

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
Высшего профессионального образования
«Южно-Уральский государственный университет»
(национальный исследовательский университет)
ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ)

На правах рукописи



Звонарев Дмитрий Юрьевич

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОДГИБКИ КРОМОК И
ШАГОВОЙ ФОРМОВКИ СВАРНЫХ ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА ДЛЯ
ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВЫСОКОЙ ТОЧНОСТИ РАЗМЕРОВ И ФОРМ

Специальность 05.16.05 «Обработка металлов давлением»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель:
профессор, доктор технических наук
Осадчий В.Я.

Челябинск – 2015

Содержание

Введение.....	4
1 Особенности производства сварных труб большого диаметра.....	6
1.1 Основные требования к сварным трубам большого диаметра и тенденции развития производства сварных труб большого диаметра.....	6
1.2 Конструкции сварных труб большого диаметра и способы их производства.....	8
1.3 Дефекты сварных труб большого диаметра	14
1.4 Выводы и постановка задач исследования	18
2 Анализ технологического процесса производства труб большого диаметра в условиях Челябинского трубопрокатного завода	21
2.1 Технологическая линия в ТЭЦ «Высота 239»	21
2.2 Статистический анализ качества производимых сварных труб большого диаметра	30
2.3 Выводы	37
3 Математическое моделирование процесса подгибки кромок листа.....	38
3.1 Введение системы координат.....	38
3.2 Введение системы допущений и упрощений	40
3.3 Разработка расчетной модели исследуемого процесса	40
3.4 Определение граничных условий процесса.....	42
3.5 Численная модель процесса подгибки кромок и исследование полученных результатов.....	52
3.5.1 Оценка достоверности регрессионных уравнений высоты подогнутой части листа	71
3.6 Влияние ширины подогнутой части листа трубной заготовки	72
3.7 Выводы	80
4 Математическое моделирование процесса формовки листа.....	81
4.1 Численная модель процесса формовки и исследование полученных результатов.....	82
4.2 Введение системы координат, допущений и упрощений	89

4.3	Разработка модели исследуемого процесса.....	90
4.3.1	Первый этап формовки листа	102
4.3.2	Второй этап формовки листа	104
4.3.3	Третий этап формовки листа	106
4.4	Определение усилий при формовке листа в трубную заготовку	111
4.5	Численное исследование влияния изменения радиуса пуансона и расстояния между опорами нижнего инструмента на величину усилий при шаговой формовки труб	112
4.6	Численное исследование влияния изменения кривизны по длине опор нижнего инструмента на прямолинейность кромок трубной заготовки...	117
4.7	Выводы	126
5	Автоматизированная система расчета и генерирования технологических режимов формоизменяющих операций	128
6	Разработка и освоение изготовления опытной партии труб категории прочности X46SS диаметром 720 мм с толщиной стенки 22 мм	134
6.1	Расчет технологических параметров для производства труб	134
6.2	Сопровождение опытного изготовления труб.....	137
6.3	Анализ результатов опытного изготовления труб	139
6.4	Выводы	139
	Заключение	140
	Библиографический список	142
	Приложение А Технологические параметры гибочных матриц.....	154
	Приложение Б Акт внедрения программного обеспечения «ZV JCO»	162
	Приложение В Акт о проделанной работе по изготовлению опытной партии труб из класса прочности X46SS согласно требованиям ТУ 14-158-157-2008	164

Действующая в настоящее время в Российской Федерации система газопроводов и нефтепроводов сложилась в 60 – 80-х гг. XX в. [1]. Общая длина магистральных, распределительных и промысловых трубопроводов достигает 1 миллиона километров. По трубопроводам транспортируется 100 % добываемого газа, 95 % нефти и около 50 % производимой продукции нефтепереработки. Более 1/3 газопроводов служит свыше 20 лет; 27 % уже выработало нормативный ресурс, а 2,5 % эксплуатируется свыше 40 лет [1].

Условия добычи и потребления нефти и газа приводят к необходимости повышения рабочего давления в трубопроводах. Для обеспечения стойкости труб, эксплуатируемых под высоким давлением, требуется повышать уровень их механических свойств и, в частности, прочностные и вязкостные характеристики.

Повышение качества и эффективности трубного производства по сути означает уменьшение металлоемкости продукции, снижение уровня остаточных механических напряжений в трубах большого диаметра (ТБД), гарантированное обеспечение их заданных геометрических параметров.

Практически каждая из операций технологической цепочки изготовления электросварных прямошовных ТБД на трубоэлектросварочных агрегатах связана с необходимостью упруго-пластического деформирования в холодном состоянии листового проката, трубных заготовок, труб. Кроме того, при выполнении продольных сварных швов локальные зоны стенки трубы также подвергаются существенному тепловому (термомеханическому) воздействию. Таким образом, каждая выпущенная трубным заводом ТБД имеет некоторое неоднородное остаточное напряженно-деформированное состояние (НДС), характеристики которого и определяют основные показатели ее качества: овальность поперечных сечений, кривизну продольных сечений, отклонение от номинального диаметра, неперпендикулярность торцевых сечений, уровень остаточных напряжений и т.п.

Значительное влияние на остаточное напряженно-деформированное состояние оказывают операции формовки. Многие показатели качества готовой продукции зависят от качества исполнения операций формовки.

В настоящее время основное отличие технологии производства прямошовных труб большого диаметра заключается в способе получения трубной заготовки из листа. Существует три основных промышленных способа для получения шлицевой трубной заготовки:

- 1) УО-формовка;
- 2) RB-формовка (формовка в вальцах);
- 3) JCO-формовка (шаговая формовка).

Из всех этих способов с точки зрения равномерного распределения остаточных напряжений лучшим является формовка в вальцах. Наиболее неравномерное распределение остаточных напряжений получается по способу УО-формовки.

В России до недавнего времени основным способом формовки труб являлась УО-формовка. Поэтому этот способ наиболее полно отражен в технической и научной литературе. Вопросами теории формовки и технологии производства прямошовных труб посвящены работы известных ученых А.П. Чекмарева, Я.П. Осадчего, Ю.М. Матвеева, Ю.Я. Ваткина, В.Я. Осадчего, А.П. Коликова, Ю.Ф. Шевакина, С.В. Самусева, Ю.Б. Чечулина и других.

В последние годы на рынке производства сварных труб большого диаметра применяются трубы изготовленные с использованием процесса шаговой формовки. С применением такого процесса возможно производство труб для строительства морских трубопроводов.

Сейчас в России используются все три способа формовки труб большого диаметра: УО-формовка – Челябинский трубопрокатный завод, Выксунский металлургический завод; RB-формовка – Волжский трубный завод; JCO-формовка – Челябинский трубопрокатный завод, Выксунский металлургический завод, Ижорский трубный завод.

1 Особенности производства сварных труб большого диаметра

1.1 Основные требования к сварным трубам большого диаметра и тенденции развития производства сварных труб большого диаметра

Системы трубопроводного транспорта, включающие трубы большого диаметра как неотъемлемую часть, относятся к опасным техногенным объектам [1]. Их аварии или отказы в работе приводят к возникновению серьезных угроз населению, инженерным сооружениям и природным массивам. Поэтому к ним предъявляются высокие требования по обеспечению надежности и безопасности [1].

Важную роль при этом играют не только прочностные и вязкостные свойства труб, но и их геометрические параметры [2]. Так, геометрические параметры труб и масса труб определяют состав и мощность строительной техники, необходимой для прокладки трубопроводов, а допуски на диаметр, толщину стенки, овальность и кривизну имеют большие значения для автоматизации монтажно-сварочных работ.

При производстве сварных труб большого диаметра основными геометрическими требованиями являются:

- а) отклонение наружного диаметра концов труб на расстоянии от торца не менее 200 мм, не должно превышать 1,6 мм [3-5];
- б) отклонение наружного диаметра корпуса трубы не должно превышать 2 мм [3-5];
- в) овальность концов труб по торцу трубы не должна превышать 0,8 % от номинального диаметра [3-5];
- г) отклонение от теоретической окружности в зоне сварного шва на длине 200 мм не должно превышать 0,15 % от диаметра [3-5];
- д) кривизна труб от до 0,2 % длины трубы [3-5].

Повышенные требования предъявляются к трубам производимые для морских участков. Так, например, для проекта газопровода «Nord Stream» на

концах труб овальность не должна превышать 3 мм; отклонение от теоретической окружности не должно превышать 1 мм [6].

Также предъявляются требования к косине реза торцов труб, геометрии сварного шва, наличию допустимых дефектов в сварном шве и другим параметрам.

Текущее развитие производства труб напрямую зависит от требований, предъявляемых потребителем. Основными потребителями труб большого диаметра являются компании топливно-энергетического комплекса. Из-за истощения традиционных месторождений и стремления к расширению рынков сбыта компании топливно-энергетического комплекса вынуждены переходить к добыче и транспортировке углеводородов в новых условиях [7]. К ним в частности можно отнести повышение агрессивности сред, в которых идет транспортировка: низкая температура эксплуатации, наличие сероводорода.

Активно развивается шельфовая и глубоководная добыча, что также заставляет учитывать воздействие морской воды и высокого давления на трубопроводы. Важнейшим направлением развития становятся арктические месторождения и добыча в условиях Крайнего Севера, где требуется трубная продукция в хладостойком исполнении. Развитие новых проектов таких, как например газопровод «Сила Сибири», предполагает прокладку трубопроводов в зонах тектонической активности, что также повышает требования к надежности труб.

Одним из основных направлений развития производства труб большого диаметра является повышение группы прочности [8-10]. В технической литературе широко описаны способы получения сталей для труб классов прочности до K80 (X100) и K100 (X120), а также способы изготовления из них труб большого диаметра [9-13]. Однако применение таких технологий ограничилось изготовлением небольших партий [7]. На практике для строительства трубопроводов используют трубы большого диаметра класса прочности до K65 (X80).

Увеличение надежности и экономичности труб большого диаметра достигается не только повышением механических свойств трубных сталей путем их легирования и совершенствования технологии выплавки, прокатки, термообработки и т.д., но и созданием принципиально новых конструкций сварных труб [14].

1.2 Конструкции сварных труб большого диаметра и способы их производства

Традиционными конструкциями являются трубы сварные прямошовные с одним или двумя продольными швами и спиральношовные. В СССР проводились работы, связанные с многослойными трубами, конструкция которых была разработана Институтом электросварки имени Е.О. Патона. Также конструкция двухслойной спиральношовной трубы – была предложена институтом ВНИИМЕТМАШ [15-17].

Прорабатывался вопрос создания сверхмощных газопроводов диаметром 2520 мм. Были изготовлены опытные трубы такого диаметра. Для производства многослойных труб на Выксунском металлургическом заводе (ОАО «ВМЗ») был смонтирован стан и выпущены трубы для опытных участков по конструкции предложенной ВНИИМЕТМАШ.

Идея предотвращения протяженных разрушений с использованием простых сталей в многослойных трубах имела научное обоснование. Но конструктивное решение двухслойных труб, а главное – заводское изготовление не обеспечили их полную герметичность, монолитность стенок и жесткость сечения. Производство двухслойных труб организовано не было.

Институт электросварки имени Е.О. Патона совместно с Институтом проблем механики АН УССР и промышленными предприятиями были созданы конструкционные металлические материалы принципиально нового класса – армированные квазимонолитные материалы [1]. Основная отличительная особенность этих материалов состоит в том, что при

статических нагрузках они ведут себя подобно обычным монолитным сталям, а при динамических нагрузках и низких температурах обладают свойствами многослойных металлических материалов.

Институтом электросварки имени Е.О. Патона совместно с МИННЕФТЕГАЗСТРОЙ и ВНИИМЕТМАШ была создана принципиально новая конструкция самокомпенсирующихся труб, предназначенных для бескомпенсаторной прокладки «горячих» и «холодных» трубопроводов [1]. Непрерывная компенсация температурных деформаций достигается введением в конструкцию спиральношовной трубы винтовых гофров, что позволяет сооружать прямолинейные участки трубопроводов (например, «горячих» нефтепроводов, мазутопроводов и теплотрасс) любой длины без установки компенсирующих устройств. Нанесение гофров по винтовой линии позволило придать процессу изготовления труб непрерывный характер.

Первая опытная партия самокомпенсирующихся труб размером 426x5 мм была изготовлена на Альметьевском заводе спиральношовных труб МИННЕФТЕГАЗСТРОЯ в 1987 г. из Ст10 с винтовым гофром высотой 26 мм и углом наклона к продольной оси 68°.

Применение самокомпенсирующихся труб имеет следующие преимущества: полностью отпадает необходимость в установке специальных компенсирующих устройств (П-образных, сальников и т.п.); повышается надежность трубопроводов за счет непрерывности компенсации продольных деформаций; резко уменьшаются число и размеры неподвижных опор в связи со значительным (до 8-10 раз) снижением в трубопроводе действующих продольных усилий; упрощается проектирование трубопроводов; создается возможность осуществления полностью бесканальных прокладок трубопроводов тепловых сетей; создаются условия для более высокого уровня механизации и блочности при строительстве трубопроводов.

Применение подобных типов конструкций не получило широкого распространения из-за дороговизны изготовления. Поэтому в мировой

практике применяются сварные трубы, изготовленные традиционным способом.

В отечественной и зарубежной практике для магистральных трубопроводов газа, нефти и нефтепродуктов используются трубы большого диаметра: прямошовные диаметром от 426 до 1620 мм с толщиной стенки от 5 до 45 мм и длиной от 6 до 18 м, и спиральношовные диаметром от 529 до 2500 мм с толщиной стенки от 3 до 25 мм и длиной от 12 до 24 м, которые сваривают в основном способом дуговой сварки под слоем флюса.

Производство сварных прямошовных труб большого диаметра включает в себя следующие операции: подготовка металла, подгибка кромок листа, формовка заготовок, сварка заготовок, отделка труб [18].

Существуют следующие способы производства труб большого диаметра, сваренных дуговой электросваркой под слоем флюса [19]:

- а) из одного листа с формовкой заготовок на мощных прессах с обжатием заготовок по периметру (производство труб по схеме UOE);
- б) из двух полуцилиндров с формовкой полуцилиндров на прессах с обжатием их по периметру;
- в) из двух полуцилиндров с формовкой полуцилиндров на непрерывном валковом стане без обжатия их по периметру;
- г) из одного листа с формовкой заготовок на листогибочной машине (производство труб по схеме RBE);
- д) из предварительно сваренных «карт» с формовкой на вальцах (производство труб по схеме RBE);
- е) из одного листа с формовкой заготовок свободным гибом на прессе с широким пуансоном (производство труб по схеме JCOE);
- ж) из одного листа с формовкой заготовок свободным гибом на прессе с узким пуансоном (производство труб по схеме JCOE);
- з) из листов, гибка которых осуществляется в непрерывном трубоформовочном стане;

и) из листов мерной длины в непрерывную полосу с последующей формовкой и сваркой спиральным швом.

В отечественной практике для строительства нефте- и газопроводов наибольшую применяемость получили прямошовные трубы.

Кроме способа производства труб с использованием листогибочных машин (схема производства RBE) первой операцией формовки является подгибка кромок листа. При использовании формовки труб с помощью листогибочной машины подгибка кромок может осуществляться в зависимости от технологической линии как до формовки, так и после формовки.

Подгибка кромок предназначена для формирования заданного радиуса на расстоянии до 400 мм от края продольной кромки [20]. Используют два метода подгибки: с помощью профильных роликов и прессы.

При использовании профильных роликов для подгибки листа, лист пропускают через одну или несколько пар роликов. Недостатком этого метода является тот факт, что кромки в начале и в конце полосы деформируются лишь частично и, следовательно, получается профиль, отличающийся от профиля на остальной части листа. Это отклонение может привести при последующей сварке к многочисленным дефектам, поэтому распространение получил способ подгибки кромок на прессе. В этом случае обеим кромкам листа в штампе придают кривизну необходимого радиуса.

Использование прессов обеспечивает высокое качество подгибки кромок, т.к. величина плоских участков не превышает 1,0-1,5 толщины стенки листового металла [20].

До недавнего времени в практике использовались пресса с однорадиусными штампами. В этом случае радиусы штампов выбирались исходя из диаметра трубы для некоторого диапазона толщин стенок [21]. Преимуществом таких штампов является простота изготовления инструмента. Основным недостатком является большой парк штампов.

Расчету настроечных параметров таких прессов и влиянию технологических параметров на подгибку кромок было посвящено множество публикаций [21-24].

В последние годы большое распространение получили прессы со штампами с профилем, выполненным по эвольвенте [25-32]. Основным недостатком таких прессов является сложность изготовления штампов, однако количество штампов в этом случае может достигать до 5 пар на весь размерный ряд труб диаметром от 508 мм до 1420 мм [33]. Рядом авторов были предложены методики расчета настроечных и технологических параметров для таких прессов [34-43].

После подгибки кромок лист подается на гидравлический пресс предварительной формовки, где ему придается U-образный профиль, радиус которого находится в определенном соотношении с радиусом готовой трубы, а боковые стороны параллельны [44-49]. Лист укладывают на две опоры прессы и пуансоном продавливают его между ними. Радиус гибки листа определяется, с одной стороны, конструкцией пуансона прессы, а с другой – расстоянием между опорами.

На втором прессе, верхний и нижний столы оснащены инструментом полукруглой формы, длина которого равна длине трубы. Радиус инструмента соответствует радиусу получаемой трубной заготовки.

Изучение процесса формовки по данному способу отражено в работах таких авторов как: Матвеев Ю.М., Жуковский Б.Д., Чекмарев А.П., Шевакин Ю.Ф., Чечулин Ю.Б. и других [50-55].

В России такой способ получения труб используют на Выксунском металлургическом заводе и на Челябинском трубопрокатном заводе.

Формовку в вальцах осуществляют при производстве дуговой сваркой под слоем флюса [56]. При гибке в вальцах лист изгибается между тремя валками. Установкой верхнего вала относительно нижних регулируется диаметр формируемой заготовки; диаметр верхнего вала определяет минимальный диаметр формируемой заготовки. Лист изгибается в вальцах

последовательно несколько раз до получения заданной формы. В России такой способ получения труб используют на Волжском трубном заводе.

При формовке в трехвалковых вальцах практически невозможно получать заготовку строго цилиндрической формы, так как края листа на участке, равном половине расстояния между неприводными валками, остаются прямолинейными [57, 58]. При формовке в четырехвалковых вальцах за счет соответствующей установки крайних неприводных валков получают заготовку более правильной формы. Для улучшения геометрической формы трубной заготовки применяют также предварительную формовку краев заготовки на валковом формовочном стане или прессе, или наоборот последующую доформовку плоских участков на валковом стане.

В последние годы на рынке производства сварных труб большого диаметра применяются трубы изготовленные с использованием процесса шаговой формовки [59]. В России такой способ получения труб используют на Выксунском металлургическом заводе, Челябинском трубопрокатном заводе и на Ижорском трубном заводе.

Процесс шаговой формовки осуществляется следующим образом. После формовки на кромкогибочном прессе лист с предварительно обработанными и загнутыми кромками устанавливается манипуляторами в положение гибки на трубоформовочном прессе и подвергается процессу поэтапной формовки по всей длине с помощью пуансона, размеры которого выбираются в соответствии с размерами готовой трубы.

На первом этапе 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 другой стороны, после которой листовая заготовка получает С-образный профиль и на последней стадии – О-образный профиль сформованной трубы с открытым швом; труба имеет достаточно круглую форму с плоскопараллельными кромками.

Процесс пошаговой формовки труб выделяется особенной гибкостью в отношении диаметра, толщины стенки и трубного проката.

Основным производителем прессового оборудования для производства прямошовных одношовных труб для магистральных газопроводов диаметром ≥ 508 мм по схеме JCOE является фирма «SMS Meer».

С применением такого процесса возможно производство труб для строительства морских трубопроводов [60-62].

Теоретические исследования процесса шаговой формовки отражены в работах: Самусева С.В., Шинкина В.Н., Коликова А.П. и др. [63-71].

В зависимости от диаметра трубы также выбирается и количество шагов. Рациональный выбор количества шагов при формовке был предложен в работе Шинкина В.Н. [72]. Если же количество шагов меньше расчетного значения, то между формируемыми шагами неизбежно образуются прямолинейные участки.

Поскольку каждый лист имеет некоторые расхождения по механическим свойствам, разную толщину, то неизбежен и индивидуальный подход к величине хода пуансона на каждом шаге для достижения требуемой геометрии трубной заготовки. Неправильный выбор хода пуансона на последующем шаге может привести к образованию некачественной продукции по геометрическим параметрам. Решение данной проблемы было предложено с помощью измерения радиуса трубной заготовки в момент формовки и корректировки хода пуансона на следующем шаге в режиме он-лайн [73].

1.3 Дефекты 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 2000-х годах был разработан проект межотраслевого стандарта «Классификатор дефектов стальных газонефтепроводных труб» [15].

Согласно классификатору, дефекты сварных труб по технологическим признакам классифицируются на 4 группы:

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

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

3 группа – геометрические отклонения в трубах по диаметру, толщине стенки, прямолинейности, овальности, смещению свариваемых кромок, размерам сварного шва и др.

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

Классификация дефектов первой группы и причины их происхождения более подробно описаны в работе Правосудович В.В. [74].

Дефекты по второй группе могут образовываться как на заводе изготовителя листа, так и на заводе производителя труб, а также при транспортировке полуфабрикатов и готовой продукции [75]. Дефекты второй группы могут быть удалены механическим способом или отрезкой дефектного участка.

Геометрические отклонения в трубах закладываются в заготовках. Основными показателями качества заготовок являются:

- а) постоянство периметров на длине заготовки;
- б) прямолинейность и параллельность кромок;
- в) отсутствие плоских участков вдоль кромок;

г) отсутствие резких перегибов (изломов) профиля заготовки.

Обеспечение этих показателей оказывает решающее влияние на качество выполнения последующих операций.

Влияние на качество сварки оказывает прямолинейность кромок, которая зависит от технологически правильного выполнения подготовительных операций. Волнистость кромок может образоваться в процессе формовки, особенно в случае применения валковых кромкогибочных машин. В таких машинах в процессе подгибки кромок листа может происходить их частичная вытяжка в продольном направлении, в результате чего удлиненные по сравнению с остальной частью листа кромки искривляются. При сборке и сварке таких заготовок неизбежно возникают превышения кромок, значительно усложняющие процесс сварки. Превышение кромок сказывается также на операциях отделки труб, особенно в случаях применения операции экспандирования. Применение этой операции требует снятия усиления до остаточной величины 0-0,5 мм, что в случае смещения кромок не может быть осуществлено.

Непараллельность кромок заготовок является, как правило, следствием неправильной отладки операции формовки и приводит к усложнению техники сварки труб, однако в случае значительных искажений формы возможно и образование различных дефектов сборки и сварки: зазоров, превышений и т.д.

Серьезным дефектом формовки является образование плоских участков, прилегающих к продольным кромкам заготовок. Из-за наличия таких плоских участков при сборке или сварке заготовок кромки располагаются не в одной касательной плоскости, а под углом друг к другу, при этом образуется дефект – отклонение от теоретической окружности в зоне сварного шва. Образование отклонения от теоретической окружности нарушает плотность прилегания кромок при сварке, что может вызвать протечи металла шва и прожоги. Значительно усложняется и техника сварки заготовок с отклонением по теоретической окружности. В процессе калибровки концов, а также раздачи труб происходит исправление данного дефекта. При этом внутренние слои

металла сварного соединения пластически растягиваются, что иногда приводит к надрывам в зоне термического влияния или в центральной части шва. Эти явления усугубляются тем, что в результате остывания швов после сварки трубы овализируются торцы труб таким образом, что большая ось овала располагается в направлении диаметра, проходящего через шов, т.е. угол между плоскими участками уменьшается [2, 76, 77]. Таким образом, при сварке и отделке труб зона термического влияния сварного соединения подвергается попеременно деформации сжатия и растяжения, что еще больше увеличивает вероятность образования надрывов при калибровке концов труб.

