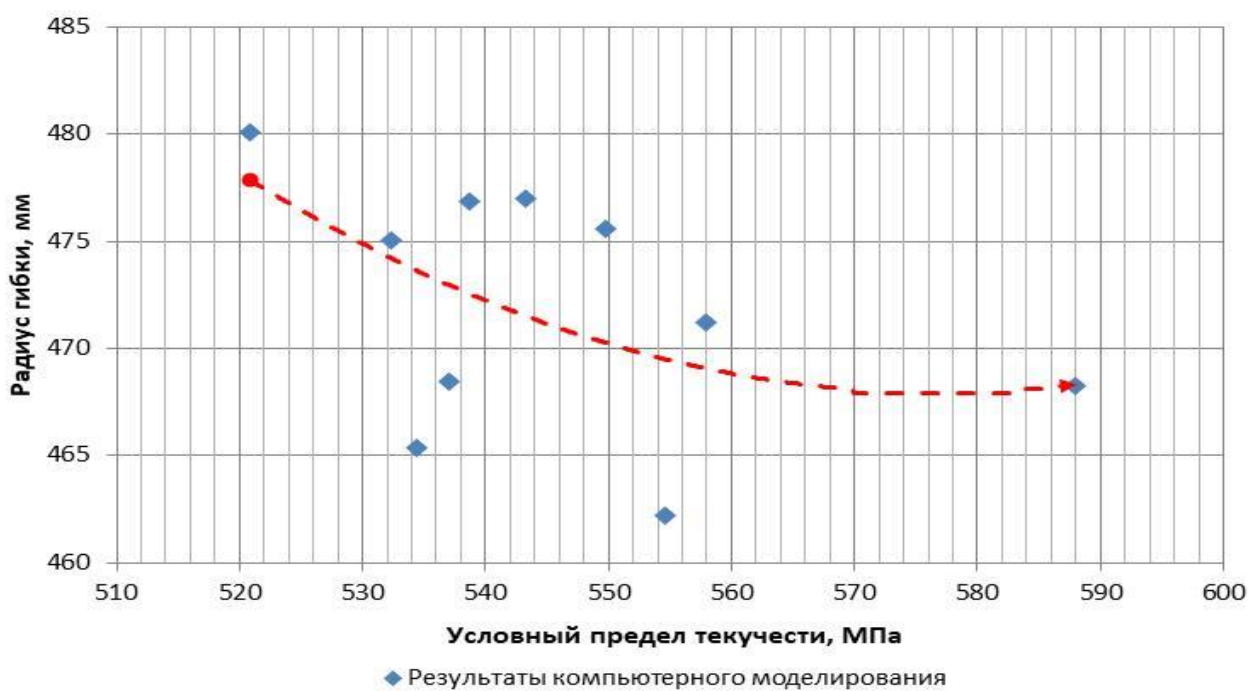


Рисунок 15 – Изменение радиуса подогнутой кромки листа в зависимости от исходных пластических свойств листа