Касаясь влияния овальности заготовок, следует отметить, что, казалось бы, наиболее целесообразной для процесса является правильная цилиндрическая форма. Но, учитывая последующую операцию экспандирования труб и искажение их формы после сварки, некоторая овальность в горизонтальном направлении не только не вредна, но даже желательна [53, 78]. Поэтому стремление получить заготовку исключительно круглой формы неоправданно и может привести только к излишнему усложнению процесса формовки, и других технологически процессов.

Приведенный анализ взаимосвязи технологических операций производства труб показывает, что качество формовки и, следовательно, выбор технологии и оборудования для осуществления этой операции являются одним из решающих условий получения высококачественных сварных труб большого диаметра.

Все основные способы сварки выполняются при местном нагреве свариваемого изделия сварочными источниками тепла [18]. От температурного состояния объемов металла в месте сварки и распределения температур в свариваемом изделии зависит качество сварных соединений: прочность, пластичность, ударная вязкость металла шва и прилегающих к месту сварки участков металла, а также в ряде случаев и другие особые свойства металла.

Неправильные режимы нагрева и охлаждения труб в условиях сварки могут привести к появлению различных дефектов сварных соединений: трещин, непроваров, подрезов и пр., а также к повышению деформаций и напряжений в сварном соединении.

Большая часть выделяемого при сварке тепла удаляется в свариваемый металл через околошовные участки. Относительно небольшая часть тепла рассеивается в окружающую среду.

В зависимости от реальных условий процесса сварки, скорости нагрева и охлаждения максимальные температуры могут изменяться в очень широких пределах.

Изменение геометрии трубной заготовки в процессе сварки и после нее может привести к появлению недопустимого значения по прямолинейности заготовки.

Исправление кривизны осуществляется на механическом экспандере. Способы исправления кривизны были предложены в различных изобретениях и полезных моделях [79-85]. Кроме кривизны на экспандере осуществляется изменение овальности трубы и придания правильной цилиндрической формы в зоне сварного шва (отклонения от теоретической окружности). Механизм изменения овальности выполняется при помощи изменения высоты опорного ролика [78]. Овальность труб с торцов можно исправить с помощью гидравлического домкрата [86].

Таким образом, значительное влияние бездефектности сварных труб большого диаметра оказывают операции формовки, от исполнения которых зависят многие показатели качества готовой продукции.

1.4 Выводы и постановка задач исследования

Анализ научно-технической литературы, нормативно-технической документации и патентных документов, посвященных требованиям

предъявляемых к трубе, способам производства труб большого диаметра и критериям качественных показателей, позволил сделать следующие выводы:

1. Дальнейшее развитие производства сварных труб связано не только с повышением геометрических требований, но и классом прочности труб, вязкости сталей. Помимо повышения механических свойств трубных сталей, необходимо совершенствовать технологию получения трубных сталей.

2. Из всех традиционных способах производства труб наиболее перспективным является схема с использованием прессы шаговой формовки. Данная схема позволяет получать трубы с большим диапазоном диаметров и толщин стенок. Кроме того, с использованием этого процесса возможно производство труб предназначенных для строительства морских трубопроводов.

3. В литературных источниках расчеты настроечных и технологических параметров процессов подгибки кромок листа и шаговой формовки трубы освещены мало. Отсутствует описание связи между этими процессами.

4. Наличие геометрических отклонений выше установленного допуска на трубной заготовке может привести к переводу труб в пониженное качество либо в окончательный брак. Так, например, для получения качественного сварного соединения помимо технологических режимов сварки необходимо получение качественной трубной заготовки. Наличие дефекта отклонения от теоретической окружности в основном обусловлено технологией подгибки кромок.

В связи с вышеуказанным, предлагаются следующие направления совершенствования теоретических и технологических приемов повышения геометрических показателей трубных заготовок:

1. Исследование причин возникновения дефектов, связанных с операциями формоизменения трубных заготовок;

2. Разработка технических решений, способствующих снижению образования геометрических дефектов;

3. Разработка теоретических основ по расчету процессов подгибки кромок листа и шаговой формовки трубной заготовки.

На основании сделанных выводов поставлены следующие конкретные задачи исследования:

1. Разработать теоретические основы для создания методики по определению технологических параметров настройки прессы подгибки кромок, а также для определения значений контролируемых параметров трубной заготовки.

2. Разработать теоретические основы для создания методики по определению технологических параметров настройки прессы шаговой формовки, а также для определения значений контролируемых параметров трубной заготовки.

3. Разработать новые технические решения, обеспечивающие снижение вероятности образования геометрических дефектов на трубах большого диаметра.

4. Численно реализовать разработанные методики в программном продукте.

5. Провести адаптацию программного продукта при изготовлении опытных партий труб.

2 Анализ технологического процесса производства труб большого диаметра в условиях Челябинского трубопрокатного завода

Современные цехи по производству сварных труб большого диаметра отличаются разнообразием технологических схем получения труб, применяемым объемно-планировочным решением, развитой отделкой и системами контроля качества выпускаемой продукции. В ряде случаев в состав этих цехов входят участки нанесения на трубы защитных антикоррозионных покрытий.

На Челябинском трубопрокатном заводе существует два цеха по производству труб большого диаметра.

В трубоэлектросварочном цехе № 6 (ТЭСЦ №6) производят сварные прямошовные трубы диаметром от 530 до 820 мм с толщиной стенки от 8 до 12 мм и сварные душовные трубы размером от 1020 до 1220 мм с толщиной стенки от 12 до 22 мм. Объем производства до 400 тыс. тонн/год. Для формовки труб в ТЭСЦ №6 применяется формовка с использованием способа УО.

Трубоэлектросварочный цех «Высота 239» (ТЭСЦ «Высота 239») выпускает сварные одношовные трубы размером от 508 до 1420 мм с толщиной стенки от 8 до 48 мм. Общий объем производства до 600 тыс. тонн/год. Для формовки труб в цехе применяется шаговая формовка.

2.1 Технологическая линия в ТЭСЦ «Высота 239»

На рисунке 1 представлена общая схема производства труб диаметром от 508 до 1420 мм в ТЭСЦ «Высота 239».

Задача листа осуществляется на участке ввода листа на линию. После этого листы подвергаются автоматизированному контролю геометрии. При соответствии геометрических параметров, листовой прокат, прошедший

контроль, направляют для прохождения дальнейших технологических операций.

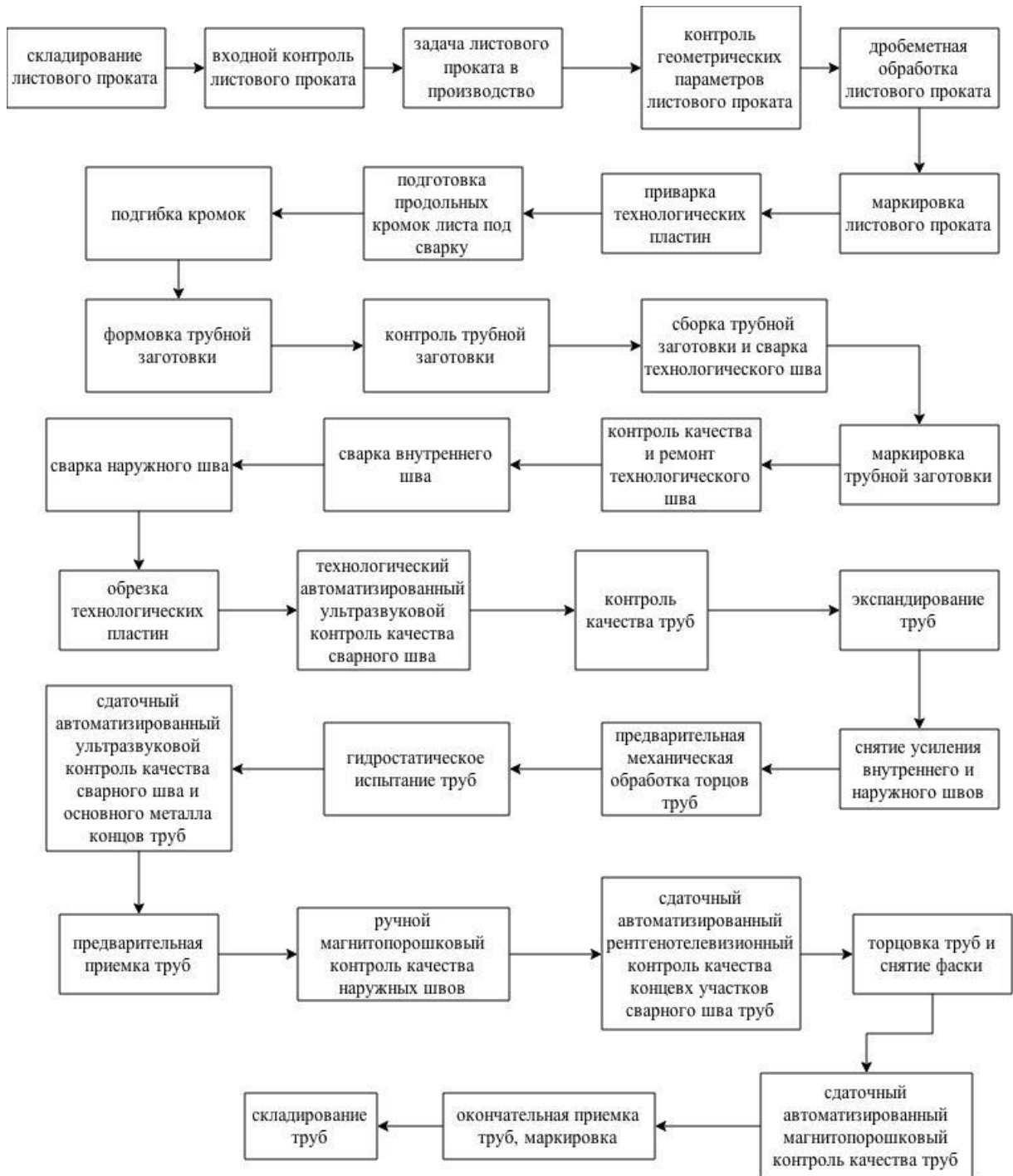


Рисунок 1 – Технологическая схема производства труб большого диаметра в ТЭСЦ «Высота 239»

Следующая операция предназначена для очистки поверхности листа. После очистки на лист наносят автоматическим способом маркировку и в дальнейшем направляют на станцию по приварке технологических пластин.

Приварку пластин выполняет электросварщик на автоматических и полуавтоматических машинах автоматической сваркой в смеси углекислого газа и аргона. После приварки технологических планок лист направляют на кромкофрезерную установку. На кромкофрезерной установке осуществляется подготовка продольных кромок листа под сварку. В качестве металлорежущего инструмента применяются специальные дисковые фрезы. Параметры фаски приведены на рисунке 2.

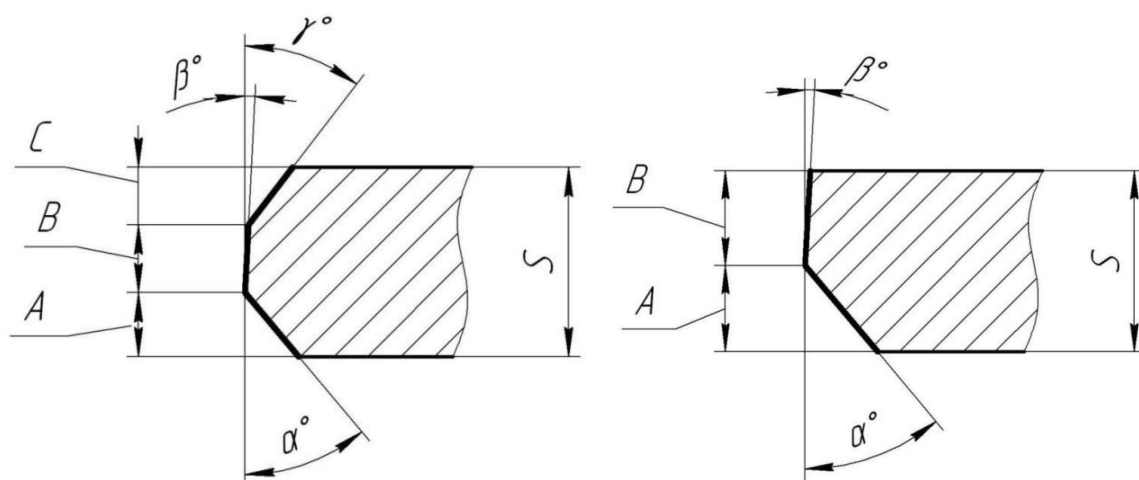


Рисунок 2 – Профиль фаски на продольной стороне листа (слева для толщин стенок листа $S > 14$ мм, справа для толщин стенок листа $S \leq 14$ мм)

где $A, B, C, \alpha, \beta, \gamma$ – геометрические параметры фаски.

Фрезерованные листы поступают на кромкогибочный пресс [87]. Общий вид пресса представлен на рисунке 3. Процесс подгибки кромок листа является неотъемлемой частью технологического процесса пошаговой формовки при производстве электросварных прямошовных труб большого диаметра. Он обеспечивает требуемую геометрию боковых кромок трубной заготовки по всей длине. Процесс выполняется методом формовки листа на специальном оборудовании – кромкогибочном прессе с использованием специального инструмента. Пресс развивает достаточное усилие, необходимое для пластического деформирования металла листа и сохранения в дальнейшем формы кромки листа, заданной инструментом.



Рисунок 3 – Общий вид пресса подгибки кромок [88]

На рисунке 4 представлены этапы процесса подгибки кромки на кромкогибочном прессе.

Технология гибки листа заключается в следующем: после позиционирования листа для проведения отгибания система управления запускает рабочий цикл пресса (рисунок 4-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 (рисунок 4-б). Далее, зажимные цилиндры создают необходимое для зажатия усилие, и гидросистема пресса поддерживает это усилие до окончания гибки. После достижения необходимого давления при зажатии листа рабочие цилиндры продолжают перемещать гибочные балки дальше, при этом происходит процесс отгибания листа нижним инструментом по контуру верхнего инструмента. Формовка продолжается до тех пор, пока усилие гибки

не достигает установленного значения (рисунок 4-в). Гидросистема выдерживает давление на протяжении определенного времени и затем разгружает гибочные балки, опуская их в исходное положение. После этого гидросистема производит разгрузку зажимных балок, опуская их в исходное положение (рисунок 4-г). Подъемные ролики синхронно с балками опускают лист на уровень подводящего и отводящего рольгангов. После этого лист перемещается на следующий шаг отгибания.

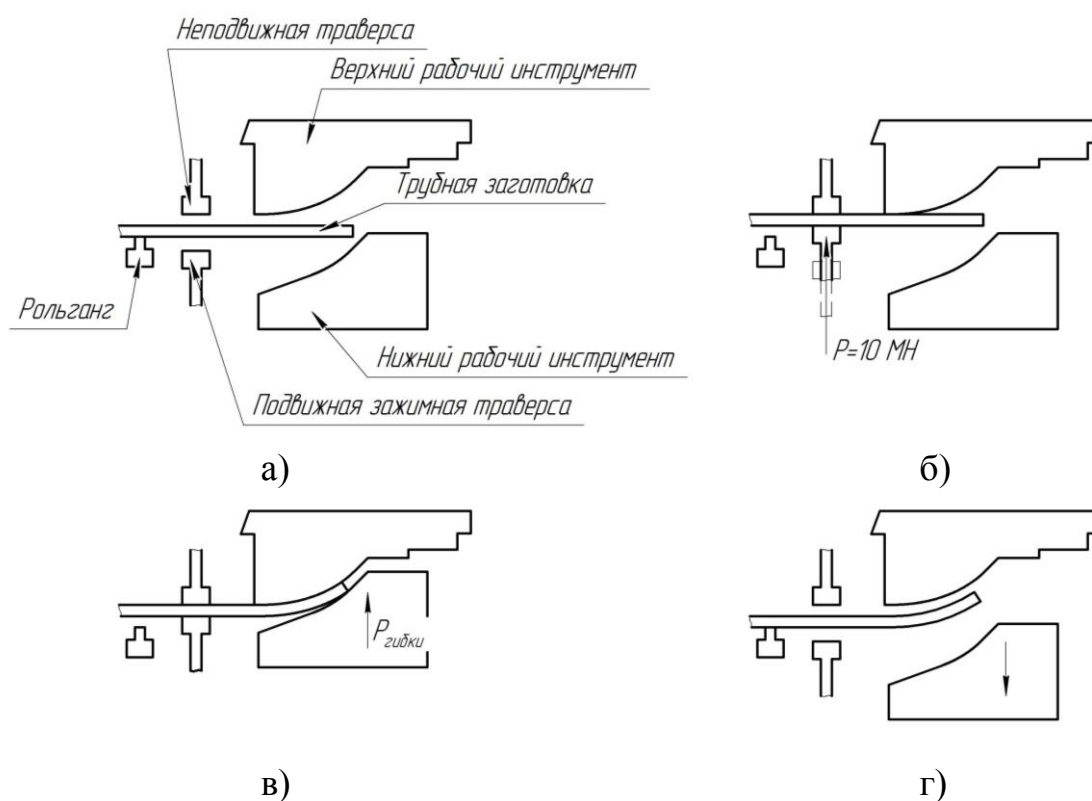


Рисунок 4 – Этапы процесса подгибки кромки на кромкогибочном прессе: а) лист перемещается по рольгангу в зону гибки на прессе; б) фиксируется неподвижно с помощью зажимной траверсы; в) с помощью верхнего и нижнего инструмента кромка листа формируется; г) кромка принимает требуемую форму по геометрическим параметрам, процесс закончен.

В таблице 1 представлены технические характеристики кромкогибочного пресса.

Таблица 1 – Технические характеристики кромкогибочного пресса

Параметр	Величина
Усилие пресса (на один блок)	40 МН
Зажимное усилие	10 МН
Рабочее давление	max 315 бар
Ход гибочной балки	max 300 мм
Ход зажимной балки	max 160 мм
Длина отгиба	4.500 мм
Перемещение правого пресса	2.560 мм
Перемещение левого пресса	2.560 мм
Скорость гибки	4.5 мм/с (при максимальном усилии пресса)
	11 мм/с (при минимальном усилии пресса)

Формовку листовой заготовки для получения заданного профиля заготовки трубы производят на прессе шаговой формовки (рисунок 5). Изгиб исходной заготовки выполняют по всей длине плоской части листа последовательными шагами от подогнутых кромок к середине сначала с одной, затем с другой стороны листа.

При этом формируется полуцилиндр на одной стороне листа, затем формируется полуцилиндр на противоположной стороне листа. Специальные манипуляторы перемещают лист на всех шагах формовки. Сформованная трубная заготовка по отводящему рольгангу передается на сборочно-сварочный стан.

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 и др.

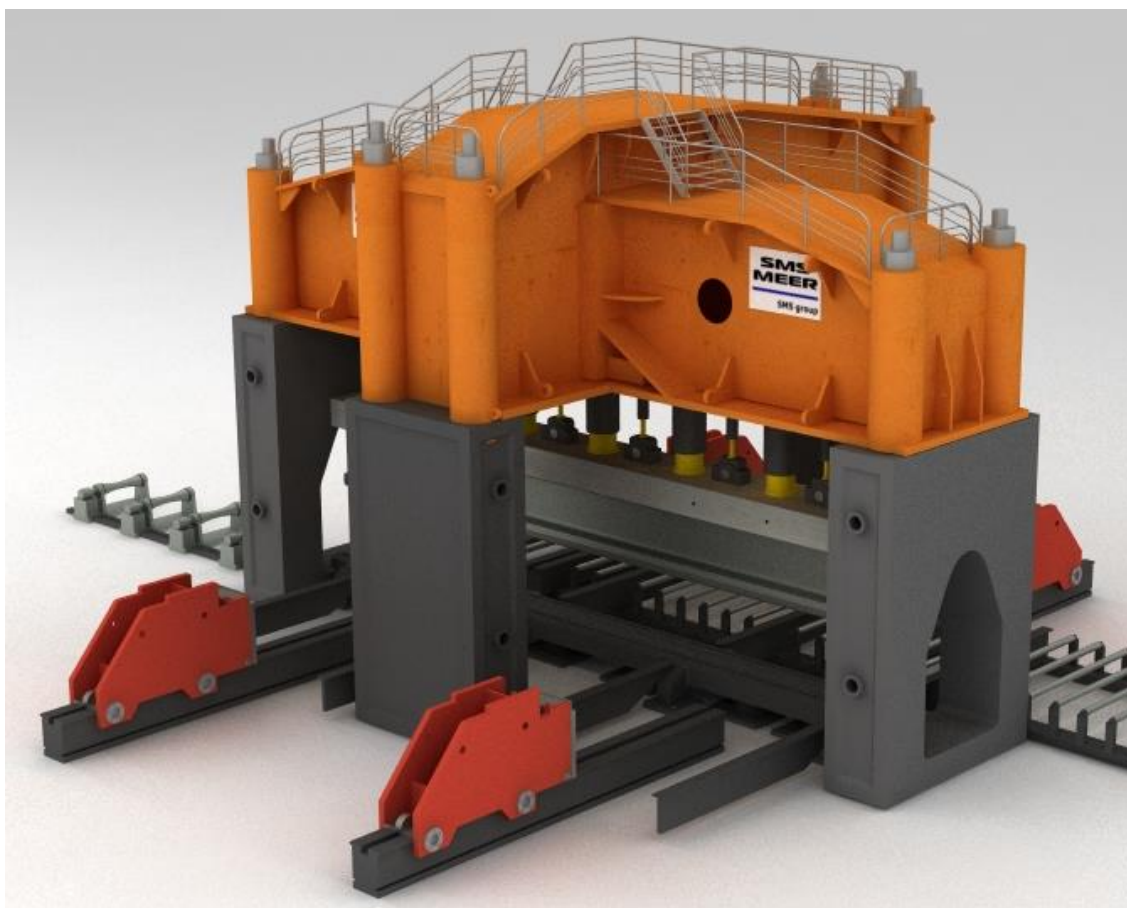


Рисунок 5 – Общий вид пресса шаговой формовки труб

Расстояние между бойками регулируют промежуточными пластинами.

Верхний инструмент подбирают на заданный диапазон типоразмеров труб [89, 90]. Широкий диапазон изменения различных параметров очага деформации позволяет с помощью однорадиусного инструмента получать диапазон типоразмеров труб.

Технические характеристики пресса шаговой формовки представлены в таблице 2.

Полученные трубные заготовки выборочно контролируют на участке выборочного контроля труб, находящемся по технологической цепочке после

пресса шаговой формовки труб. Затем трубную заготовку направляют на сборочно-сварочный стан.

Таблица 2 – Техническая характеристика пресса шаговой формовки

Параметр		Величина
Погонное усилие формовки при рабочей длине 19,0 м при рабочей длине 12,5 м	max	5,2 МН/м
	max	100,0 МН
	max	65,0 МН
Рабочее давление	max	315 бар
Давление цилиндра прессования	max	280 бар
Ход гибочной балки		360 мм
Диаметр трубы	min	508,0 мм
	max	1 422,0 мм

Целью сборочно-сварочного стана является сборка кромок и сварка технологического 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 [91, 92].

Автоматическую сварку технологического шва выполняют электросварщики труб на стане в смеси углекислого газа и аргона.