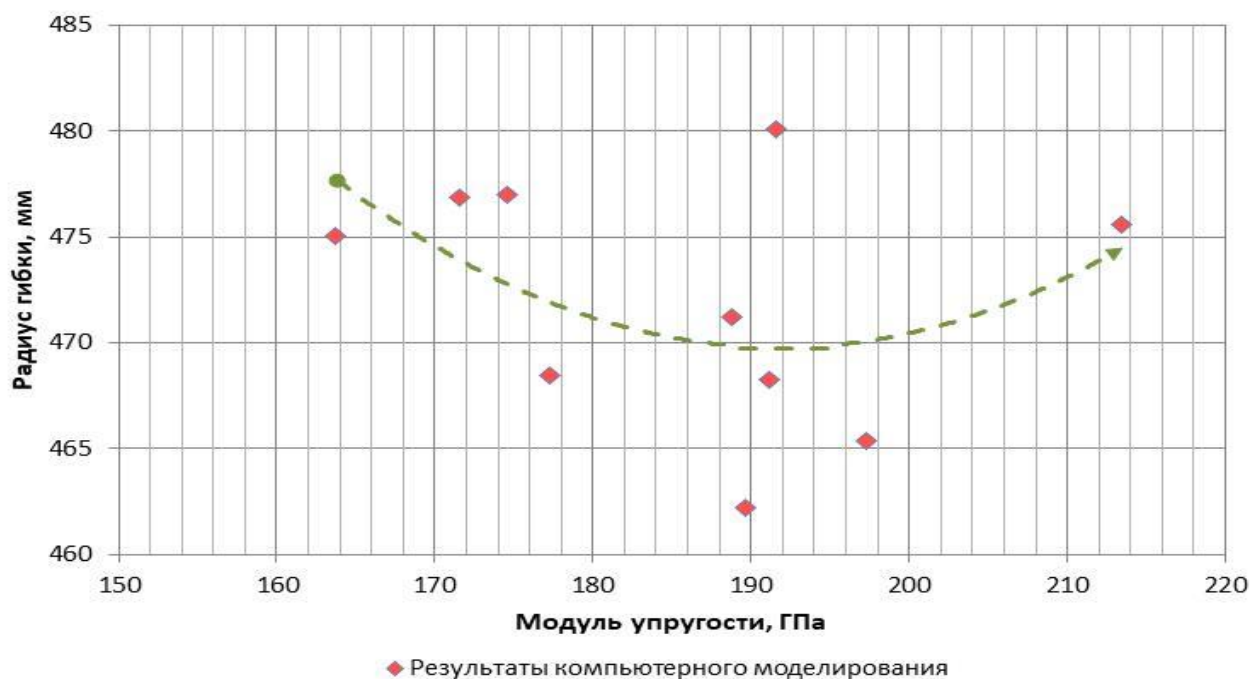


Рисунок 16 – Изменение радиуса подогнутой кромки листа в зависимости от исходных упругих свойств листа

Таким образом, при моделировании в программном комплексе «DEFORM» процесса подгибки кромок с одинаковым погонным усилием гибки и геометрией рабочих инструментов, варьируя исходные механические свойства листовой заготовки, получили зависимости между исходными механическими свойствами материала листа и получаемыми геометрическими параметрами процесса подгибки кромок.

Так, с увеличением условного предела текучести материала листов, уменьшается высота и радиус подгибки кромок. В свою очередь зависимость геометрических параметров от модуля упругости материала листа неоднозначно ввиду того, что общая доля упругого последствия составляет всего 5,5 % от общей величины деформации, а также ввиду того, что есть статистическая неоднородность исходных данных по модулю упругости. Поэтому установить действительный характер изменения высоты подгибки и радиуса подгибки в зависимости от модуля упругости в рамках данной работы невозможно, так как для этого требуется больше исходных данных.

Для оценки влияния усилия гибки на величину высоты подгибки был выполнен эксперимент, заключающийся в моделировании процесса подгибки кромок листового проката с конкретным значением условного предела текучести и при разных значениях погонного усилия гибки. Результаты моделирования показали, что с увеличением погонного усилия гибки увеличивается высота подгибаемых кромок. Следовательно, для обеспечения требуемой высоты подогнутых кромок после кромкогибочного пресса, необходимо изменять усилие гибки при формовке каждого листа, в зависимости от его условного предела текучести. Зависимость изменения высоты подгибки от погонного усилия гибки представлена на рисунке 17.

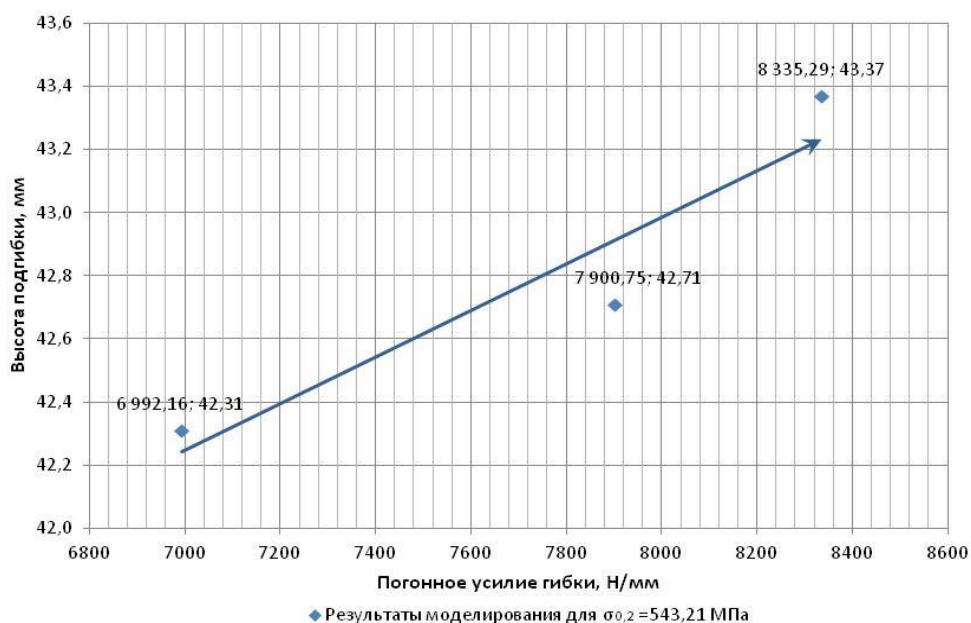


Рисунок 17 - Изменение высоты подгибки в зависимости от погонного усилия гибки

Разработанная компьютерная модель позволяет также оценить эквивалентные напряжения в зоне подгибки кромок листа под нагрузкой и после распружинения.

В ходе моделирования процесса подгибки кромок в программном комплексе DEFORM фиксировались максимальные значения эквивалентных напряжений. На рисунках 18-21 представлены максимальные эквивалентные

напряжения в зоне подгибки кромок листа под нагрузкой и после снятия нагрузки.

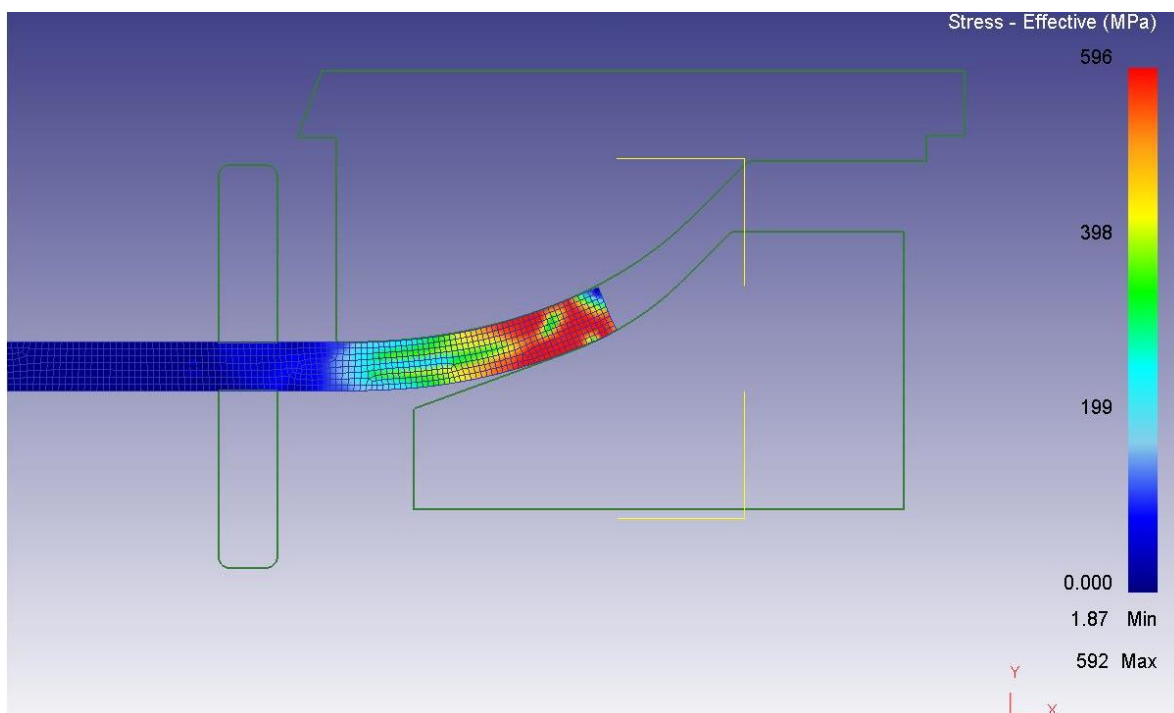


Рисунок 18 - Эквивалентные напряжения в зоне подгибки кромок листа (плавка 1) под нагрузкой