Калибр сборочно-сварочного стана включает 9 балок с установленными на них роликами: две из которых располагаются внизу трубной заготовки и фиксируются неподвижно; четыре балки в средней части профиля трубной заготовки имеют возможность радиального перемещения; две балки расположенные в верхней части трубной заготовки имеют возможность радиального перемещения и угла поворота, обеспечивают устранение зазора по длине трубы и требуемую овализацию заготовки под угол схождения

кромки; верхняя балка направляет и доформовывает кромки, обеспечивает заданное положение кромок по высоте.

Собранную и сваренную заготовку осматривают, при необходимости ремонтируют технологический шов и направляют на участок сварки внутреннего шва. Сварку внутреннего шва выполняют электросварщики труб на стане автоматической сваркой под слоем флюса. Количество дуг в зависимости от толщины стенки может достигать четырех. Затем трубная заготовка перемещается на участок сварки наружного шва. Между участками происходит очистка трубы изнутри от шлаковой корки. Сварку наружного шва выполняют электросварщики труб на стане автоматической сваркой под слоем флюса. Количество дуг в зависимости от толщины стенки может достигать пяти.

После наружной очистки труб от шлаковой корки у сваренных труб отрезают технологические пластины. Затем каждая труба подвергается технологическому автоматизированному ультразвуковому контролю. Все трубы после сварки, неразрушающего контроля и очистки наружного и внутреннего шва подаются на площадку технологического контроля, где производится визуально-измерительный контроль качества труб и ручной ультразвуковой контроль участков сварного соединения и основного металла.

Для калибровки геометрических параметров трубы и обеспечения требований к величине наружного диаметра, овальности и кривизне производят экспандирование труб на механическом экспандере. Экспандирование производится в несколько шагов, с перекрытием предыдущего шага. 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.

После испытания на герметичность трубы подают на установку автоматического ультразвукового контроля сварного соединения. 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, после чего трубы маркируют и передают на склад готовой продукции.

2.2 Статистический анализ качества производимых сварных труб большого диаметра

Как отмечалось выше в пункте 1.3 существенную роль в производстве качественных труб играет технология формовки труб, а также способы калибрования труб по внутреннему диаметру.

Анализ геометрических дефектов при производстве труб большого диаметра производился в условиях ТЭСЦ «Высота 239» Челябинского трубопрокатного завода.

В случае выявления геометрических дефектов таких, как: отклонение от теоретической окружности, кривизна, смещение кромок и др., трубы повторно направляются на операцию экспандирования. Поэтому для рассмотрения было взято количество труб повторно прошедших операцию экспандирования (рисунки 6-8). Статистические данные были собраны в период с 2010 по июнь 2014 гг. в количестве 200 тысяч труб. В расчетах не учитывался сортамент, если суммарное количество произведенных труб не превышало 50 шт. По результатам анализа было выявлено, что при увеличении толщины стенки доля геометрических дефектов в общем количестве произведенных труб снижается. Также характерно и снижение геометрических дефектов при увеличении диаметра трубы. Однако есть случаи, в которых резко увеличивается доля геометрических дефектов, к таким относятся сортамент труб:

- 1) диаметр 559 мм с толщиной стенки 15,9 мм;
- 2) диаметр 820 мм с толщинами стенок от 9 до 11 мм;
- 3) диаметр 1220 мм с толщинами стенок от 12 до 13 мм.

Наибольшее количество геометрических дефектов на рассматриваемых типоразмерах труб наблюдается на сортаменте диаметром 559 мм – более 10%.

Первой наиболее вероятной причиной столь высокого процента дефектов является нерациональный профиль кромкогибочной матрицы на прессе подгибки кромок листа. На практике подгибку кромок листа на сортаменте диаметром 820 мм и 1220 мм можно осуществить на двух различных гибочных матрицах. Причем в практике производства труб в интервале толщин стенок от 8 до 14 мм на диаметре 820 мм превалирует один профиль гибочной матрицы, а свыше 14 мм – второй профиль гибочной матрицы [33].

Подгибать продольную кромку листа при производстве труб диаметром 820 мм на одном инструменте возможно в следующих случаях:

- 1) при уменьшении радиуса кромки листа; тем самым увеличится вероятность образования протеклов на определенном диапазоне толщин стенок трубы при технологической сварке кромок и образования высоких швов;

- 2) при увеличении радиуса кромки листа; тем самым увеличится вероятность отклонение от теоретической окружности, так как при сварке внутреннего и наружного шва геометрия трубы изменяется [15, 77].

Аналогичная ситуация возникает на диаметре 1220 мм. Следовательно, в ходе исследования необходимо определить рациональный радиус кромки листа в зависимости от диаметра и толщины стенки.

Вторая наиболее вероятная причина связана с образованием превышения кромок на переднем и заднем конце трубы.

Это связано с тем, что при подгибке кромок технологические планки полностью не проформовываются из-за их небольшой ширины. При подгибке кромок в сварном соединении между технологической планкой и листом образуются большие напряжения, которые приводят к частичному разрушению сварного соединения (рисунок 9). В этом случае край технологических планок выступает за наружную поверхность трубной заготовки.

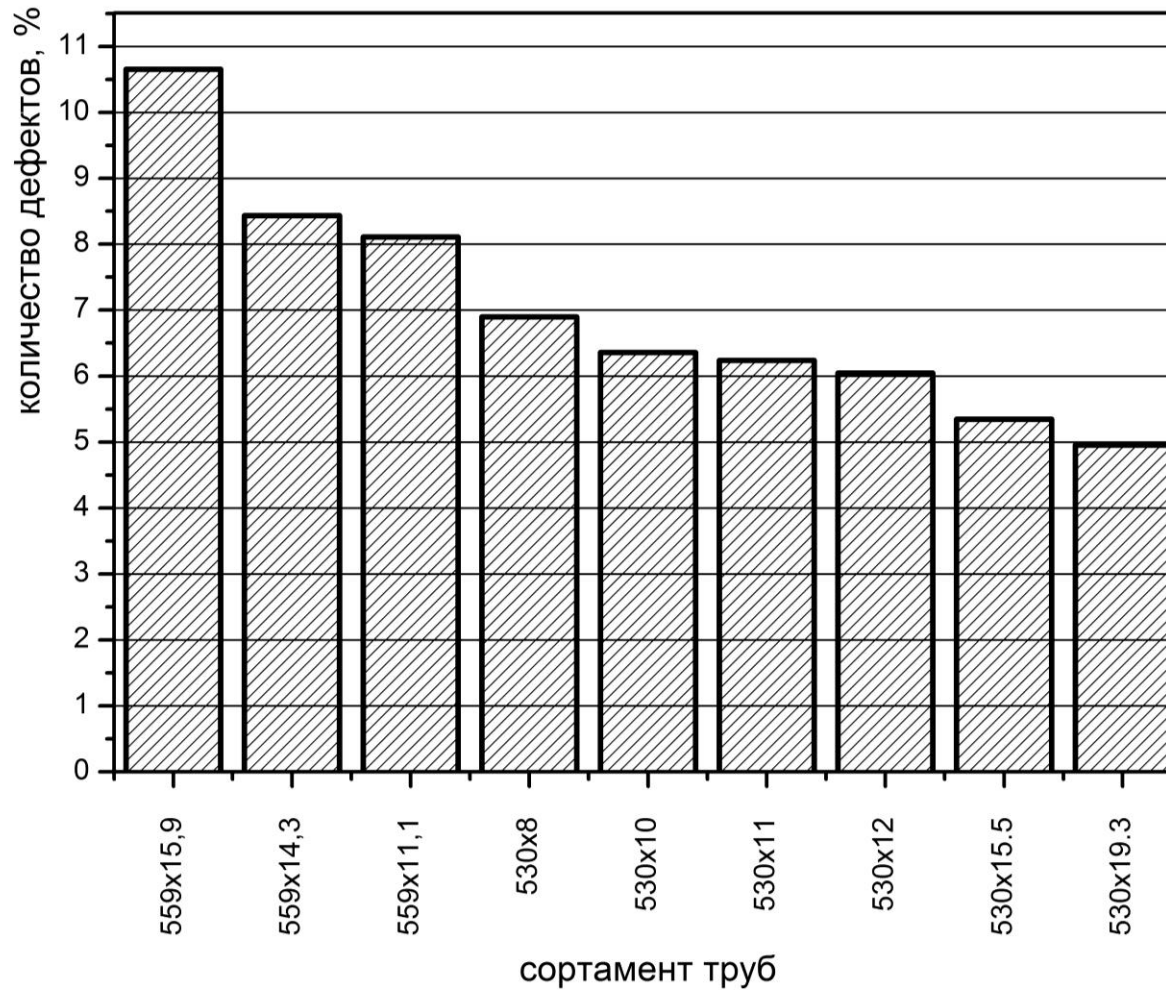


Рисунок 6 – Распределение дефектов в зависимости от сортамента труб диаметром от 530 до 559 мм

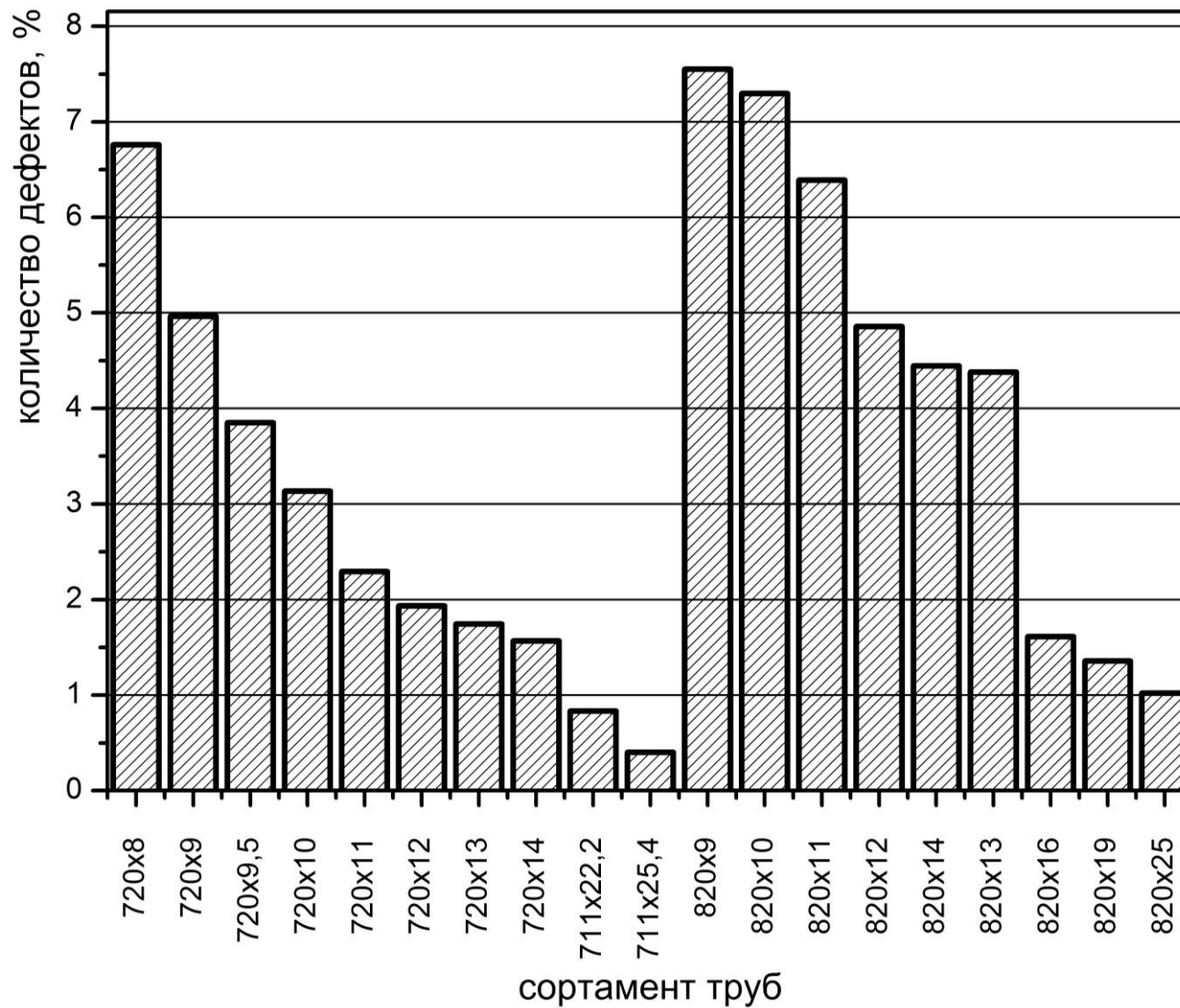


Рисунок 7 – Распределение дефектов в зависимости от сортамента труб диаметром от 720 до 820 мм

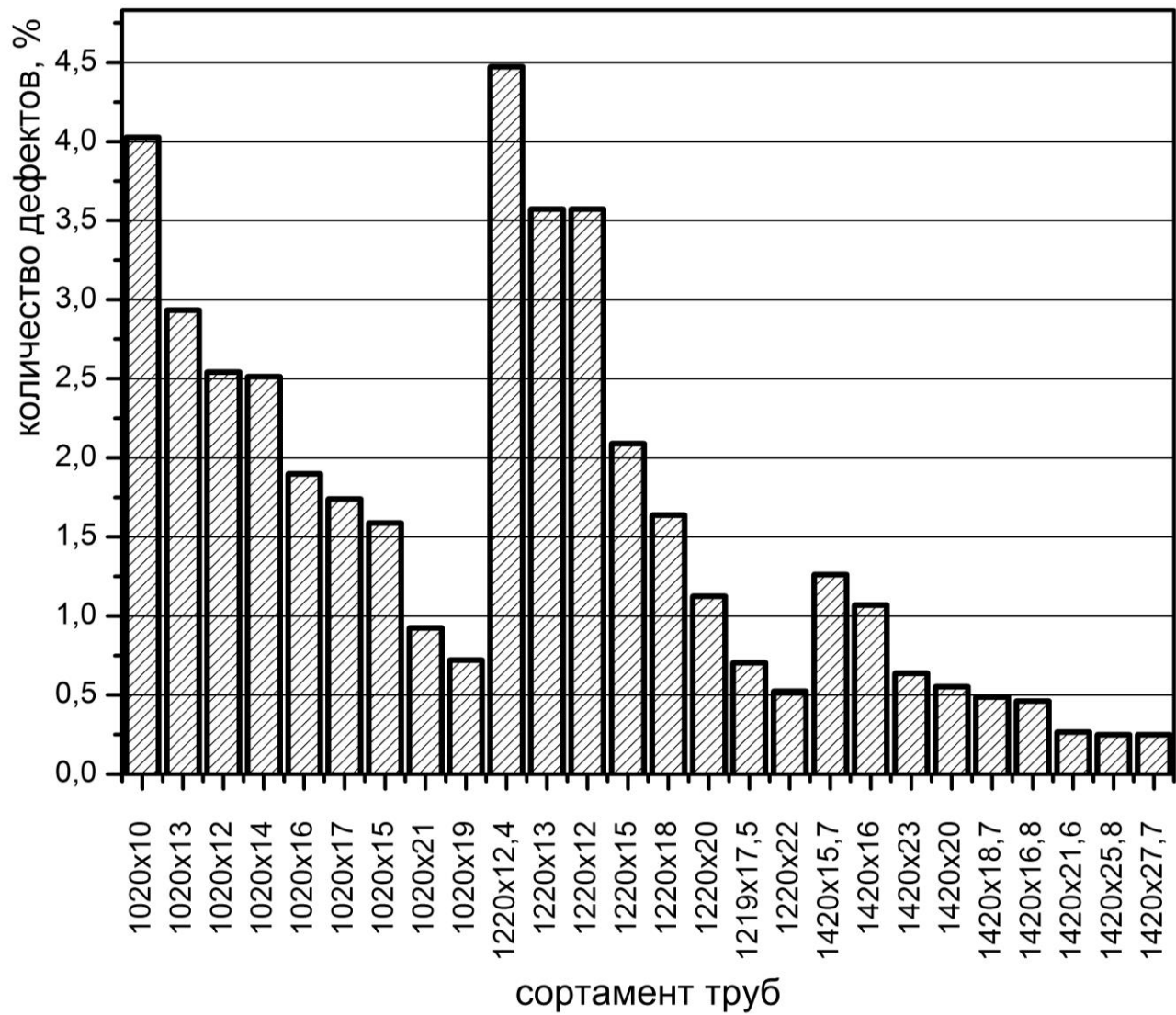


Рисунок 8 – Распределение дефектов в зависимости от сортамента труб диаметром от 1020 до 1420 мм

При сборке, и сварке трубной заготовки на сборочно-сварочном стане балки с роликами дополнительно деформируют металл при попадании на технологическую планку (рисунок 10). Такой процесс образования превышения в основном происходит на размере 720 мм, в связи с малыми углами верхних балок. Исключение причины образования превышения кромок на переднем и заднем торцах труб обеспечивается за счет изменения ширины технологической планки, либо за счет изменения угла верхних балок сборочно-сварочного стана.

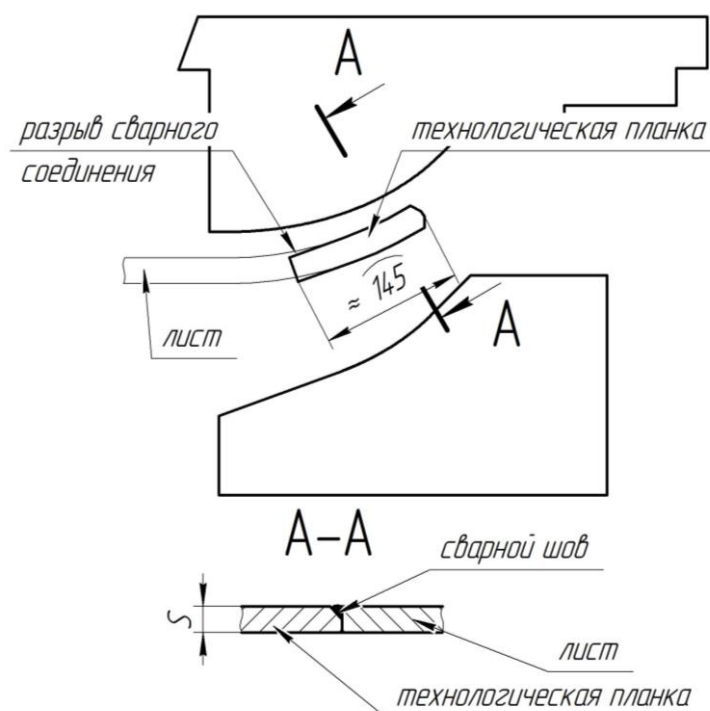


Рисунок 9 – Схема образования непроформованной технологической планки

Третья причина образования дефектов связана с образованием превышения кромок как по концам заготовки, так и по всей длине за счет приложения большого усилия на гибочные блоки. Образование таких дефектов характерно для труб с толщиной стенки до 14 мм. Кроме того, чрезмерное усилие может привести к местному изменению формы трубной заготовки по всей длине в донной части.

Четвертая причина образования дефектов связана с образованием превышения кромок в средней части трубной заготовки.

Также образование непараллельных кромок на трубной заготовке может привести к образованию отклонения от прямолинейности сварного шва относительно оси трубы.

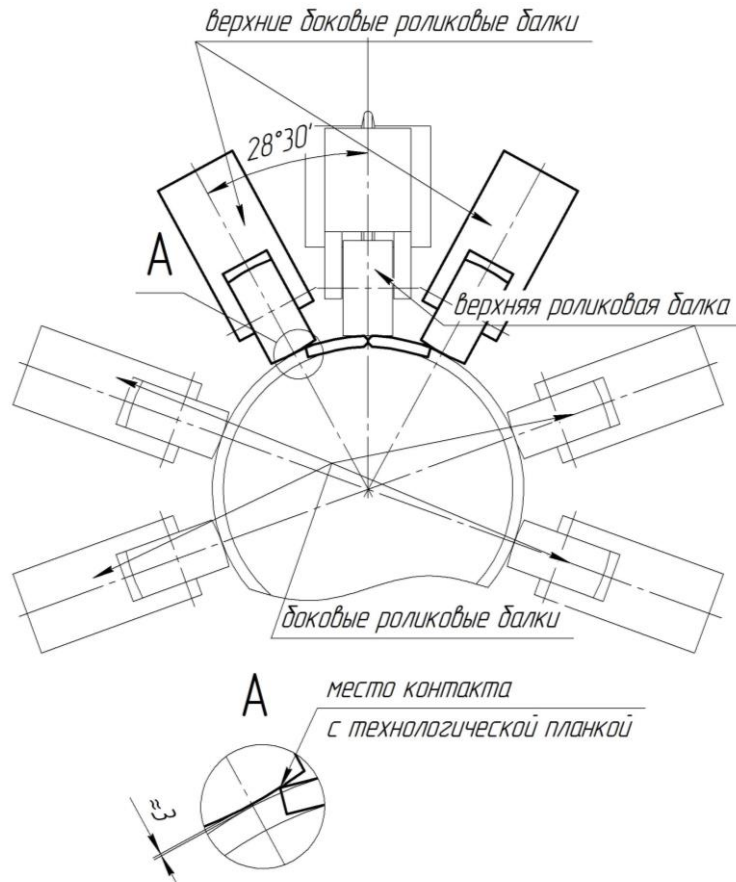


Рисунок 10 – Схема образования превышения кромок на переднем и заднем концах трубы с непроформованными технологическими планками. Расположение верхних боковых балок характерно для труб диаметром 720 мм

Следовательно, в ходе исследования необходимо определить возможные пути улучшения качества продольных кромок трубной заготовки на прессе шаговой формовки.

Как уже отмечалось в пункте 1.3 для трубных заготовок необходима овальность в горизонтальном направлении. Овальность трубной заготовки закладывается в основном на прессе шаговой формовки, а на сборочно-сварочном стане овальность незначительно уменьшается.

У трубной заготовки с зафиксированными малыми значениями

овальности на сборочно-сварочном стане наблюдалась повышенная кривизна труб (больше допустимого значения). У трубной заготовки с зафиксированными значениями овальности в вертикальном направлении наблюдалась повышенная кривизна как вдоль сварного шва, так и поперек сварного шва.

Следовательно, в ходе исследования необходимо определить и разработать основные взаимосвязи настроечных параметров и режимов прессы шаговой формовки при производстве труб большого диаметра.

2.3 Выводы

Изучение технологии производства труб большого диаметра в ТЭСЦ «Высота 239» на Челябинском трубопрокатном заводе, а также анализа качества производимых труб в ТЭСЦ «Высота 239», позволил сделать следующий вывод:

– основными дефектами трубной заготовки, проявляющимися в ходе процессов формоизменения, являются смещение кромок, отклонение от теоретической окружности, повышенная овальность. Отклонение от теоретической окружности может привести к переводу труб в пониженное качество, либо в окончательный брак. Смещение кромок может привести к дополнительной отбраковке труб. Повышенная овальность может привести к переводу труб в пониженное качество.

На основе анализа качества производимых труб в ТЭСЦ «Высота 239» предлагаются дополнительные направления для совершенствования технологических операций по формовке труб:

1. Разработка рациональных режимов подгибки кромок листа, позволяющих снижать уровень дефекта по отклонению от теоретической окружности;
2. Разработка рациональных режимов шаговой формовки, позволяющих улучшить прямолинейность продольных кромок трубной заготовки.

3 Математическое моделирование процесса подгибки кромок листа

При разработке технологического режима формоизменения листовой заготовки в трубную заготовку необходимо прогнозировать получаемую геометрию и учитывать ее в последующих расчетах.