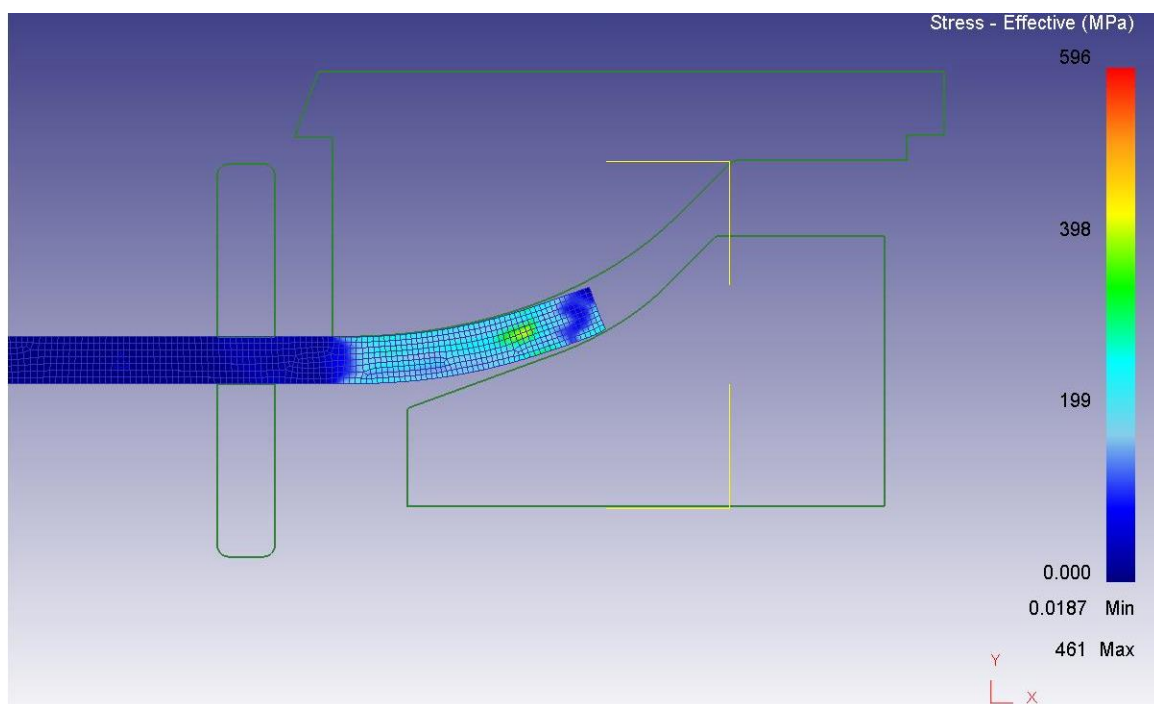


Рисунок 19 - Эквивалентные напряжения в зоне подгибки кромок листа (плавка 1) после распружинения

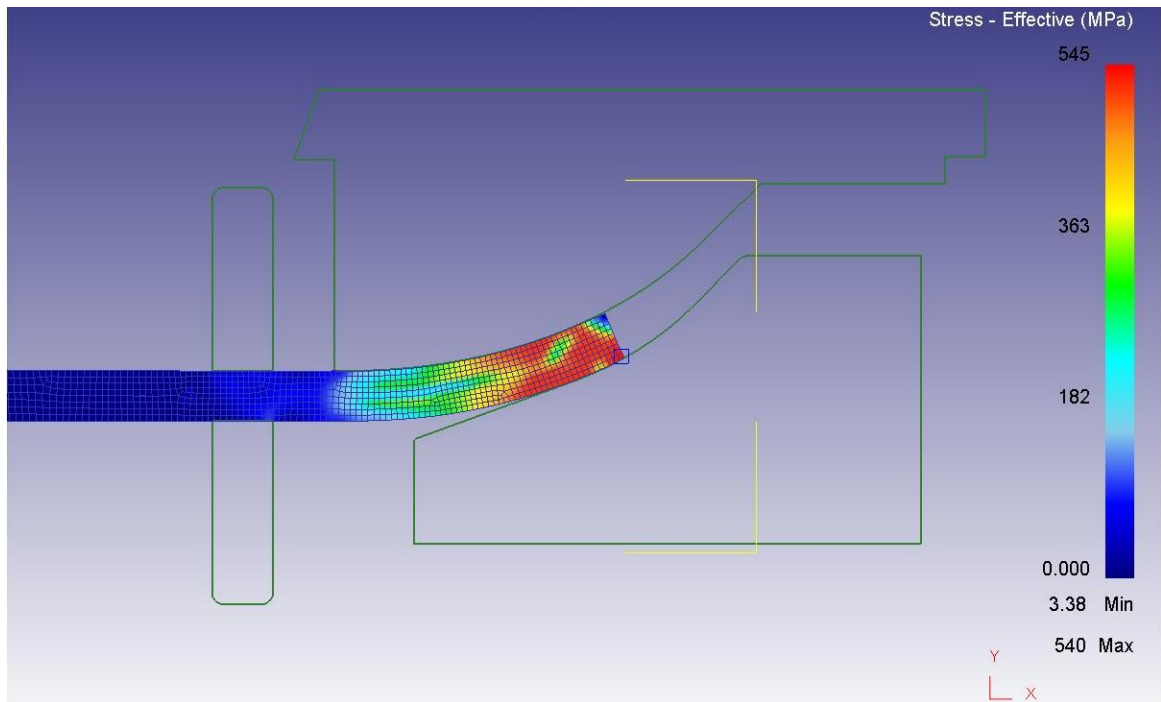


Рисунок 20 - Эквивалентные напряжения в зоне подгибки кромок листа (плавка 10) под нагрузкой

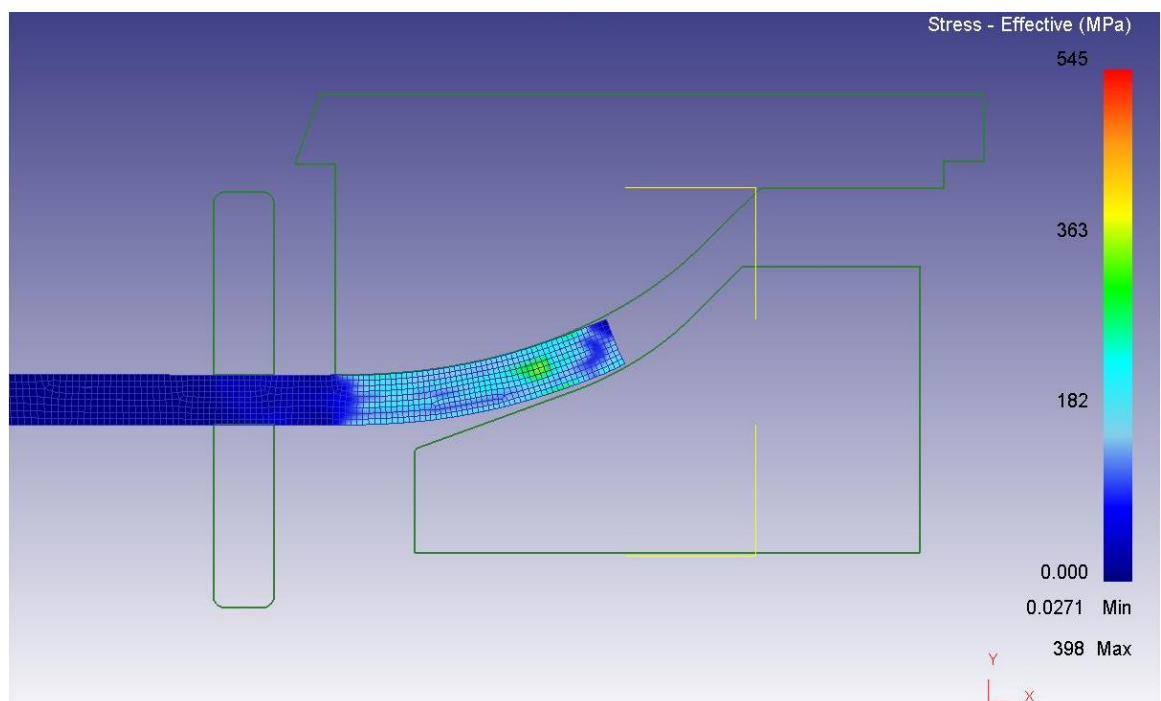


Рисунок 21 - Эквивалентные напряжения в зоне подгибки кромок листа (плавка 10) после распружинения

Как видно из представленных рисунков 18-21, остаточные напряжения в зоне подгибаемых кромок не превышают 470 МПа, а максимальные напряжения располагаются посередине толщины листа.