Основными процессами формоизменения листовой заготовки в производстве труб большого диаметра являются:

- 1) формоизменение кромок листа;
- 2) формоизменение листа с подогнутыми кромками в трубную заготовку;
- 3) экспандирование геометрии готовой трубы.

Как уже отмечалось выше, экспандирование применяется после всех формоизменяющих и сварочных операций. Поэтому рассматривать этот процесс необходимо с учетом изменения геометрии трубной заготовки после сварки. В рамках работы процесс экспандирования труб не рассматривается.

В настоящее время при производстве труб большого диаметра на современных производствах используют ограниченное количество инструмента для подгибки кромок листа. В зависимости от ширины подгибаемого участка листа, механических свойств и толщины листа определяется конечная геометрия подогнутой части. Для определения высоты подогнутой части листа и усилий в зависимости от варьируемых параметров будет использован метод конечных элементов (МКЭ). Особенности использования метода конечных элементов подробно изложено в работах [93-95].

3.1 Введение системы координат

Для теоретического исследования процесса подгибки кромок используется прямоугольная система координат, которая в пространстве образуется двумя взаимно перпендикулярными осями OX , OY . Оси

координат пересекаются в точке O , которая является началом координат. Также для исследования процесса используются дополнительные системы координат образованные перпендикулярными осями O_1X_1 и O_1Y_1 , O_2X_2 и O_2Y_2 . Оси координат O_1X_1 и O_1Y_1 пересекаются в точке O_1 , которая расположена в начале эвольвентного профиля верхней гибочной матрицы. Оси координат O_2X_2 и O_2Y_2 пересекаются в точке O_2 , которая расположена в начале профиля нижней гибочной матрицы. Выбранное положительное направление указано стрелками на рисунке 11.

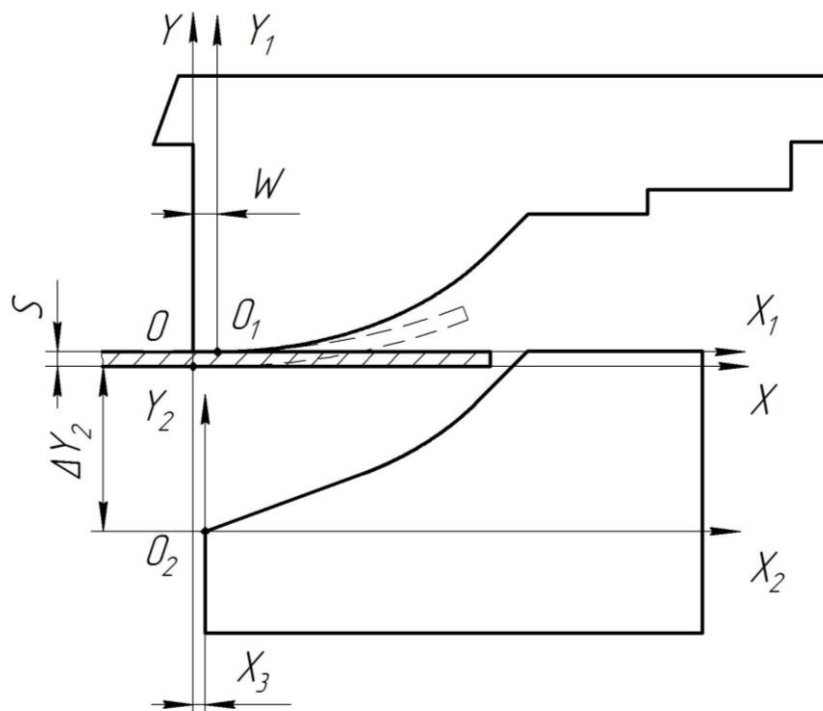


Рисунок 11 – Прямоугольная система координат для теоретического описания процесса подгибки кромки листа

Связь между XOY и $X_1O_1Y_1$ имеет вид:

$$\begin{cases} O_1X_1 = OX + W \\ O_1Y_1 = OY + S \end{cases}, \quad (1)$$

где W – прямолинейный участок на верхней гибочной матрице, мм;

S – толщина стенки листа, мм.

Связь между XOY и $X_2O_2Y_2$ имеет вид:

$$\begin{cases} O_2X_2 = OX + X_3 \\ O_2Y_2 = OY + \Delta Y_2 \end{cases}, \quad (2)$$

где X_3 – смещение нижней гибочной матрицы относительно верхней гибочной матрицы, мм;

ΔY_2 – расстояние до начального положения нижней гибочной матрицы, мм.

3.2 Введение системы допущений и упрощений

Для описания процесса подгибки кромок принимается следующая система допущений:

- 1) деформируемый металл 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 установлен центральный промежуточный рольганг, который поддерживает листовую заготовку от прогиба.

3.3 Разработка расчетной модели исследуемого процесса

Высота и радиус подогнутой части листа, усилие при подгибке кромок определяется рядом факторов, главными из которых являются: калибровка верхнего инструмента, геометрические параметры очага деформации, механические свойства исследуемого металла и др., см. рисунок 12.

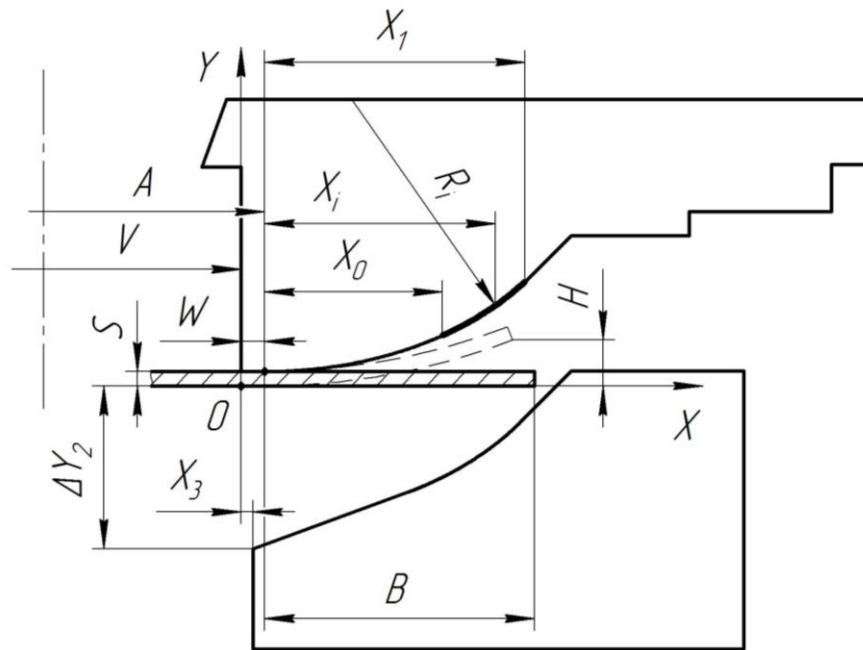


Рисунок 12 – Расчетная схема процесса подгибки кромок с граничными условиями

Определяющие параметры исследуемого процесса:

D – номинальный диаметр готовой трубы, мм;

H – высота подогнутой кромки листа, мм;

R_i – требуемый радиус заготовки при приложении нагрузки, мм;

X_i – местоположение требуемого радиуса, мм;

X_0, X_1 – начальная и конечная граница рабочего диапазона верхней гибочной матрицы, мм [33];

V – расстояние между торцами верхнего инструмента, мм [33];

ε – коэффициент деформации, %;

ε_r – коэффициент гибки, %;

σ_r – предел текучести, МПа;

σ_b – временное сопротивление, МПа;

E – модуль Юнга первого рода, МПа;

M – изгибающий момент, Н·м;

W_L – сопротивление сечения изгибу, мм³;

k – безразмерный коэффициент;

B – ширина подгибаемой части листа, мм [33];

A – расстояние между верхними гибочными матрицами в точке начала эвольвенты, мм [33];

b_1 – ширина нижней продольной фаски, мм [33];

R_0 – начальный радиус верхней гибочной матрицы, мм [33];

$R_{\text{экв}}$ – эквивалентный радиус верхней гибочной матрицы, мм [33];

φ – основной угол эвольвенты, рад [33];

P – погонное усилие нижней гибочной матрицы, Н/мм;

μ – коэффициент трения;

$\varepsilon_{\text{отн}}$ – относительная деформация крайних волокон в сечении;

δ_n – полное относительное удлинение при испытании металла листа на растяжение, %.

Для последующего выполнения анализа формоизменения кромки листа необходимо определить границы очага деформации.

3.4 Определение граничных условий процесса

Для определения границ очага деформации необходимо определить радиус после снятия нагрузки, а также радиус под нагрузкой.

Радиус боковой кромки листа после распружинения можно определить по следующему уравнению:

$$R = \frac{\frac{D - S}{1 + \varepsilon_r} - S}{2}. \quad (3)$$

Радиус подгибки кромок листа при нагружении определяется по формуле [96]:

$$R_i = \frac{R}{1 + \frac{2 \cdot M \cdot R}{W_L \cdot E \cdot S}}, \quad (4)$$

$$M = 1,5 \cdot W_L \cdot \sigma_\tau + 12 \cdot W_L \cdot k(\sigma_B - \sigma_\tau) \varepsilon_{\text{отн}}, \quad (5)$$

$$\varepsilon_{\text{отн}} = \frac{S}{2R_i}, \quad (6)$$

$$k = \frac{\sigma_B - \sigma_\tau}{125} \left(1,6 - \frac{\delta_n}{50} \right). \quad (7)$$

При определении значения $\varepsilon_{\text{отн}}$ необходимо знать величину R_i , которую предстоит рассчитать. Поэтому $\varepsilon_{\text{отн}}$ принимается приближенно равной от 0,02 до 0,4 [96]. После определения расчетного значения R_i в случае больших отклонений от принятых при расчете $\varepsilon_{\text{отн}}$ необходимо произвести повторный расчет с уточненным значением R_i .

По вычисленному радиусу R_i необходимо вычислить его местоположение на профиле гибочной матрицы (профиль выполнен по уравнению эвольвенты). Уравнение эвольвенты в декартовой системе координат представлено следующим образом:

$$\begin{cases} x(\varphi) = R_{\text{эКВ}} \cdot \cos(\varphi) + \varphi \cdot R_{\text{эКВ}} \cdot \sin(\varphi) \\ y(\varphi) = R_{\text{эКВ}} \cdot \sin(\varphi) - \varphi \cdot R_{\text{эКВ}} \cdot \cos(\varphi) \end{cases} \quad (8)$$

Для изготовленного инструмента, как правило, уравнение эвольвенты представляется в виде табличных данных. В качестве примера представлены данные для верхней гибочной матрицы №2 (таблица 3). Исходя из табличных

данных, можно вычислить аппроксимирующее уравнение связи горизонтальной проекции с радиусом эвольвенты.

$$X_i = 194,6 + 1,2 \cdot R_i - 7,8 \times 10^{-3} \cdot R_i^2 + 2 \times 10^{-5} \cdot R_i^3 - 3,8 \times 10^{-8} \cdot R_i^4 + 2,8 \times 10^{-11} \cdot R_i^5. \quad (9)$$

Определение коэффициентов аппроксимации выполнялось с помощью программного комплекса MathCad.

Таблица 3 – Узловые точки верхней гибочной матрицы №2

№	X, мм	Y, мм	R _i , мм	φ, град	№	X, мм	Y, мм	R _i , мм	φ, град
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0	421,66	0	25	120	18,79	332,89	18,53
2	5	0,03	418,39	0,68	26	125	20,51	328,50	19,44
3	10	0,12	415,10	1,37	27	130	22,32	324,03	20,38
4	15	0,27	411,78	2,06	28	135	24,23	319,46	21,33
5	20	0,48	408,43	2,76	29	140	26,23	314,80	22,30
6	25	0,75	405,05	3,47	30	145	28,33	310,03	23,30
7	30	1,09	401,64	4,18	31	150	30,53	305,16	24,32
8	35	1,48	398,19	4,90	32	155	32,85	300,16	25,36
9	40	1,94	394,72	5,62	33	160	35,28	295,03	26,43
10	45	2,47	391,21	6,36	34	165	37,82	289,76	27,53
11	50	3,06	387,66	7,10	35	170	40,49	284,34	28,66
12	55	3,71	384,07	7,85	36	175	43,29	278,75	29,83
13	60	4,44	380,44	8,60	37	180	46,22	272,98	31,03
14	65	5,23	376,77	9,37	38	185	49,31	267,01	32,28
15	70	6,09	373,05	10,15	39	190	52,54	260,82	33,57
16	75	7,02	369,29	10,93	40	195	55,95	254,37	34,91
17	80	8,02	365,48	11,73	41	200	59,53	247,64	36,32
18	85	9,09	361,62	12,53	42	205	63,30	240,60	37,79
19	90	10,24	357,70	13,35	43	210	67,29	233,19	39,34
20	95	11,47	353,73	14,18	44	215	71,50	225,35	40,97
21	100	12,77	349,70	15,02	45	220	75,98	217,02	42,71
22	105	14,15	345,60	15,87	46	225	80,75	208,10	44,57
23	110	15,61	341,44	16,74	47	230	85,85	198,45	46,58
24	115	17,16	337,20	17,63					

Ширина подгибаемого участка определяется по выражению [33]:

$$B = \frac{\left(R_0 + \frac{S}{2}\right)^2 - \left(R_i + \frac{S}{2}\right)^2}{2 \cdot R_{\text{ЭКВ}}} + b_1 + S. \quad (10)$$

При вычислении ширины подгибаемого участка $R_{\text{ЭКВ}}$, для верхней гибочной матрицы №2 принимаем равное 274,54 мм [33].

Для настройки прессы подгибки кромок листа необходимо вычислить расстояние между матрицами в начале эвольвенты (рисунок 12), мм:

$$A = L_{\text{лист}} - 2 \cdot B, \quad (11)$$

где $L_{\text{лист}}$ – ширина листа, мм:

$$L_{\text{лист}} = \frac{\pi \cdot (D - S)}{1 + \varepsilon}. \quad (12)$$

Расстояние между торцами верхнего инструмента V вычисляется как:

$$V = A - 2 \cdot W. \quad (13)$$

Для определения значения смещения нижней матрицы относительно верхней гибочной матрицы необходимо совместить начало координат нижней матрицы с началом координат верхней гибочной матрицы (рисунок 13).

Для определения узловых точек необходимо вычислить аппроксимирующую функцию верхней гибочной матрицы:

$$Y(X) = \sum_{i=0}^n a_i X^i, \quad (14)$$

где $a_i, i = 0 \dots n$ – коэффициенты аппроксимации.

Профиль нижней гибочной матрицы представлен в виде узловых точек (таблица 4).

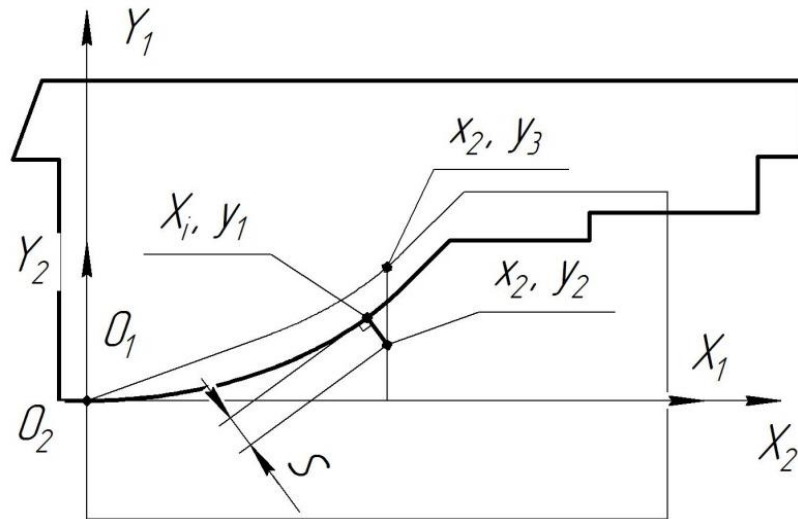


Рисунок 13 – Схема к расчету смещения нижней матрицы относительно верхней гибочной матрицы

Таблица 4 – Узловые точки нижней гибочной матрицы №1

№	X_2 , мм	Y_2 , мм	№	X_2 , мм	Y_2 , мм	№	X_2 , мм	Y_2 , мм
1	0	0	19	164	62,3	37	200	84,53
2	131,53	47,87	20	166	63,34	38	202	86,01
3	132	48,07	21	168	64,41	39	204	87,53
4	134	48,84	22	170	65,49	40	206	89,08
5	136	49,62	23	172	66,59	41	208	90,67
6	138	50,41	24	174	67,72	42	210	92,29
7	140	51,23	25	176	68,86	43	212	93,94
8	142	52,05	26	178	70,03	44	214	95,64
9	144	52,9	27	180	71,22	45	216	97,38
10	146	53,76	28	182	72,44	46	218	99,16
11	148	54,64	29	184	73,68	47	220	100,98
12	150	55,53	30	186	74,94	48	222	102,85
13	152	56,45	31	188	76,23	49	224	104,77
14	154	57,38	32	190	77,54	50	226	106,74
15	156	58,32	33	192	78,88	51	226,1	106,84
16	158	59,29	34	194	80,25	52	269,23	149,98
17	160	60,28	35	196	81,65			
18	162	61,28	36	198	83,07			

Общий вид аппроксимирующей функции нижней гибочной матрицы №1 имеет вид:

$$Y_2(X_2) = \sum_{i=0}^n b_i X_2^i, \quad X_2 \in [M_0; M_m], \quad (15)$$

где $b_i, i = 0..n$ – коэффициенты аппроксимации;

$M_t, t = 0..m$ – координаты сопряжения линий на гибочной матрице.

Узловые точки определяются последовательно (рисунок 13):

$$y_1 = Y(X_i), \quad (16)$$

$$x_2 = X_i + \Delta x, \quad (17)$$

$$\Delta x = \sin(\arctg(K)) \cdot S, \quad (18)$$

$$K = \frac{d(Y(X_i))}{dX_i}, \quad (19)$$

$$y_2 = -\frac{x_2 - X_i}{K} + Y(X_i), \quad (20)$$

$$y_3 = Y_2(x_2). \quad (21)$$

После, из координат нижней гибочной матрицы необходимо вычислить разницу между y_3 и y_2 . Дальнейшее определение X_3 представлено в виде алгоритма (рисунки 14-18).

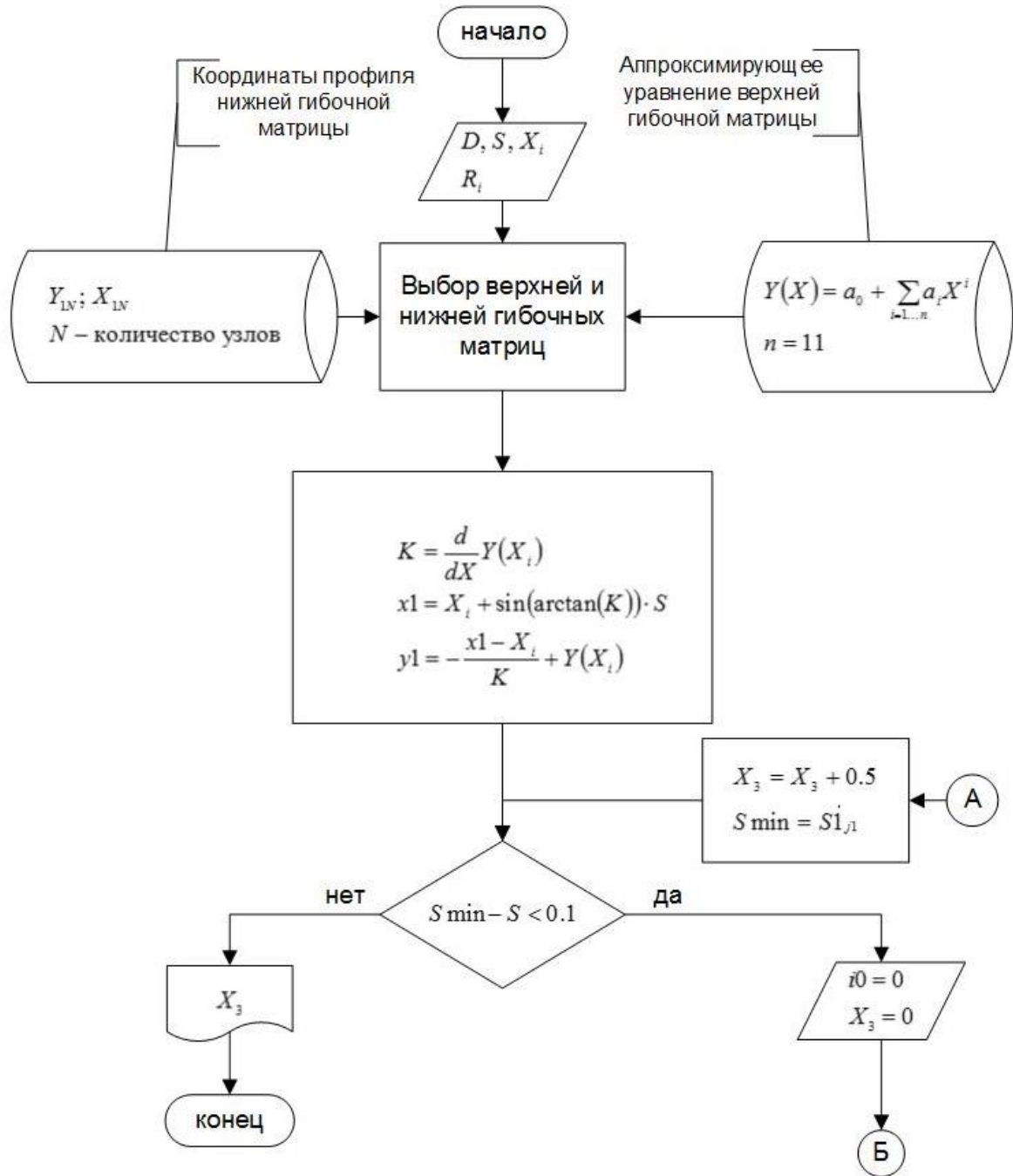


Рисунок 14 – Алгоритм определения смещения нижней гибочной матрицы относительно верхней гибочной матрицы

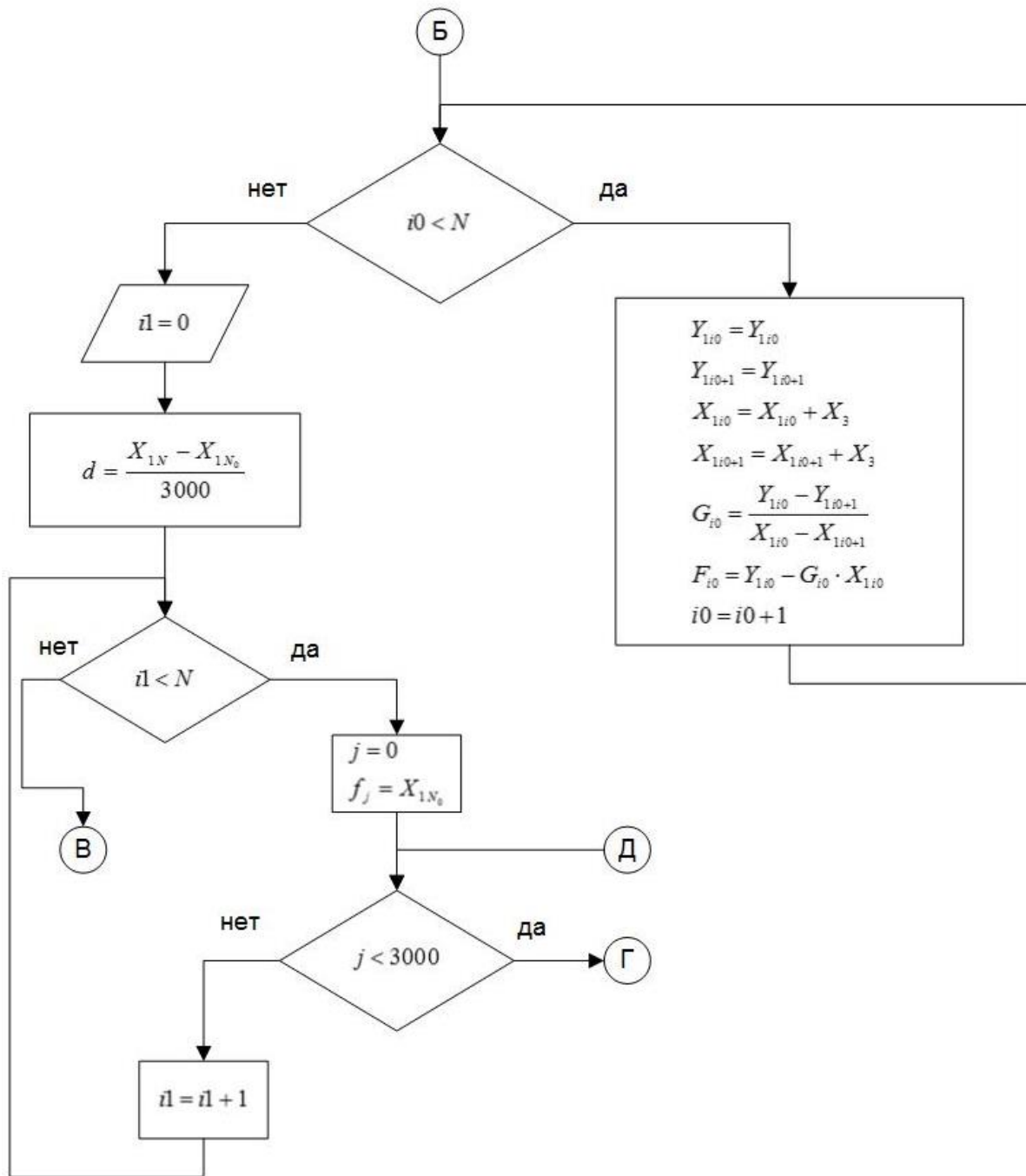


Рисунок 15 – Продолжение алгоритма для определения смещения нижней гибочной матрицы относительно верхней гибочной матрицы

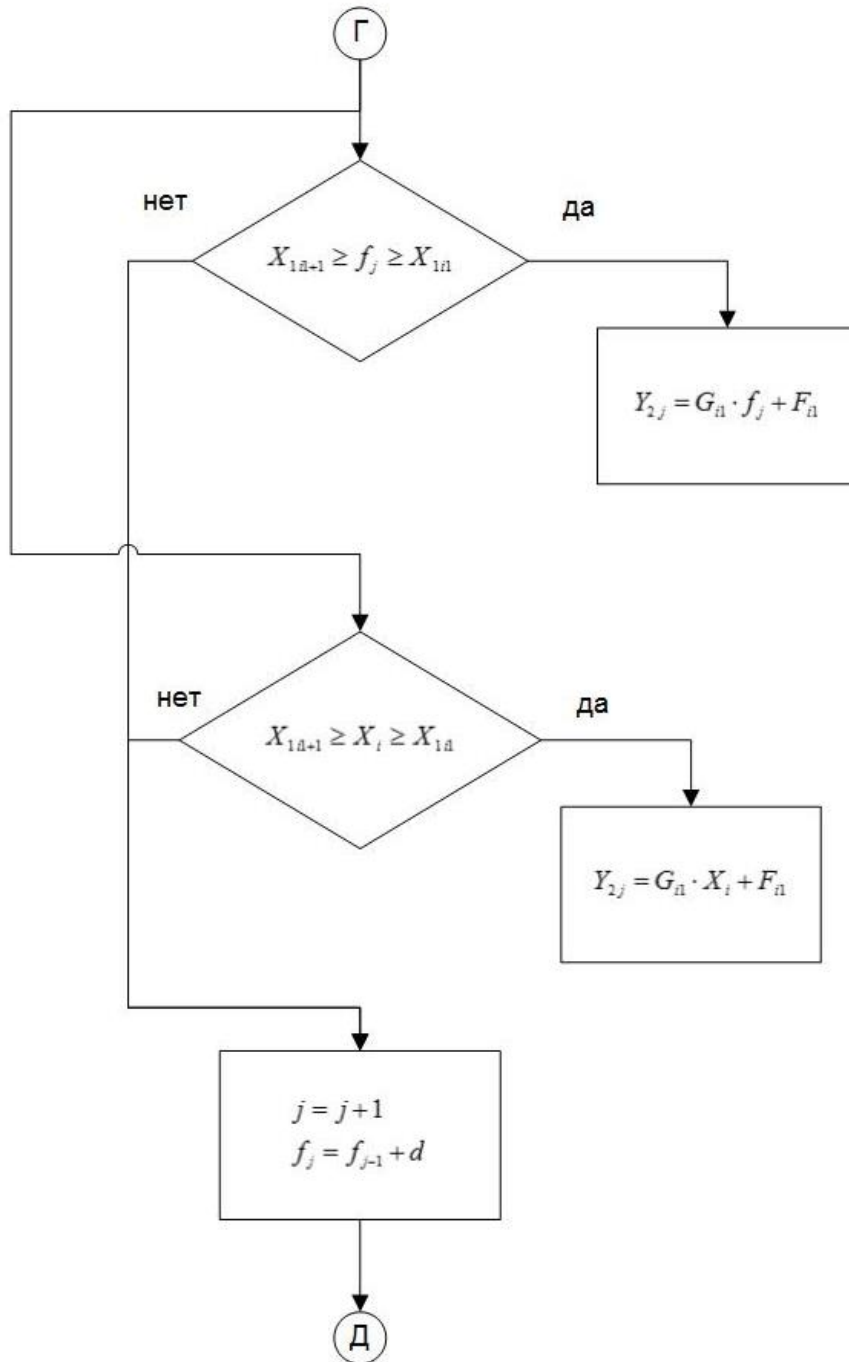


Рисунок 16 – Продолжение алгоритма для определения смещения нижней гибочной матрицы относительно верхней гибочной матрицы

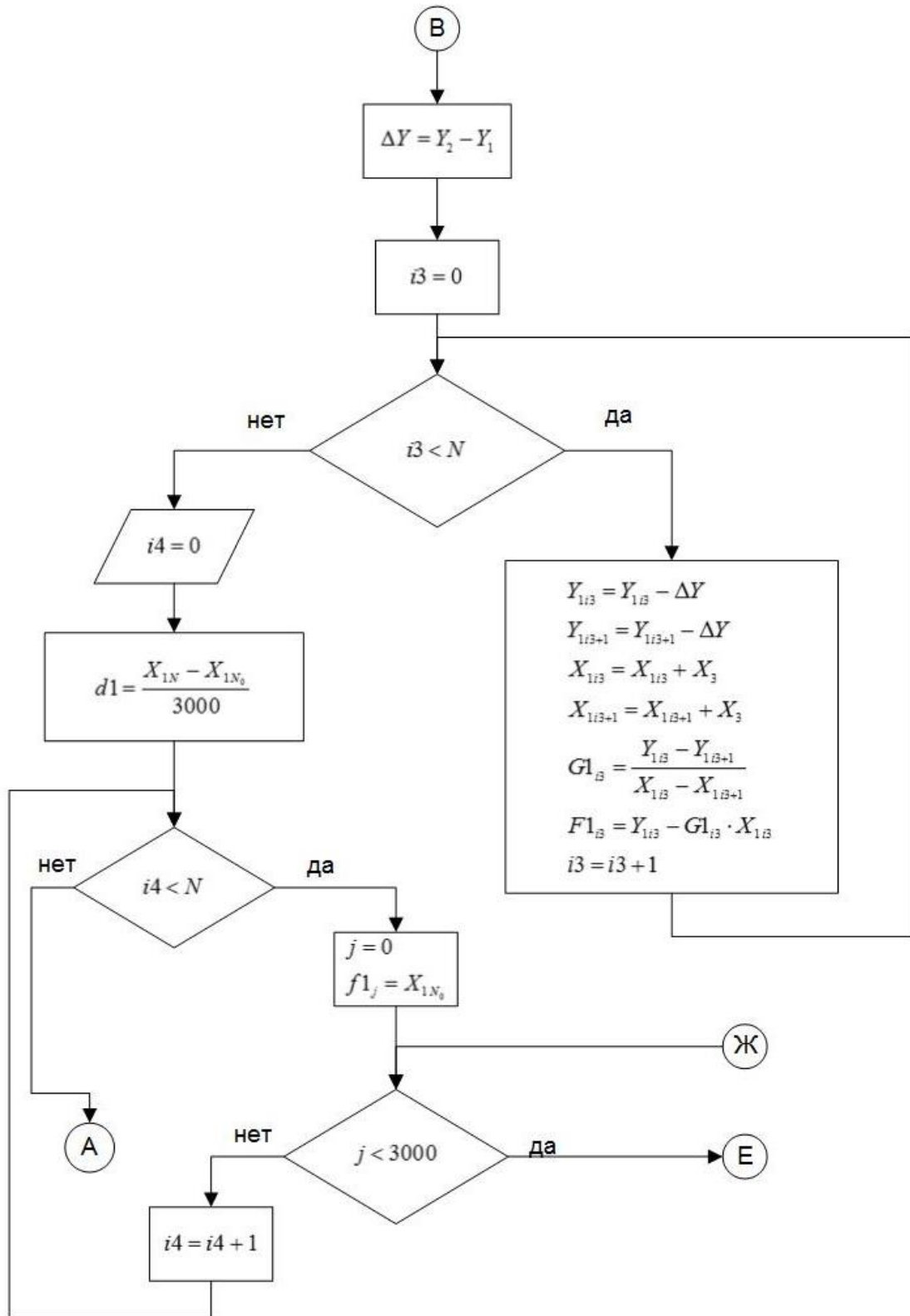


Рисунок 17 – Продолжение алгоритма для определения смещения нижней гибочной матрицы относительно верхней гибочной матрицы

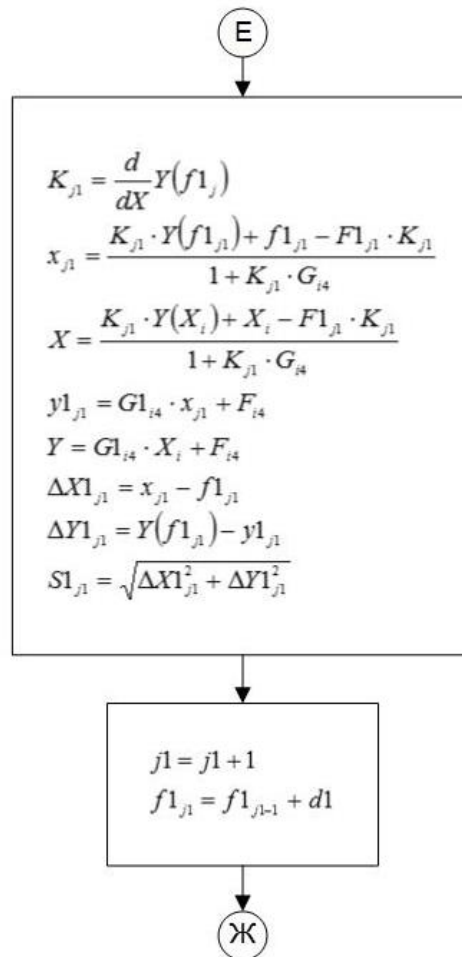


Рисунок 18 – Продолжение алгоритма для определения смещения нижней гибочной матрицы относительно верхней гибочной матрицы

Для других гибочных матриц основные технологические параметры инструмента, координаты контура и соответствующие аппроксимирующие уравнения представлены в Приложении А.

3.5 Численная модель процесса подгибки кромок и исследование полученных результатов

Для численного моделирования процесса подгибки кромок листа в качестве программного продукта был выбран MSC Marc [97].

Для определения высоты кромки листа (H , мм) и погонного усилия подгибки (P , $\frac{\text{кН}}{\text{мм}}$) предложена расчетная схема, представленная на рисунке 19.

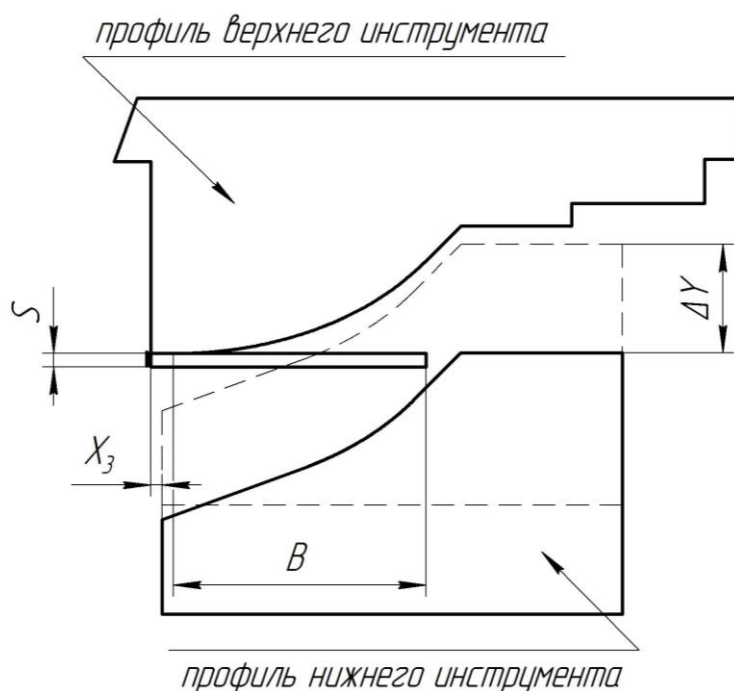


Рисунок 19 – Схема к расчету методом конечных элементов высоты подогнутой части листа

Численная модель представлена в двумерной декартовой системе координат. При создании модели инструмента и моделирования процесса задавались следующие параметры:

- геометрия верхнего и нижнего инструментов (согласно чертежам компании SMS Meer);
- начальное положение нижнего инструмента. Значение смещения нижнего инструмента относительно верхнего рассчитывалось согласно предложенному алгоритму (рисунки 14-18);
- геометрические параметры листовой заготовки без учета геометрии фаски. Ширина подгибаемого участка листа определялась по уравнению (10);
- ход рабочего инструмента, ΔY . За счет начального положения нижнего инструмента ход инструмента остается постоянным, время перемещения инструмента также остается постоянным. В расчетах принято равным 280 мм;
- контактное трение. В расчетах был принят коэффициент трения равный 0,15 (что соответствует значениям сталь по стали) [98];

- реологическое поведение материала листа – изотропное упруго-пластическое;
 - реологическое поведение материала верхнего и нижнего инструментов – абсолютно жесткое тело;
 - взаимное расположение нижнего инструмента относительно верхнего;
 - максимально допустимое усилие прессы на один гибочный блок.
- Допустимое усилие прессы на один гибочный блок составляет 40 МН (см. таблицу 1).

При расчете в двумерной системе координат допустимое погонное усилие составляет $[P] = 8,9 \frac{\text{кН}}{\text{мм}}$ (при рабочей длине гибочного блока равное 4500 мм, см. таблицу 1) [33].

Для определения высоты подгибки листа и усилия в работе выбран полный факторный эксперимент (ПФЭ) [99]. Выбрано три фактора, а принимая также во внимание цель исследования, для проведения численного эксперимента была выбрана схема ПФЭ $4^1 \cdot 3^1 \cdot 8^1$. Количество численных экспериментов составляет 96 шт.

В ПФЭ были выбраны следующие факторы:

X_i – со значениями величин: 150 мм, 175 мм, 200 мм, 220 мм. Рабочий диапазон исследуемого верхнего инструмента №2 находится в интервале от 160 мм до 210 мм включительно [33];

S – с пределами изменения величины от 8 мм, до 36 мм с интервалом 4 мм;

σ_r – со значениями: 200 МПа, 450 МПа, 700 МПа.

В результате решения задач математического моделирования были определены усилие при подгибке кромок и высота подгибки листа.

Исходные параметры и результаты расчета сведены в таблицу 5.

Таблица 5 – Сводная таблица результатов расчета в MSC Marc для гибочной матрицы №2

S, мм	X, мм	B, мм	X ₃ , мм	$(\sigma_r = 200 \text{ МПа})$		$(\sigma_r = 450 \text{ МПа})$		$(\sigma_r = 700 \text{ МПа})$	
				H, мм	P, кН/мм	H, мм	P, кН/мм	H, мм	P, кН/мм
8	150	183	8	24,8	0,6	18,5	1,1	11,9	1,5
12		188	13	28,2	0,8	24,1	1,6	19,6	2,4
16		193	18	33,9	1,1	30,7	2,3	27,4	3,4
20		197	22	36,6	1,4	34	3	31,2	4,4
24		202	25	39	1,9	36,7	3,8	34,3	5,5
28		207	28	41,4	2,4	39,4	4,6	37,4	6,7
32		212	31	44	3	42,1	5,5	40,2	8
36		217	33	46,4	3,6	44,5	6,5	42,9	9,4
8	175	212	7	37,3	0,6	28,7	1	19,7	1,3
12		217	13	41,6	0,8	36,1	1,5	30	2,2
16		222	18	48	1	43,9	2,1	39,3	3,1
20		227	22	51,4	1,3	47,9	2,8	44,3	4,1
24		232	26	54,5	1,7	51,5	3,5	48,4	5,2
28		237	30	57,5	2,2	54,8	4,4	52	6,4
32		242	33	60,9	2,7	58,4	5,2	55,8	7,6
36		247	35	63,8	3,4	61,5	6,2	59,1	8,9
8	200	242	7	53,4	0,6	42	1	30,6	1,2
12		247	13	58,9	0,8	51,4	1,4	43,8	2
16		253	18	65,9	1	60,5	2	54,8	2,9
20		258	23	70,1	1,3	65,5	2,6	61,1	3,9
24		263	27	73,8	1,6	69,8	3,3	65,9	4,9
28		268	31	77,7	2	74,1	4,1	70,5	6,1
32		274	34	82,2	2,5	79,7	5	76,9	7,3
36		279	37	85,5	3,1	82,8	5,9	79,9	8,5
8	220	268	7	68,3	0,6	54,8	0,9	41,1	1
12		273	13	75,2	0,8	66,7	1,4	57,3	1,8
16		279	18	83,5	0,9	77	1,9	71,2	2,7
20		284	23	88,2	1,2	82,8	2,5	77,3	3,7
24		290	28	92,6	1,5	87,8	3,2	83,1	4,7
28		295	32	96,8	1,9	92,6	3,9	88,4	5,8
32		301	36	101,8	2,4	99	4,7	96,1	7
36		306	39	105,1	2,9	101,5	5,6	98,1	8,2

На рисунке 20 представлен график изменения высоты подгибки листа в зависимости от варьируемых параметров, представленных в таблице 5.

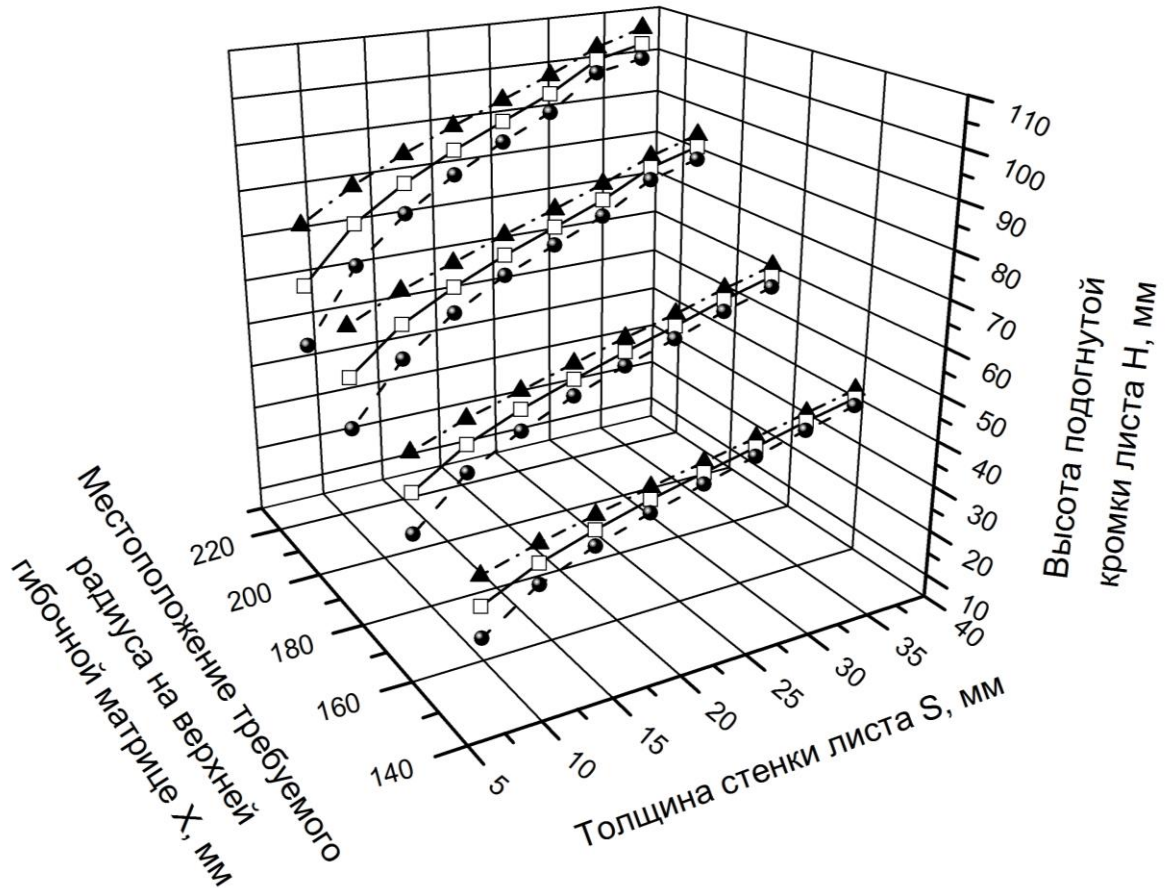


Рисунок 20 – Зависимость изменения высоты подогнутой кромки листа на гибочной матрице №2 при варьировании параметров:

--▲-- – H при $\sigma_{\tau} = 200$ МПа; --□-- – H при $\sigma_{\tau} = 450$ МПа;
--●-- – H при $\sigma_{\tau} = 700$ МПа

По результатам расчета с использованием пакета MathCAD были получены уравнение и аппроксимирующие коэффициенты для определения высоты подгибки кромок листа:

$$\begin{aligned}
 H(S, X, \sigma_{\tau}) = & 8,094 \times 10^{-4} \cdot \sigma_{\tau} \cdot S - 1,641 \times 10^{-4} \cdot \sigma_{\tau} \cdot X - \\
 & - 6,556 \times 10^{-7} \cdot \sigma_{\tau}^2 - 5,921 \times 10^{-3} \cdot \sigma_{\tau} + \\
 & + 9,661 \times 10^{-3} \cdot S \cdot X + 3,132 \times 10^{-3} \cdot X^2 - \\
 & - 0,599 \cdot X + 0,124 \cdot S - 0,023 \cdot S^2 + 37,591.
 \end{aligned}
 \tag{22}$$

Это уравнение можно упростить, так как коэффициент перед σ_r^2 не значим. Таким образом, уравнение высоты подгибки будет иметь вид:

$$\begin{aligned}
 H(S, X, \sigma_r) = & 8,094 \times 10^{-4} \cdot \sigma_r \cdot S - 1,641 \times 10^{-4} \cdot \sigma_r \cdot X - \\
 & -5,921 \times 10^{-3} \cdot \sigma_r + 9,661 \times 10^{-3} \cdot S \cdot X + \\
 & +3,132 \times 10^{-3} \cdot X^2 - 0,599 \cdot X + 0,124 \cdot S - \\
 & -0,023 \cdot S^2 + 37,591.
 \end{aligned} \tag{23}$$

Так, например при $X = 160$ мм, $\sigma_r = 300$ МПа, $S = 16$ мм по уравнению (22) высота подгибки кромок листа составит:

$$H(16, 160, 300) = 36,93 \text{ мм,}$$

а по уравнению (23):

$$H(16, 160, 300) = 36,99 \text{ мм.}$$

Влияние толщины стенки на изменение значения величины высоты подгибки листа при изготовлении труб представлено на рисунке 21 [100].