Таким образом, в случаях освоения нового сортамента труб, а также новых технологий производства труб большого диаметра рекомендуется использовать компьютерное моделирование. При моделировании процессов производства трубной заготовки по цеховым переделам удастся выявить ряд теоретических и технологических особенностей формоизменения.

Однако необходимо уделять внимание и экспериментальному исследованию формообразующих операций с целью сравнить результаты компьютерного моделирования с реально полученными на практике результатами, внесения необходимых допущений, поправок и, в итоге, корректирования расчетных методик.

4 РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ВЫБОРУ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ПРОЦЕССОВ ФОРМОВКИ

При изготовлении сварных труб большого диаметра с помощью процессов подгибки кромок и шаговой формовки на гидравлических прессах, к числу основных показателей качества сформованных трубных заготовок можно отнести гарантированное обеспечение требуемых геометрических размеров, и минимальную величину остаточных напряжений в металле заготовок. Данные показатели оказывают прямое влияние на последующие технологические операции сборки и сварки трубы.

В настоящее время в литературных источниках расчеты настроечных и технологических параметров процессов подгибки кромок листа и шаговой формовки недостаточно освещены. Отсутствует описание связи между двумя этими процессами.

В рамках данной работы было выполнено компьютерное моделирование процесса подгибки кромок с целью анализа влияния

колебаний исходных пластических свойств листового проката на получаемую геометрию сформованных трубных заготовок. Результаты моделирования (см. рисунки 13-16) показывают, что даже с незначительным колебанием исходных механических свойств поставляемого листового проката, изменяются геометрические параметры сформованной заготовки, такие как высоты подогнутой кромки и радиус гибки.

Основываясь на результатах моделирования, основной рекомендацией по выбору режимов формовки является необходимость варьирования погонного усилия гибки в зависимости от условного предела текучести материала листа, что позволит увеличить выход годного на операции подгибки кромок.

Однако, в настоящее время в ТЭЦ «Высота 239» ПАО «ЧТПЗ» при вводе в производство листового проката со склада листов в рамках входного контроля отбирается по 1 листу из плавки, количество листов в которой может достигать 20. Следовательно, не учитываются колебания исходных механических свойств остальных не отобранных для входного контроля листов и невозможно изменение погонного усилия гибки в зависимости от условного предела текучести каждого листа.

Таким образом, для выполнения высокоответственных заказов с высокими требованиями к точности геометрических параметров готовых труб, рекомендуется выполнять входной контроль каждого листа. Входной контроль всех листов позволит оценить их индивидуальные механические свойства и способность к деформации. Согласно полученным данным, станет возможным определение усилия гибки кромкогибочного гидравлического пресса необходимого для получения требуемых высоты и радиуса подогнутых кромок на каждой формуемой трубной заготовке. Внедрение данной рекомендации позволит учитывать деформационную способность исходной листовой заготовки на этапах формоизменяющих операций, а также уменьшить количество геометрических дефектов труб и трубных заготовок после этих операций.

Кроме влияния колебаний механических свойств исходного листового проката на получаемую геометрию сформованных трубных заготовок, при разработке технологических режимов формовки следует учитывать наличие в трубной заготовке некоего остаточного уровня напряженно-деформированного состояния после каждой из формовочных операций в цехе.

Возникновение внутренних напряжений в трубах начинается в самом начале процесса их изготовления. Материал листового проката, из которого изготавливаются трубы большого диаметра, уже содержит некоторые остаточные напряжения, связанные с неравномерностью пластического деформирования и температурного режима при прокатке и последующем «отпуске» металла листов. После окончания процесса формовки трубы в ее теле также имеются остаточные напряжения, связанные с операцией упругопластического изгиба и пластического деформирования листа. Сварочные напряжения накладываются на технологические, полученные трубной заготовкой в процессе формирования основного профиля трубы на участках подгибки кромок, шаговой формовки и сборки – сварки [23].

Таким, образом, в процессе изготовления труб напряженно-деформированное состояние и свойства материала трубы постоянно меняются. При этом предшествующие технологические операции оказывают влияние на деформацию металла в последующих операциях и на завершающем этапе изготовления труб.

Проведенные исследования показали, что остаточные напряжения, возникающие на этапах производства, транспортировки, прокладки газопроводов вносят значительные изменения в распределение напряжений в теле трубы, вызванных при их эксплуатации внутренним давлением. Напряжения от проектного рабочего давления, суммируясь с остаточными напряжениями, могут привести к началу пластического течения материала в определенных зонах трубы. Это обстоятельство может оказаться

достаточным для преодоления порогового уровня и начала развития трещин от внешне незначительных по размеру поверхностных дефектов [24].

Для оценки напряженно-деформированного состояния трубной заготовки сегодня применяются методы математического моделирования процесса формоизменения и различные экспериментальные методы расчета напряженно-деформированного состояния. Расчет остаточных напряжений в теле трубы может быть выполнен согласно теореме о разгрузке, в соответствии с которой связь между напряжениями и деформациями при разгрузке подчиняется закону Гука [25]. Существует целый ряд методик аналитического расчета напряжений и деформаций на каждой стадии передела лист – труба. [26-27].

Однако в настоящее время для оценки напряженно-деформированного состояния металла в объеме заготовки рекомендуется, наряду с традиционными методами, использовать компьютерное моделирование с помощью программных продуктов, основанных на методе конечных элементов (таких как DEFORM, QForm, 3DMark и т.д.). Это позволит экономично и достаточно быстро выполнить требуемые технологические расчеты, получить новые теоретические зависимости, при этом оценить неравномерность напряженно-деформированного состояния металла на всех этапах трубного передела.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе проанализированы основные промышленные способы производства стальных электросварных прямошовных труб большого диаметра.

Рассмотрено основное технологическое оборудование, применяемое на современных трубных заводах для формовки трубной заготовки из исходного листового проката.

Проанализированы основные требования потребителей к геометрии сварных труб большого диаметра.

Разобраны возможные виды дефектов труб большого диаметра.

Выполнена имитация процесса подгибки кромок исходного листового проката при помощи компьютерного моделирования в программном комплексе DEFORM.

Произведен анализ влияния разности исходных механических свойств листового проката на геометрические параметры получаемой трубной заготовки.

На основании компьютерного моделирования приведены рекомендации по выбору режимов формовки трубной заготовки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шабалов И.П., Морозов Ю.Д., Эфрон Л.И. Стали для труб и строительных конструкций с повышенными эксплуатационными свойствами. М.: ЗАО «Металлургиздат», 2003. 520 с.
2. Иванцов О.М. Требования к трубам для строительства газопроводов нового поколения // Доклад на Совете по координации работы, направленной на создание производства высокопрочных труб для ТЭК России. М.: Минпром-энерго России, 2004.
3. Осадчий, В.Я. Технология и оборудование трубного производства: Учебник для вузов / В.Я. Осадчий, А.С. Вавилин, В.Г. Зимовец, А.П. Коликов – М.: «Интермет Инжиниринг», 2001. – 608 с.
4. Калинушкин, П.Н. Сварные многослойные трубы для магистральных газопроводов высокого давления / П.Н. Калинушкин, З.О. Княжинский, В.К. Коломенский // Производство труб. – 1980. – № 6. – С. 64 – 69.
5. Шевакин, Ю.Ф. Производство труб / Ю.Ф. Шевакин, А.З. Глейберг – М.: «Металлургия», 1968. – 440 с.
6. Шмитц, Х. Штучное производство сварных труб с продольным швом / Х. Шмитц // Производство труб, пер. с нем: «Металлургия». – 1980. – С. 124 – 136.
7. Иванцов, В.Я. Моделирование процесса формовки труб большого диаметра с использованием поляризационно-оптического метода / В.Я. Иванцов, Л.Л. Ситников, В.А. Рымов, К.Ф. Миленный, М.Ю. Матвеев // Пластическая деформация металлов и сплавов. – 1975. – №80. – С. 249 – 254.
8. Самусев, С.В. Разработка методики расчета параметров рабочего инструмента линии ТЭСА-1420 для унификации групп сварных труб на участке кромкогибочных прессов / С.В Самусев, А.В. Люскин // Сборник докладов международного научно-технического конгресса «ОМД 2014. Фундаментальные проблемы. Инновационные материалы и технологии». – 2014. – Ч. 2. – С. 108 – 110.

9. Пат. 11285729, Япония, МПК В 21 С 37/08, В 21 D 05/01. Manufacture of UOE steel tube / Hirose Y. Заявл. 1.4.1998; опубл. 19.10.1999.

10. Осадчий, В.Я. Производство и качество стальных труб: Учебное пособие для вузов / В.Я. Осадчий, А.П. Коликов – М.: Издательство МГУПИ, 2012. – 370 с.