Из рисунка 21 видно, что при одной и той же настройке пресса подгибки кромок ($X = const$, $\sigma_r = const$, $S = var$) с увеличением толщины стенки разность по высоте кромок листа снижается в пределах механических свойств одной марки стали.

Влияние местоположения требуемого радиуса на изменение высоты подгибки листа представлено на рисунке 22. При увеличении X разность по высоте кромок листа увеличивается в пределах механических свойств одной марки стали. Чем меньше толщина стенки, тем больше разница между высотами кромок листа.

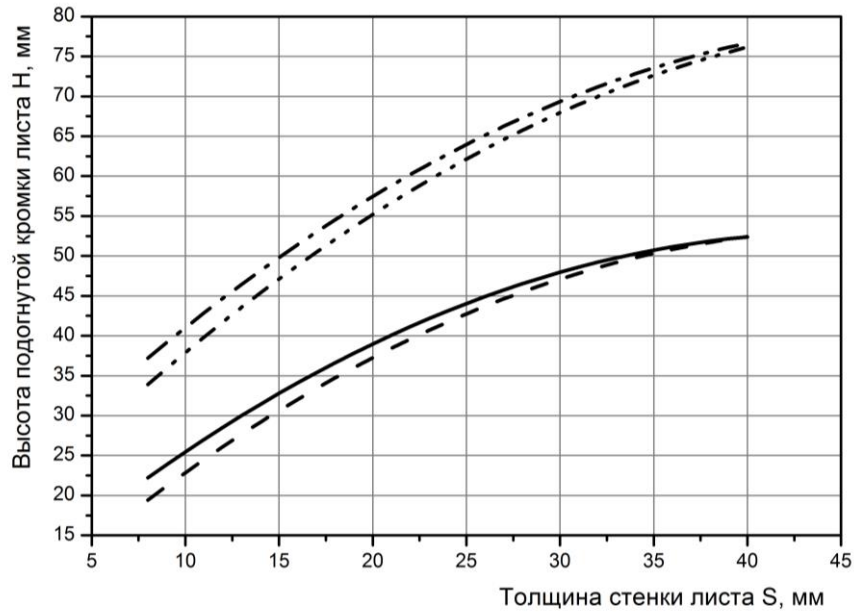


Рисунок 21 – Изменение высоты подогнутой кромки листа в интервале механических свойств: — – H при $X = 160$ мм, $\sigma_\tau = 450$ МПа; - - - H при $X = 160$ мм, $\sigma_\tau = 558$ МПа; - · - H при $X = 190$ мм, $\sigma_\tau = 450$ МПа; ··· – H при $X = 190$ мм, $\sigma_\tau = 558$ МПа

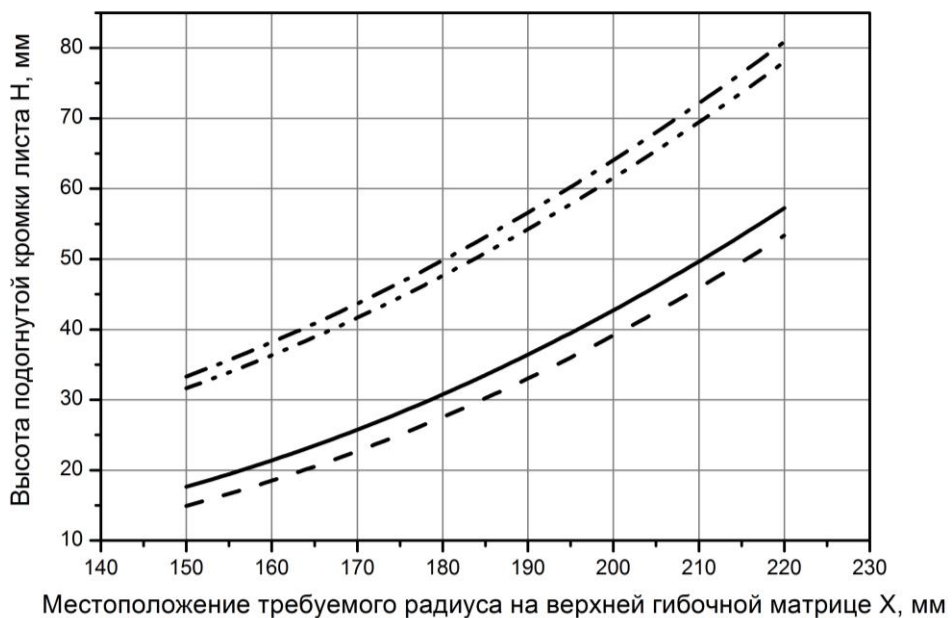


Рисунок 22 – Изменение высоты подогнутой кромки в интервале механических свойств: — – H при $S = 8$ мм, $\sigma_\tau = 450$ МПа; - - - H при $S = 8$ мм, $\sigma_\tau = 558$ МПа; - · - H при $S = 20$ мм, $\sigma_\tau = 450$ МПа; ··· – H при $S = 20$ мм, $\sigma_\tau = 558$ МПа

Аппроксимирующая функция зависимости погонного усилия от варьируемых параметров имеет вид:

$$\begin{aligned}
 P(S, X, \sigma_{\tau}) = & 348,76 \times 10^{-3} \cdot \sigma_{\tau} \cdot S - 14,07 \times 10^{-3} \cdot \sigma_{\tau} \cdot X - \\
 & - 856,35 \times 10^{-6} \cdot \sigma_{\tau}^2 + 1,85 \cdot \sigma_{\tau} - \\
 & - 378,8 \times 10^{-3} \cdot S \cdot X - 2,65 \times 10^{-9} \cdot X^2 + \\
 & + 6,86 \cdot X - 6,77 \cdot S + 2,31 \cdot S^2 - 553,16.
 \end{aligned}
 \tag{24}$$

На рисунке 23 представлена зависимость допустимых значений погонного усилия при выбранных параметрах.

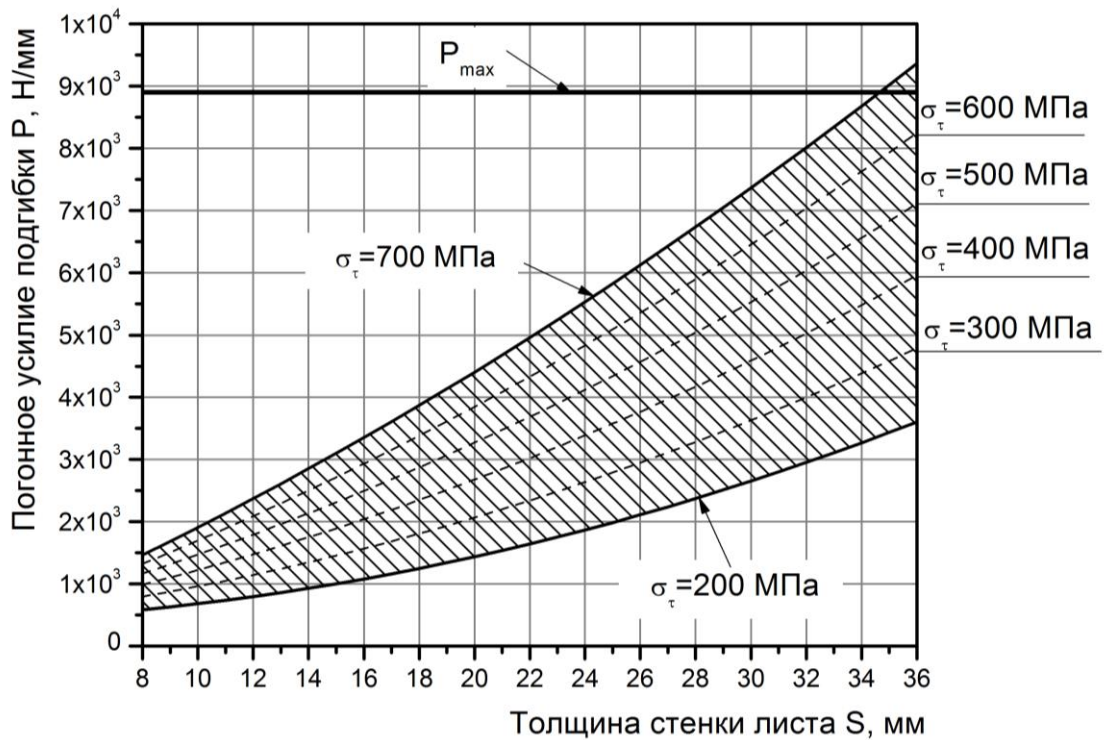


Рисунок 23 – Область значений погонного усилия для гибочной матрицы №2 при выбранных параметрах ($X=150$ мм)

Анализируя таблицу 5 и график 23 можно сделать вывод, что на гибочной матрице №2 существует небольшой диапазон соотношений толщин стенок, механических свойств и местоположения радиуса при которых процесс подгибки нельзя осуществить. Эти параметры находятся в интервале толщин

стенок от 35 до 36 мм; предела текучести от 630 до 700 МПа; местоположение требуемого радиуса от 150 до 175 мм.

На рисунке 24 представлена зависимость погонного усилия подгибки от варьируемых параметров ($X = \text{var}, \sigma_r = \text{const}, S = \text{const}$). Видно, что с увеличением толщины стенки разность по усилию увеличивается в интервале механических свойств одной марки стали. Также при увеличении размера X погонное усилие подгибки уменьшается. Эта тенденция справедлива для всего диапазона толщин стенок.

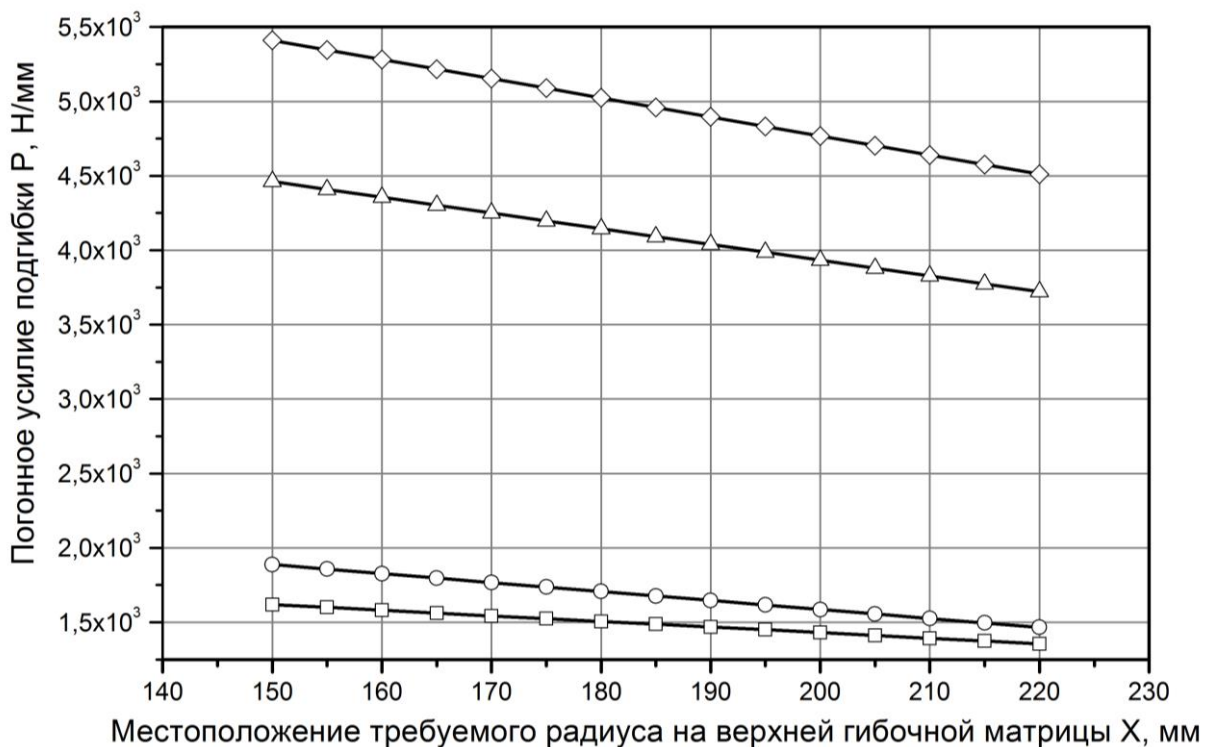


Рисунок 24 – Изменение погонного усилия подгибки кромки листа в интервале механических свойств одной марки стали: \square – R при $S = 8$ мм, $\sigma_r = 450$ МПа; \circ – R при $S = 8$ мм, $\sigma_r = 558$ МПа; \triangle – R при $S = 20$ мм, $\sigma_r = 450$ МПа; \diamond – R при $S = 20$ мм, $\sigma_r = 558$ МПа

В ходе вычисления высоты подогнутой части листа и усилия подгибки с помощью МКЭ фиксировались максимальные значения эквивалентных напряжений (рисунки 25-32).

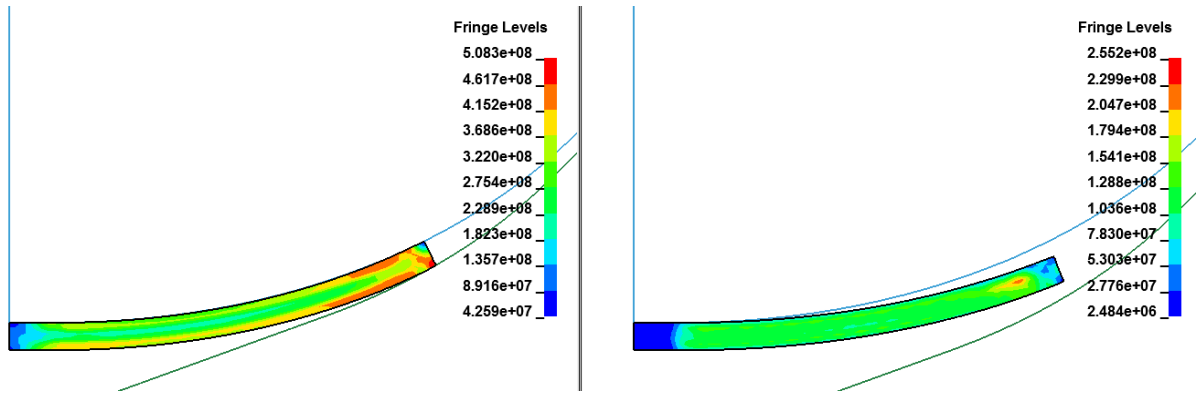


Рисунок 25 – Эквивалентные напряжения под нагрузкой (слева) и после распружинения (справа), Па. $S=12$ мм, $B=150$ мм, $\sigma_r = 450$ МПа

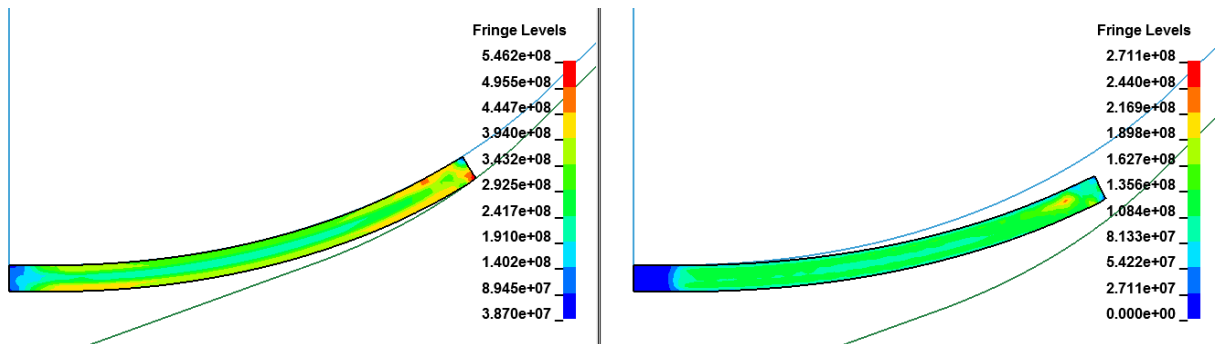


Рисунок 26 – Эквивалентные напряжения под нагрузкой (слева) и после распружинения (справа), Па. $S=12$ мм, $B=175$ мм, $\sigma_r = 450$ МПа

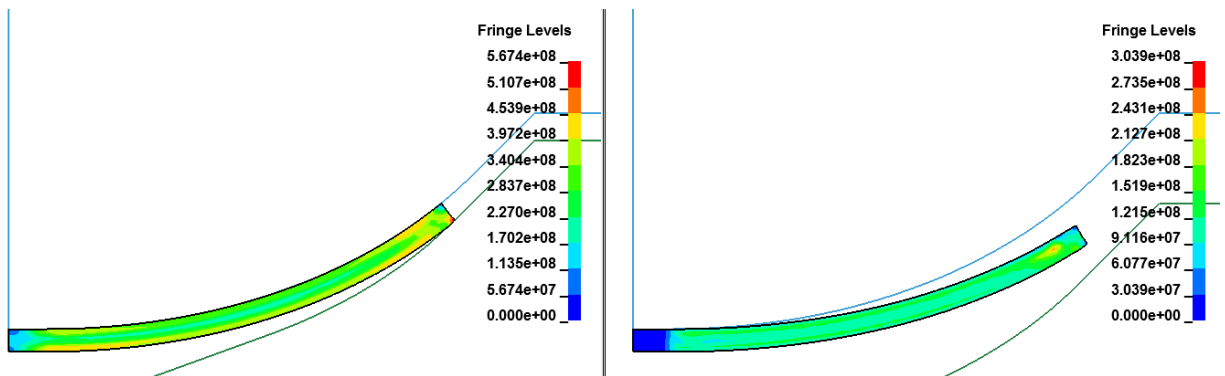


Рисунок 27 – Эквивалентные напряжения под нагрузкой (слева) и после распружинения (справа), Па. $S=12$ мм, $B=200$ мм, $\sigma_r = 450$ МПа

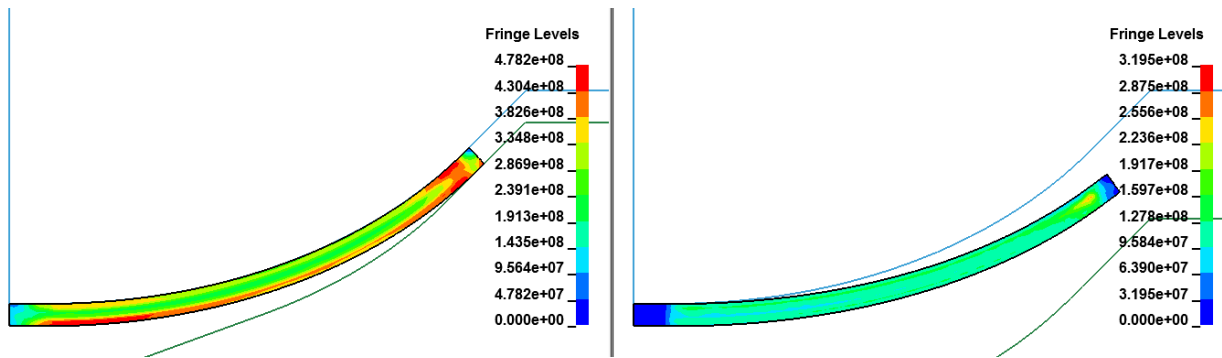


Рисунок 28 – Эквивалентные напряжения под нагрузкой (слева) и после распружинения (справа), Па. $S=12$ мм, $V=220$ мм, $\sigma_{\tau} = 450$ МПа

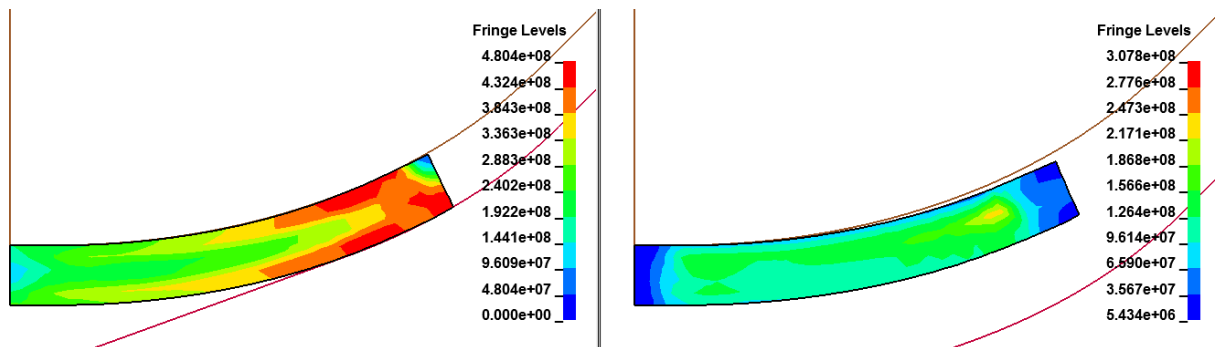


Рисунок 29 – Эквивалентные напряжения под нагрузкой (слева) и после распружинения (справа), Па. $S=28$ мм, $V=150$ мм, $\sigma_{\tau} = 450$ МПа

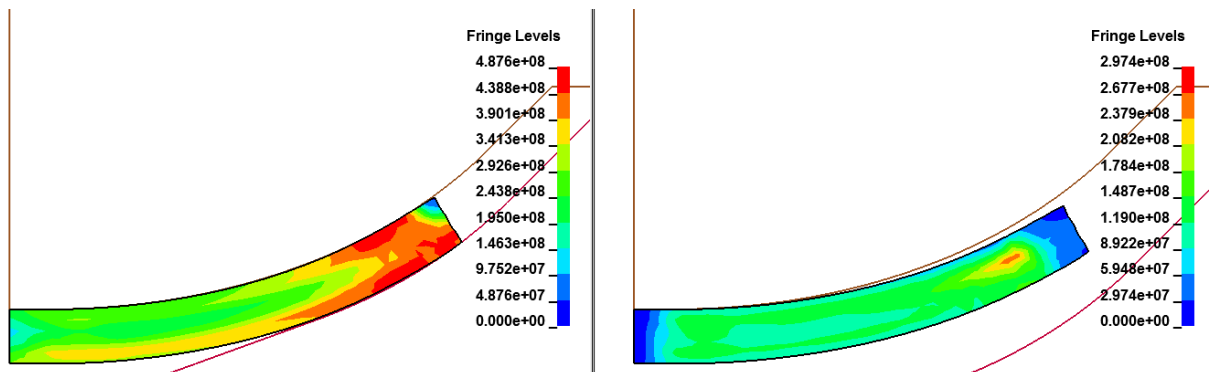


Рисунок 30 – Эквивалентные напряжения под нагрузкой (слева) и после распружинения (справа), Па. $S=28$ мм, $V=175$ мм, $\sigma_{\tau} = 450$ МПа

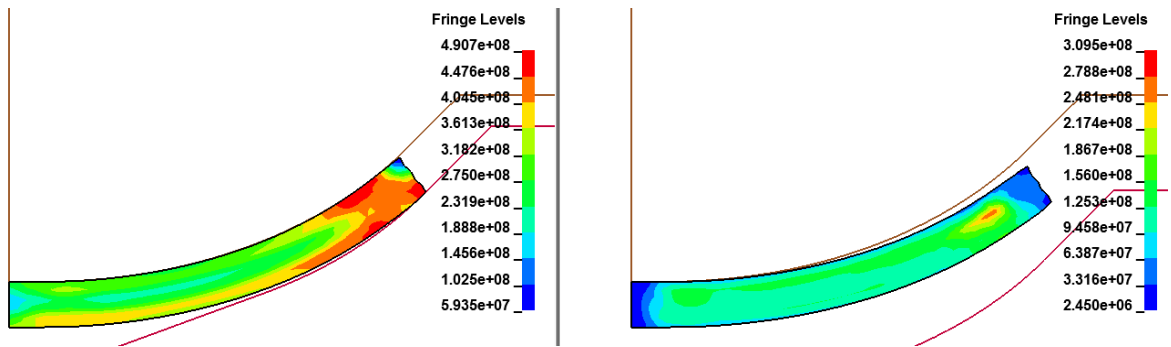


Рисунок 31 – Эквивалентные напряжения под нагрузкой (слева) и после распружинения (справа). Па. $S=28$ мм, $B=200$ мм, $\sigma_{\tau} = 450$ МПа

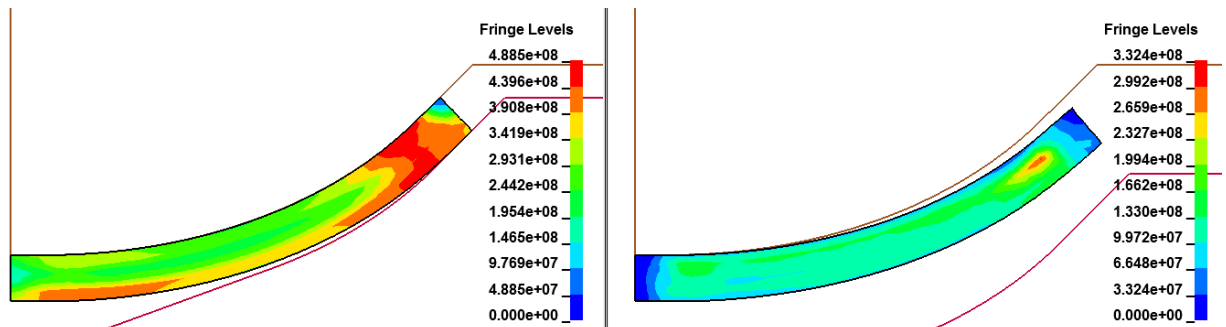


Рисунок 32 – Эквивалентные напряжения под нагрузкой (слева) и после распружинения (справа), Па. $S=28$ мм, $B=220$ мм, $\sigma_{\tau} = 450$ МПа

Из рисунков 25-32 видно, что остаточные напряжения не превышают 340 МПа, при этом максимальные напряжения находятся в середине толщины стенки листа.

После проведения аналогичных вычислений для других гибочных матриц (таблицы 6-8) были получены следующие уравнения высоты подгибки кромки листа и погонного усилия подгибки.

Для гибочной матрицы №1 (при $S = 8...29$ мм, $\sigma_{\tau} = 200...700$ МПа, $X = 120...165$ мм):

$$\begin{aligned}
 H(S, X, \sigma_{\tau}) = & 6,77 \times 10^{-4} \cdot \sigma_{\tau} \cdot S - 1,66 \times 10^{-4} \cdot \sigma_{\tau} \cdot X - \\
 & - 2,82 \times 10^{-6} \cdot \sigma_{\tau}^2 - 1,25 \times 10^{-4} \cdot \sigma_{\tau} + \\
 & + 0,01 \cdot S \cdot X + 3,99 \times 10^{-3} \cdot X^2 - \\
 & - 0,54 \cdot X - 0,56 \cdot S - 0,02 \cdot S^2 + 27,25,
 \end{aligned} \tag{25}$$

$$\begin{aligned}
P(S, X, \sigma_\tau) = & 5,06 \cdot \sigma_\tau \cdot S + 292,6 \times 10^{-3} \cdot \sigma_\tau \cdot X - \\
& -68,04 \cdot \sigma_\tau - 1,56 \cdot S \cdot X + 3,37 \cdot X - 325,43 \cdot S - \\
& -17,13 \cdot S^2 + 7,78 \times 10^3.
\end{aligned} \tag{26}$$

Для гибочной матрицы №3 (при $S = 8...40$ мм, $\sigma_\tau = 200...700$ МПа, $X = 155...280$ мм):

$$\begin{aligned}
H(S, X, \sigma_\tau) = & 1,36 \times 10^{-3} \cdot \sigma_\tau \cdot S - 2,16 \times 10^{-4} \cdot \sigma_\tau \cdot X - \\
& -3,39 \times 10^{-6} \cdot \sigma_\tau^2 - 5,94 \times 10^{-3} \cdot \sigma_\tau + \\
& +1,04 \times 10^{-2} \cdot S \cdot X + 2,05 \times 10^{-3} \cdot X^2 - \\
& -0,44 \cdot X - 0,41 \cdot S - 2,58 \times 10^{-2} \cdot S^2 + 41,12,
\end{aligned} \tag{27}$$

$$\begin{aligned}
P(S, X, \sigma_\tau) = & 405,41 \times 10^{-3} \cdot \sigma_\tau \cdot S - 1,74 \times 10^{-3} \cdot \sigma_\tau \cdot X - \\
& -1,79 \cdot \sigma_\tau - 216,13 \times 10^{-3} \cdot S \cdot X + \\
& +874,34 \times 10^{-3} \cdot X + 70,94 \cdot S - 269,79.
\end{aligned} \tag{28}$$

Для гибочной матрицы №4 (при $S = 8...44$ мм, $\sigma_\tau = 200...700$ МПа, $X = 180...320$ мм):

$$\begin{aligned}
H(S, X, \sigma_\tau) = & 1,25 \times 10^{-3} \cdot \sigma_\tau \cdot S - 2,16 \times 10^{-4} \cdot \sigma_\tau \cdot X - \\
& -2,47 \times 10^{-6} \cdot \sigma_\tau^2 - 0,01 \cdot \sigma_\tau + \\
& +7,68 \times 10^{-3} \cdot S \cdot X + 1,32 \times 10^{-3} \cdot X^2 - \\
& -0,29 \cdot X + 0,09 \cdot S - 0,03 \cdot S^2 + 24,49,
\end{aligned} \tag{29}$$

$$\begin{aligned}
P(S, X, \sigma_\tau) = & 302,53 \times 10^{-3} \cdot \sigma_\tau \cdot S - 41,5 \times 10^{-6} \cdot \sigma_\tau \cdot X - \\
& -766,46 \times 10^{-6} \cdot \sigma_\tau^2 - 1,19 \cdot \sigma_\tau + \\
& +33,48 \times 10^{-3} \cdot S \cdot X - 9,02 \times 10^{-9} \cdot X^2 + \\
& +546,38 \times 10^{-3} \cdot X - 54,62 \cdot S + 1,51 \cdot S^2 + 454,44.
\end{aligned} \tag{30}$$

На рисунках 33-35 представлены зависимости допустимых значений погонного усилия при выбранных параметрах для различных гибочных матриц.

Анализируя таблицу 6 и график 33 можно сделать вывод, что на гибочной матрице №1 существует небольшой диапазон соотношений толщин стенок, механических свойств и местоположения радиуса при которых процесс подгибки нельзя осуществить. Эти параметры находятся в интервале толщин стенок от 27 до 30 мм; предела текучести от 610 до 700 МПа; местоположение требуемого радиуса от 135 до 165 мм.

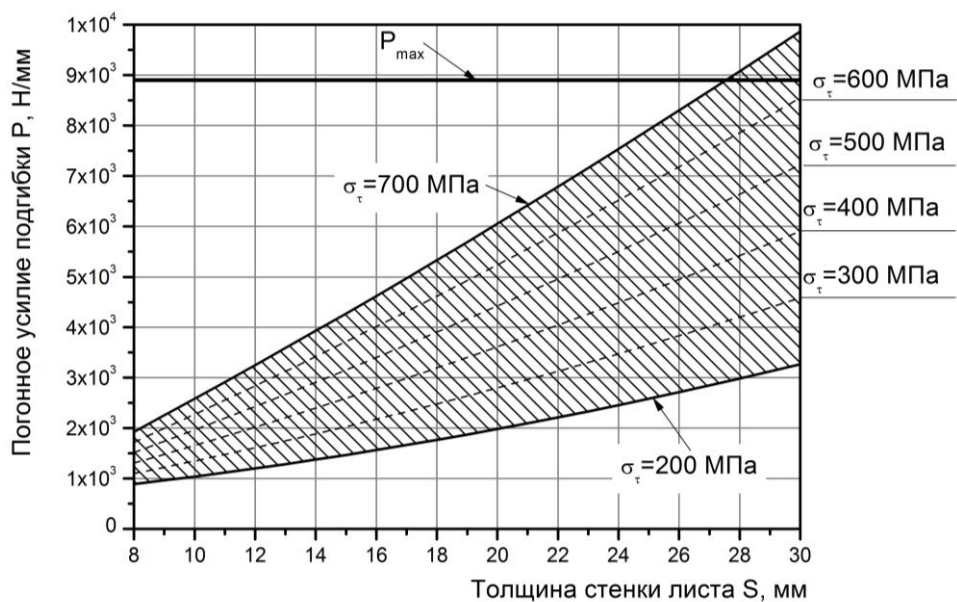


Рисунок 33 – Область значений погонного усилия для гибочной матрицы №1 при выбранных параметрах

Анализируя таблицу 7 и график 34 можно сделать вывод, что на гибочной матрице №3 существует небольшой диапазон соотношений толщин стенок, механических свойств и местоположения радиуса при которых процесс подгибки нельзя осуществить. Эти параметры находятся в интервале толщин стенок от 33 до 36 мм; предела текучести от 610 до 700 МПа; местоположение требуемого радиуса от 155 до 280 мм.

Анализируя таблицу 8 и график 35 можно сделать вывод, что на гибочной матрице №4 существует небольшой диапазон соотношений толщин стенок,

механических свойств и местоположения радиуса при которых процесс подгибки нельзя осуществить. Эти параметры находятся в интервале толщин стенок от 41 до 44 мм; предела текучести от 630 до 700 МПа; местоположение требуемого радиуса от 180 до 320 мм.

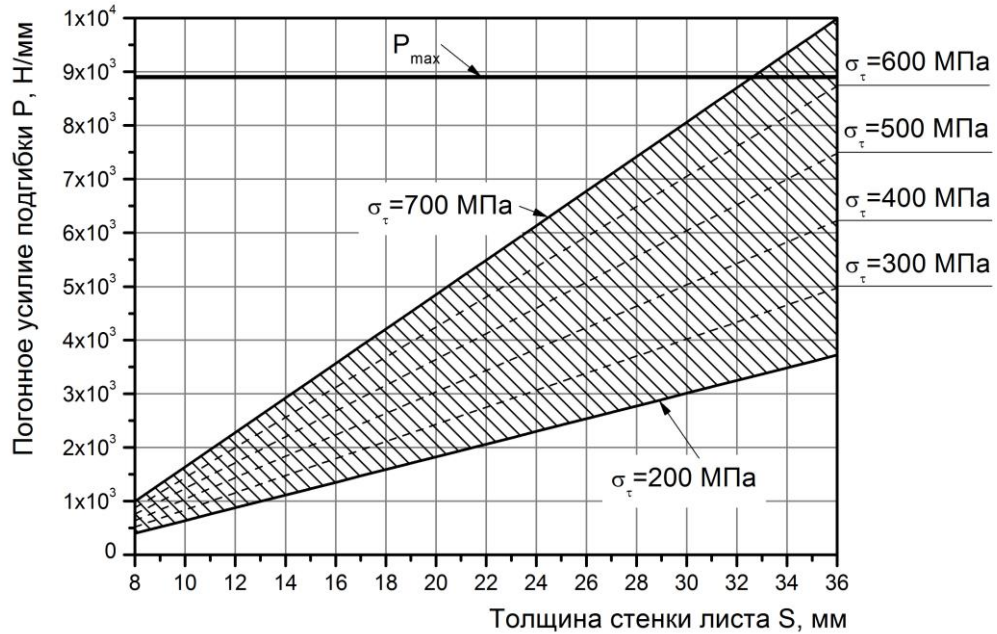


Рисунок 34– Область значений погонного усилия для гибочной матрицы №3 при выбранных параметрах

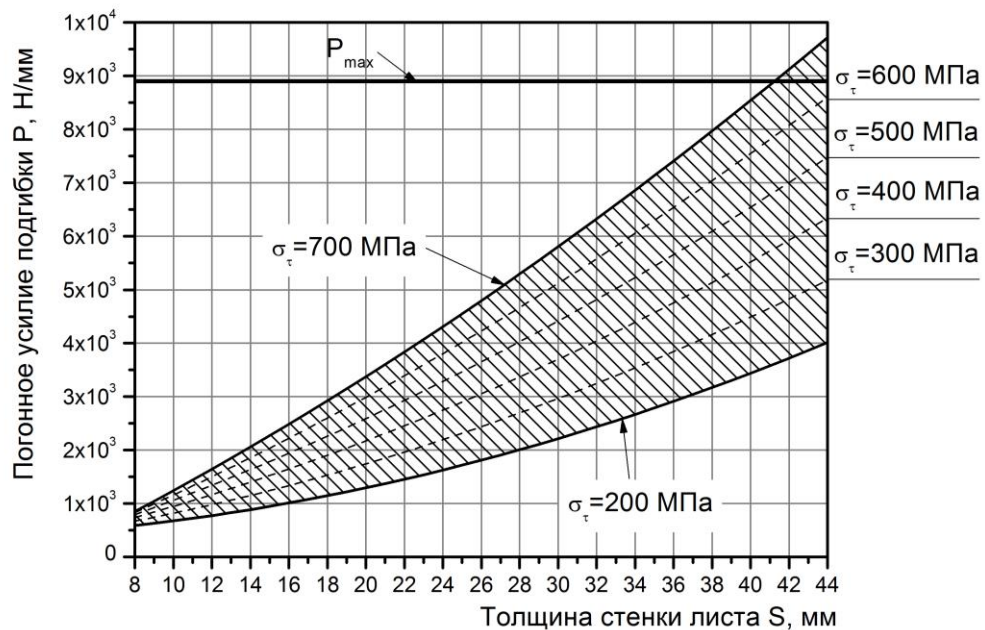


Рисунок 35– Область значений погонного усилия для гибочной матрицы №4 при выбранных параметрах

Таблица 6 – Сводная таблица результатов расчета в MSC Marc для гибочной матрицы №1

S, мм	X, мм	B, мм	X ₃ , мм	$(\sigma_t = 200 \text{ МПа})$		$(\sigma_t = 450 \text{ МПа})$		$(\sigma_t = 700 \text{ МПа})$	
				H, мм	P, кН/мм	H, мм	P, кН/мм	H, мм	P, кН/мм
8	120	137	-21	24,2	0,7	20,1	0,9	15,6	1
11		141	-21	26,7	0,9	23,1	1,5	19,1	2,1
14		145	-20	28,8	1,2	25,7	2,1	22,2	3,1
17		148	-20	30,6	1,5	28	2,8	25,1	4,2
20		152	-18	32,1	1,8	30	3,6	27,6	5,3
23		156	-17	33,3	2,2	31,7	4,3	29,8	6,4
26		159	-15	34,2	2,6	33,1	5,1	31,7	7,5
29		163	-13	34,8	3	34,2	5,9	33,3	8,7
8	135	154	-24	32,5	0,7	27,8	1	22,7	1,3
11		158	-24	35,6	1	31,3	1,7	26,7	2,3
14		162	-23	38,3	1,3	34,6	2,3	30,5	3,4
17		166	-22	40,7	1,6	37,5	3	33,9	4,4
20		170	-21	42,8	1,9	40,1	3,7	37	5,5
23		173	-20	44,6	2,3	42,4	4,4	39,8	6,6
26		177	-18	46	2,6	44,3	5,2	42,3	7,8
29		181	-16	47,2	3,1	46	6	44,5	9
8	150	173	-29	42,6	0,8	37,2	1,2	31,5	1,6
11		176	-28	46,2	1,1	41,4	1,8	36,2	2,6
14		180	-27	49,6	1,3	45,2	2,5	40,5	3,6
17		184	-26	52,6	1,6	48,7	3,2	44,5	4,7
20		188	-25	55,2	1,9	51,9	3,9	48,2	5,8
23		192	-23	57,6	2,3	54,8	4,6	51,6	6,9
26		196	-21	59,7	2,7	57,4	5,4	54,7	8,1
29		200	-19	61,4	3,1	59,6	6,2	57,5	9,2
8	165	192	-34	54,5	0,9	48,5	1,4	42,2	1,9
11		196	-33	58,7	1,1	53,2	2	47,4	2,9
14		200	-32	62,6	1,4	57,7	2,7	52,3	3,9
17		204	-31	66,2	1,7	61,8	3,3	56,9	5
20		208	-29	69,5	2	65,5	4	61,2	6,1
23		212	-28	72,5	2,3	69	4,7	65,2	7,2
26		216	-26	75,1	2,7	72,2	5,5	68,9	8,3
29		220	-23	77,5	3,1	75	6,3	72,2	9,5

Таблица 7 – Сводная таблица результатов расчета в MSC Марс для гибочной матрицы №3

S, мм	X, мм	B, мм	X ₃ , мм	$(\sigma_t = 200 \text{ МПа})$		$(\sigma_t = 450 \text{ МПа})$		$(\sigma_t = 700 \text{ МПа})$	
				H, мм	P, кН/мм	H, мм	P, кН/мм	H, мм	P, кН/мм
8	155	167	54	24,1	0,4	16,4	0,7	8,3	1
12		172	51	27,8	0,9	21,5	1,6	14,7	2,3
16		176	49	30,6	1,4	25,7	2,5	20,3	3,6
20		181	48	32,7	1,8	29,1	3,3	25	4,8
24		185	49	33,9	2,3	31,6	4,2	29	6,1
28		190	51	34,3	2,8	33,4	5,1	32,1	7,4
32		195	54	33,8	3,2	34,3	6	34,3	8,7
36		199	59	32,6	3,7	34,4	6,9	35,8	10
8	195	210	59	36,7	0,4	26,9	0,6	16,6	0,9
12		215	56	42	0,8	33,5	1,5	24,6	2,2
16		220	55	46,5	1,2	39,4	2,3	31,8	3,4
20		225	55	50,2	1,7	44,4	3,2	38,2	4,7
24		230	56	53	2,1	48,6	4	43,8	5,9
28		235	58	55	2,6	52	4,9	48,5	7,2
32		240	62	56,2	3	54,5	5,7	52,4	8,4
36		244	68	56,5	3,4	56,2	6,5	55,5	9,7
8	235	256	61	55,9	0,3	43,9	0,6	31,5	0,8
12		261	59	62,8	0,7	52,2	1,4	41,1	2
16		266	58	68,9	1,1	59,6	2,2	49,9	3,3
20		272	59	74,2	1,5	66,3	3	57,9	4,5
24		277	61	78,7	1,9	72,1	3,8	65,1	5,7
28		282	64	82,3	2,3	77,1	4,6	71,5	6,9
32		287	69	85,1	2,7	81,2	5,4	77	8,1
36		292	75	87,1	3,1	84,6	6,2	81,7	9,3
8	280	313	62	85,3	0,3	70,8	0,5	56	0,7
12		319	61	94	0,6	81	1,3	67,5	1,9
16		324	61	102	1	90,3	2	78,1	3,1
20		330	62	109,1	1,3	98,7	2,8	87,9	4,3
24		335	65	115,3	1,7	106,4	3,6	96,9	5,4
28		341	69	120,8	2,1	113,2	4,4	105,1	6,6
32		346	74	125,4	2,4	119,2	5,1	112,5	7,8
36		352	81	129,2	2,8	124,3	5,9	119	9

Таблица 8 – Сводная таблица результатов расчета в MSC Марс для гибочной матрицы №4

S, мм	X, мм	B, мм	X ₃ , мм	$(\sigma_t = 200 \text{ МПа})$		$(\sigma_t = 450 \text{ МПа})$		$(\sigma_t = 700 \text{ МПа})$	
				H, мм	P, кН/мм	H, мм	P, кН/мм	H, мм	P, кН/мм
8	180	195	9	18	0,5	8,5	0,7	1	0,7
12		201	10	22,8	0,6	14,5	1,1	6,4	1,5
16		212	11	26,7	0,9	19,6	1,6	12,9	2,3
20		216	12	29,8	1,1	23,9	2,2	18,4	3,2
24		221	13	31,9	1,4	27,4	2,8	23,1	4,1
28		226	14	33,3	1,8	29,9	3,5	26,9	5,1
32		230	15	33,7	2,2	31,6	4,2	29,9	6,1
36		235	16	33,3	2,7	32,5	5	32	7,2
40		239	17	32,1	3,2	32,5	5,8	33,2	8,3
44		244	18	30	3,7	31,6	6,6	33,6	9,4
8	215	232	-1	26,9	0,5	15,4	0,7	4,3	0,8
12		238	1	32,8	0,7	22,5	1,2	12,6	1,5
16		249	2	37,7	0,9	28,8	1,7	20,1	2,4
20		254	3	41,9	1,2	34,1	2,3	26,7	3,2
24		259	5	45,1	1,5	38,6	2,9	32,5	4,2
28		263	6	47,5	1,9	42,3	3,5	37,4	5,1
32		268	7	49,1	2,3	45,1	4,3	41,4	6,2
36		273	8	49,7	2,7	47	5	44,6	7,2
40		277	10	49,6	3,2	48,1	5,8	46,9	8,3
44		282	11	48,5	3,8	48,3	6,7	48,4	9,5
8	250	270	-10	39	0,5	25,7	0,7	12,6	0,8
12		277	-8	46	0,7	33,8	1,2	22	1,6
16		288	-7	52	0,9	41,1	1,7	30,6	2,4
20		293	-5	57,2	1,2	47,6	2,3	38,3	3,3
24		297	-4	61,5	1,5	53,2	2,9	45,1	4,2
28		302	-2	65	1,9	57,9	3,6	51,1	5,2
32		307	-1	67,6	2,3	61,8	4,3	56,2	6,2
36		312	1	69,4	2,8	64,8	5,1	60,5	7,3
40		317	3	70,3	3,3	66,9	5,9	63,9	8,4
44		322	4	70,3	3,9	68,2	6,8	66,4	9,6

Продолжение таблицы 8

S, мм	X, мм	B, мм	X ₃ , мм	$(\sigma_t = 200 \text{ МПа})$		$(\sigma_t = 450 \text{ МПа})$		$(\sigma_t = 700 \text{ МПа})$	
				H, мм	P, кН/мм	H, мм	P, кН/мм	H, мм	P, кН/мм
8	285	310	-19	54,4	0,6	39,1	0,7	24,2	0,8
12		317	-17	62,4	0,7	48,4	1,2	34,7	1,6
16		328	-16	69,5	1	56,7	1,8	44,3	2,4
20		333	-14	75,8	1,3	64,3	2,3	53,1	3,3
24		338	-12	81,2	1,6	70,9	3	61	4,3
28		343	-10	85,7	2	76,7	3,6	68	5,2
32		348	-8	89,4	2,4	81,7	4,4	74,2	6,3
36		353	-7	92,3	2,9	85,7	5,1	79,5	7,4
40		358	-5	94,2	3,4	89	6	84	8,5
44		363	-3	95,3	3,9	91,3	6,8	87,6	9,7
8	320	351	-29	73	0,6	55,8	0,8	39	0,9
12		358	-27	82	0,8	66,1	1,3	50,5	1,6
16		370	-25	90,2	1	75,6	1,8	61,2	2,5
20		375	-22	97,6	1,3	84,2	2,4	71,1	3,4
24		380	-20	104,1	1,6	91,9	3	80,1	4,3
28		385	-18	109,7	2	98,8	3,7	88,2	5,3
32		390	-16	114,4	2,4	104,8	4,4	95,5	6,3
36		396	-14	118,4	2,9	110	5,2	101,9	7,4
40		401	-12	121,4	3,4	114,3	6	107,4	8,5
44		406	-10	123,6	4	117,7	6,9	112,1	9,7

3.5.1 Оценка достоверности регрессионных уравнений высоты подогнутой части листа

Оценкой достоверности полученных регрессионных уравнений высоты подогнутой части листа является сравнение зафиксированных значений, проведенных при эксперименте с расчетными значениями. В таблице 9 представлены результаты сравнения расчетных и экспериментальных значений высоты подгибки кромок листа при производстве труб большого диаметра в условиях ТЭСЦ «Высота 239».