11. Кондратов, Л.А. Оценка формуемости и продольной устойчивости высокопрочных труб по технологии UOE / Кондратов Л.А. // Ин-т «Черметинформация» Новости черной металлургии за рубежом. – 2011. – № 2. – С. 56 – 58.

12. Матвеев, Ю.М. Исследование процесса формовки полуцилиндров для производства труб большого диаметра / Ю.М. Матвеев, Е.М. Халамез, В.Я. Иванцов, Л.И. Зайончик // Производство сварных и бесшовных труб. – 1971. – № 13. – С. 93 – 96.

13. Чечулин, Ю.Б. Особенности нагружения технологического инструмента при предварительной формовке труб большого диаметра / Ю.Б. Чечулин, Н.Ю. Боклаг, Ю.В. Песин, А.М. Золотов // Сталь. – 2014. – №5. – С. 68 – 70.

14. Шинкин, В.Н. Критерий перегиба в обратную сторону свободной части листовой заготовки на трубоформовочном прессе SMS MEER / В.Н. Шинкин, А.М. Барыков // Сборник докладов международного научно-технического конгресса «ОМД 2014. Фундаментальные проблемы. Инновационные материалы и технологии». – 2014. – Ч. 2. – С. 40 – 45.

15. Галкин, В.В. Оценка напряженно-деформированного состояния металла трубных заготовок, изготовленных пошаговой формовкой, методом математического моделирования / В. В. Галкин, А.С. Чебурков, Г.В. Пачурин // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 2. С. 1 – 9.

16. Самусев, С.В. Исследование очага деформации на прессе шаговой формовки в условиях Челябинского трубопрокатного завода / С.В. Самусев, А.В. Люскин, А.И. Романцов, К.Л. Жигунов // Известия высш. уч. зав. Черная металлургия. – 2014. – № 3. – С. 48 – 51.

17. Шинкин, В.Н. Механика сплошных сред: Курс лекций / В.Н. Шинкин – М.: Изд. Дом МИСиС, 2010. – 235 с.
18. Пат. 102011009660, ФРГ, МПК В 21 С 37/08, В 21 С 51/00, В 21 D 5/01. Automatisierung rohrformpresse / Krauhausen M., Kolbe M. Заявл. 27.1.2011; опубл. 29.5.2013.
19. Пат. 103510003, КНР, МПК С 21 D 8/02, С 22 С 33/04. Large deformation resistant multiphase X100 high-strength steel plate for large diameter pipeline and manufacturing method for steel plate / Xia Tianxiu, Sun Weihua. Заявл. 22.09.2013; опубл. 15.01.2014.
20. Осадчий, В.Я. Технология и оборудование трубного производства: Учебник для вузов / В.Я. Осадчий, А.С. Вавилин, В.Г. Зимовец, А.П. Коликов – М.: «Интернет Инжиниринг», 2001. – 608 с.
21. Правосудович, В.В. Дефекты стальных слитков и проката: справочное издание / В.В. Правосудович, В.П. Сокуренок, В.Н. Данченко – М.: Интернет Инжиниринг, 2006. – 384 с.
22. Друян, В.М. Теория и технология трубного производства: Учебник. – Днепропетровск: РИА «Днепр-ВАЛ», 2001. – 544 с.
23. Матвеев Ю.М., Каширин Н.А., Иванцов В.Я., Сергеев И.И. О влиянии технологических переделов на напряженное состояние электросварных труб большого диаметра // Производство сварных и бесшовных труб Выпуск 6. М.: Металлургия, 1966.
24. Рафаилович И. М., Марков С. И. Особенности напряженно-деформированного состояния металла прямошовных сварных труб. // Наука и техника в газовой промышленности. –2010. –№3, с. 102–107.
25. Методы расчета калибровок инструмента и энергосиловых параметров процесса производства сварных труб в линии прессов и ТЭСА : сборник задач // С.В. Самусев [и др.]. – М. : ВФ МИСиС, 2006. – С. 6-25
26. В.Н. Шинкин, А.П. Коликов. Моделирование процесса формовки за-готовки для труб большого диаметра / Журнал Сталь №1, 2011г.

27. Шинкин В.Н.: учебное пособие. Механика сплошных сред – М.:
Изд. Дом МИСиС, 2010. – 237с.