Таблица 9 – Высота подогнутой кромки листа при различных сортаментах труб большого диаметра

Сортамент труб	Класс/категория прочности труб	Условный номер верхней гибочной матрицы	A, мм	X, мм	$H_{\text{расч}}$, мм	$H_{\text{факт}}$, мм	Величина относительной ошибки, %
530x10	K60	1	1263	153,4	41	38 – 42	2,4 – 7,9
559x15,9	X52	1	1363	134,1	36	35 – 38	2,9 – 5,3
630x14	K54	2	1437	204,9	58	57 – 62	1,8 – 6,5
630x16	K52	2	1445	196,6	56	55 – 58	1,8 – 3,4
720x12	K54	2	1779	186,7	42	40 – 43	2,3 – 5,0
820x16	K52	3	1886	265	78	75 – 81	3,7 – 4,0
1020x13	K52	3	2629	225,2	48	46 – 48	0 – 4,3
1153x34,6	485FD	3	3237	170,8	42	39 – 42	0 – 7,7
1153x41	485FD	3	3250	167,9	42	40 – 43	2,3 – 5,0
1220x13	K52	3	3354	179,8	29	27 – 30	3,3 – 7,4
1220x19	K52	4	3017	314,4	78	75 – 82	4,0 – 4,9
1420x19	K60	4	3764	261,1	47	45 – 49	4,1 – 4,4
1420x21,6	K60	4	3778	248,4	46	43 – 47	2,1 – 7,0

Полученные регрессионные уравнения показали высокую сходимость с экспериментальными данными.

3.6 Влияние ширины подогнутой части листа трубной заготовки

Как отмечалось в пункте 2.3 при анализе статистических данных наиболее проблемными сортаментами являются трубы размером 530 мм, 559 мм, 720 мм, 820 мм и 1220 мм. Причем самый большой процент повторного экспандирования труб наблюдался на сорimente диаметром 559 мм (см. рисунки 6-8). Причиной повышенного уровня количества дефектов связано с нерациональным профилем на прессе подгибки кромок.

В связи с этим рассмотрим влияние изменения коэффициента гибки ε_r , на расстояние до требуемого радиуса и соответственно на ширину подгибаемого участка листа с различной толщиной стенки листа (см. уравнения (3), (4), (9), (10)).

В таблице 10 представлены результаты расчетов ширины подгибаемого участка листа для различных типоразмеров труб. Расчет производился для стали с пределом текучести 475 МПа, и пределом прочности 600 МПа, что соответствует трубам класса прочности K52 [4].

Таблица 10 – Результаты расчета ширины подогнутой части листа в зависимости от ε_r и толщины стенки для стали класса прочности K52

S, мм	Ширина кромки листа B , мм при			Ширина от края до первого шага на прессе шаговой формовки, мм
	$\varepsilon_r = 5\%$	$\varepsilon_r = 15\%$	$\varepsilon_r = 25\%$	
1	2	3	4	5
Для труб диаметром 508 мм				
8	172,6	185,1	197	185

Продолжение таблицы 10

1	2	3	4	5
10	172,3	185,9	195,7	185
12	170,4	185,1	198,9	
14	179,6	195,1	209,6	
16	185,0	201	212,2	
18	187,0	203,5	218,9	
20	193,7	210,4	222,1	
22	196,5	213,5	225,5	
24	197,8	215,2	231,3	
26	205,3	222,7	234,9	
Для труб диаметром 530 мм				
8	166,2	178,9	191,1	185
10	161,6	179,2	189,2	
12	162,7	177,8	192,1	
14	171,5	191,3	202,5	
16	176,7	193,1	204,8	
18	178,4	195,4	211,3	
20	180,5	202,2	214,4	
22	187,5	205,2	221,6	
24	188,6	206,6	223,4	
26	196,1	214,1	226,8	
Для труб диаметром 559 мм				
8	156,4	172,6	185,1	185
10	154,2	168,7	182,6	
12	150,9	170,4	181,5	
14	158,9	179,6	195,1	
16	163,7	180,9	197,1	

Продолжение таблицы 10

1	2	3	4	5
18	164,9	187,0	203,5	185
20	171,3	189,4	206,3	
22	173,4	196,5	209,4	
24	174,3	197,8	215,2	
26	181,7	200,7	218,5	
Для труб диаметром 720 мм				
8	214,1	230,8	142,8	210
10	204,7	223,9	135,2	
12	201,9	222,8	239,4	
14	207,7	230,1	247,9	
16	210,3	230	248,6	
18	210	234,5	253,8	
20	210,4	235,8	255,8	
22	215,8	241,8	258,1	
24	215,7	242,3	263,1	
26	222,1	244,6	265,8	
Для труб диаметром 820 мм				
8	185,4	205,6	222,5	210
10	303,0	198,2	214,4	
12	296,2	191	212,5	
14	304,6	196	219	
16	302,8	326,1	218,3	
18	302,1	326,5	222,4	
20	305,9	327,6	223,3	
22	306,7	332,7	224,7	
24	310,2	333,1	229,3	

Продолжение таблицы 10

1	2	3	4	5
26	311,8	339	231,3	210
Для труб диаметром 1020 мм				
8	266,3	287,4	303,6	235
10	250,6	273,1	292,3	
12	237	265,7	287,2	
14	240,2	268,1	291,6	
16	233,8	263,8	289	
18	229,2	264,8	290	
20	230,1	263,2	290,8	
22	227,9	262,4	291	
24	229,6	265	294,3	
26	228,9	265,3	295,4	
Для труб диаметром 1220 мм				
8	221,1	244,9	266,3	235
10	195,6	224,8	247,7	
12	352,4	207,5	237	
14	352,7	207,6	236,6	
16	344,4	198,6	230	
18	337,9	371,7	229,2	
20	336,7	372,2	225,8	
22	333,2	370,3	223,5	
24	329	367,6	225	
26	331,2	370,9	224,2	
Для труб диаметром 1420 мм				
8	176,1	204,5	228,3	285
10	324,9	350,3	201,5	

Продолжение таблицы 10

1	2	3	4	5
12	301,3	333,8	184	285
14	292,3	328,9	358,6	
16	281,5	321,6	350,8	
18	270,2	313,5	348,2	
20	265	307,1	343,9	
22	257,8	306,1	340,7	
24	250,3	300,8	340,8	
26	249,9	297,8	339,3	

На рисунках 36-39 представлены графически результаты расчетов.

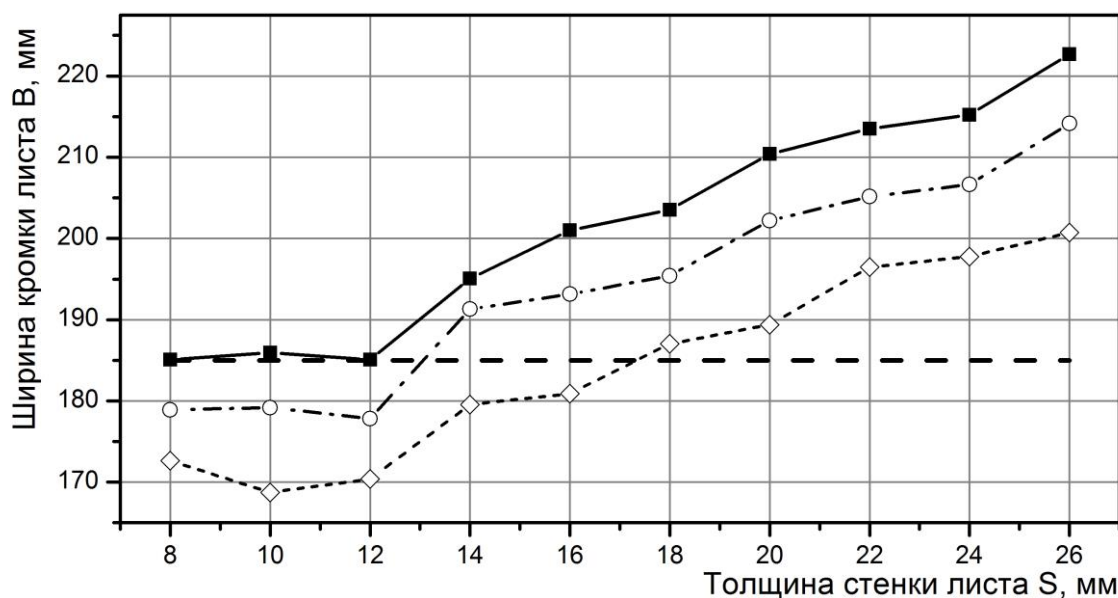


Рисунок 36 – Зависимость ширины подогнутой кромки листа для труб размером 508 – 559 мм: —■— — ширина кромки листа при $\varepsilon_r = 15\%$ для труб диаметром 508 мм; —○— — ширина кромки листа при $\varepsilon_r = 15\%$ для труб диаметром 530 мм; —◇— — ширина кромки листа при $\varepsilon_r = 15\%$ для труб диаметром 559 мм; — — — ширина от края кромки до первой позиции шага на прессе шаговой формовки

Из рисунка 36 видно, что в зависимости от сортамента труб при формовке заготовок на прессе шаговой формовки между местоположением первого шага и шириной подогнутой части листа может быть прямолинейный участок. При этом при производстве труб сортаментом 559 мм прямолинейный участок самый большой. А также характерно, что количество возврата труб на экспандер сортамента 559 мм составляет более 10 %.

На рисунках 37, 38 схожая ситуация. При наличии прямолинейного участка на сортаменте 820 мм количество возврата труб на экспандер выше, чем на сортаменте 720 мм. А на сортаменте 1220 мм количество возврата труб на экспандер выше, чем на сортаменте 1020 мм. Кроме того, из рисунка 37 видно, что изготовление труб сортаментом 820 мм с толщинами стенок в диапазоне от 8 до 14 мм происходит на одном инструменте, а с толщинами стенок в диапазоне от 16 до 26 мм на другом инструменте. На сортаменте 1220 мм существует аналогичный диапазон от 8 до 16 мм и от 18 до 26 мм.

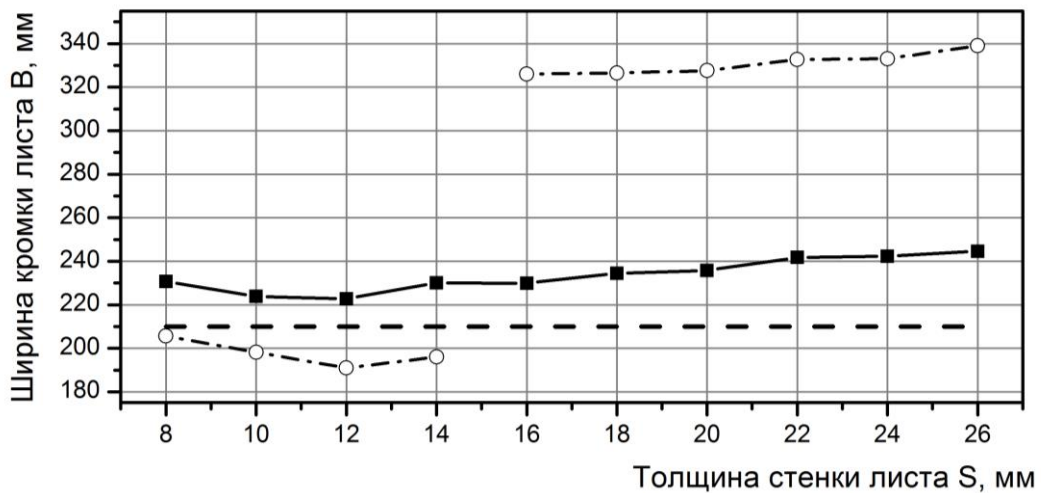


Рисунок 37 – Зависимость ширины подогнутой кромки листа для труб размером 720, 820 мм: —■— — ширина кромки листа при $\varepsilon_r = 15\%$ для труб диаметром 720 мм; —○— — ширина кромки листа при $\varepsilon_r = 15\%$ для труб диаметром 820 мм; — — — ширина от края кромки до первой позиции шага на прессе шаговой формовки

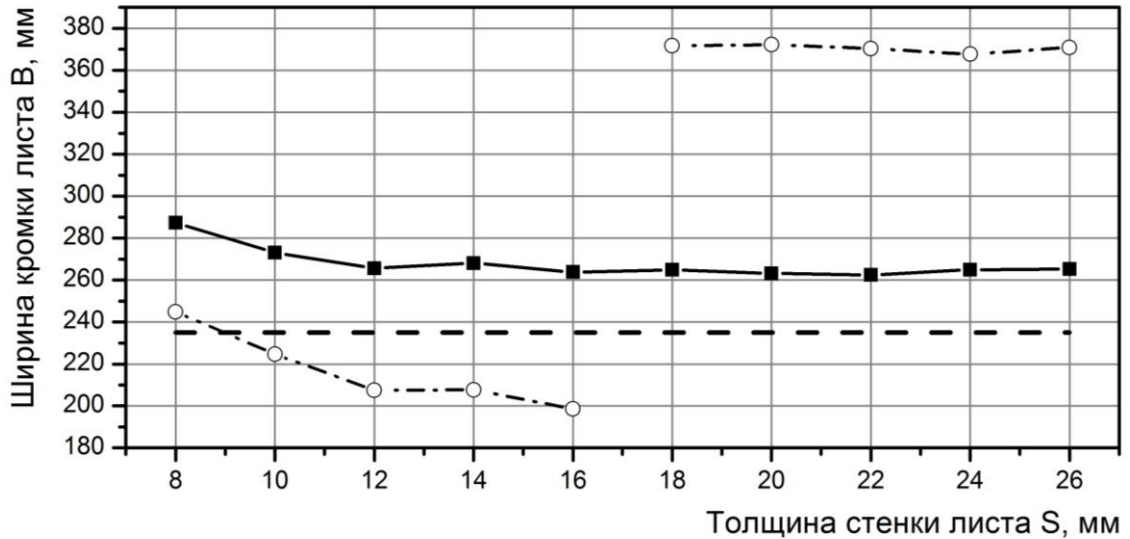


Рисунок 38 – Зависимость ширины подогнутой кромки листа для труб размером 1020, 1220 мм: —■— — ширина кромки листа при $\varepsilon_r = 15\%$ для труб диаметром 1020 мм; —○— — ширина кромки листа при $\varepsilon_r = 15\%$ для труб диаметром 1220 мм; — — — ширина от края кромки до первой позиции шага на прессе шаговой формовки

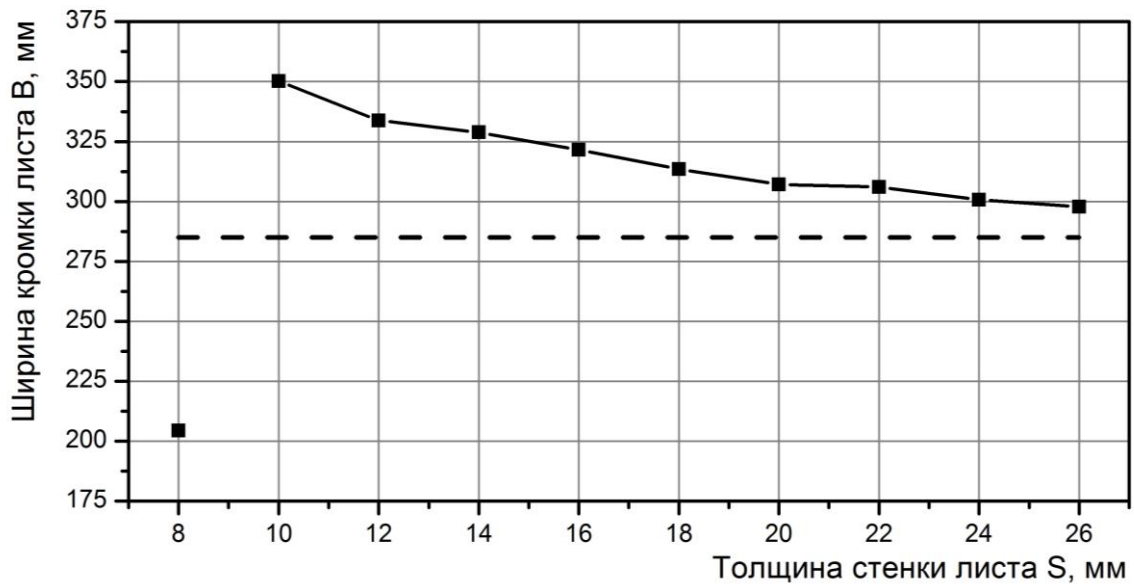


Рисунок 39 – Зависимость ширины подогнутой кромки листа для труб размером 1420 мм : —■— — ширина кромки листа при $\varepsilon_r = 15\%$ для труб диаметром 1420 мм; — — — ширина от края кромки до первой позиции шага на прессе шаговой формовки

На сортаменте диаметром 720, 1020, 1420 мм ширина подгибаемого края листа всегда больше, чем расстояние от края до первого шага ПШФ. Следовательно, для уменьшения количества дефектов, связанных с отклонением от теоретической окружности, необходимо производить настройку пресса подгибки кромок без наличия прямолинейного участка. Кроме этого, необходимо учитывать влияние сварочных операций.

На рисунке 40 представлена зависимость ширины подгибаемой кромки листа от различного коэффициента гибки.

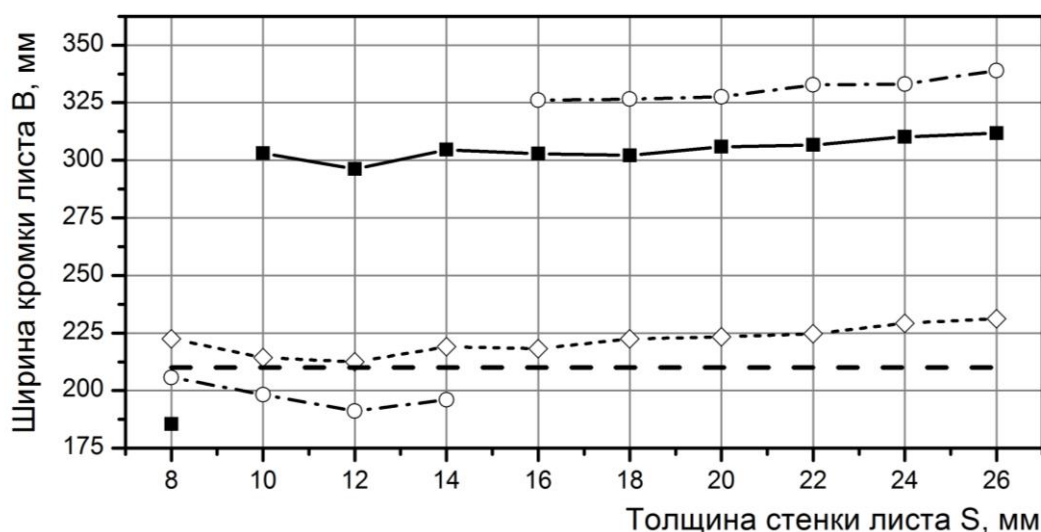


Рисунок 40 – Зависимость ширины подогнутой кромки листа от ε_r :
 —■— — ширина кромки листа при $\varepsilon_r = 5\%$ для труб диаметром 820 мм;
 -○- — ширина кромки листа при $\varepsilon_r = 15\%$ для труб диаметром 820 мм;
 -◇- — ширина кромки листа при $\varepsilon_r = 25\%$ для труб диаметром 820 мм;
 - - - ширина от края кромки до первой позиции шага на прессе шаговой формовки

При анализе рисунка 40 видно, что для диапазона стенок от 8 до 16 мм рациональное значение ε_r равно 5 %. Однако из практического опыта для данного диапазона желательно выбирать ε_r равным от 20 до 25 %. Это связано, как правило, с влиянием сварочных операций и технологией сборки трубной заготовки.

Для диапазона толщин стенок от 16 до 26 мм рациональное значение ε_r равно 15 %. Однако с ростом толщины стенки возрастает и погонная энергия

для сварки наружного и внутреннего сварных швов. Что приведет к дополнительным геометрическим изменениям околошовной зоны в момент сварки трубной заготовки. Поэтому для толщин стенок свыше 22 мм также предлагается ε_r равное от 20 до 30 %.

Аналогичным образом можно получить значения коэффициента гибки для других типоразмеров труб.

3.7 Выводы

1. Разработанный комплекс математических моделей позволяет осуществлять системный анализ процесса подгибки кромок листа для всего рассматриваемого сортамента труб диаметром от 508 до 1420 мм, толщин стенок от 8 до 48 мм и классом прочности до K80 (X100).

2. Полученная математическая модель по расчету смещения нижнего гибочного инструмента относительно верхнего может быть использована для расчета настроечных параметров прессы подгибки кромок.

3. Получены регрессионные уравнения для определения высоты подогнутой кромки листа и усилия при подгибке кромки листа, которые могут быть использованы для определения значений контролируемых параметров при подгибке кромок листа.

4. Полученные регрессионные уравнения усилия при подгибке кромок листа могут быть использованы для определения максимального значения усилия гибки при известных настроечных параметрах.

5. Проведенное численное исследование разработанного комплекса математических моделей подтвердило, что для уменьшения количества дефектов, связанных с отклонением от теоретической окружности ширина подгибаемого участка должна быть больше, чем ширина от края кромки до первой позиции прессы шаговой формовки.

4 Математическое моделирование процесса формовки листа

Процесс шаговой формовки листа зависит от нескольких факторов таких, как: механические свойства металла листа, толщины стенки, требуемого радиуса после формовки. По этим параметрам процесс схож с процессом подгибки кромок листа. Кроме того, на геометрические параметры сформованной трубной заготовки влияют такие факторы, как радиус пуансона [66], расстояние между опорами нижнего инструмента, радиус предыдущего шага.

Известно, что, используя способ шаговой формовки, при некотором значении хода пуансона по вертикальной оси симметрии стана наблюдается зазор между листом и пуансоном [53, 54].

Для достоверного вычисления усилия, радиусов трубной заготовки, ходов пуансона и величины зазора необходимо каждый фактор варьировать на большом интервале возможных значений и при минимальном значении дискретности изменения каждого интервала. Такая постановка эксперимента приведет к большому числу расчетов, что приведет к большим временным затратам по вычислению (с использованием метода конечных элементов) и обработке данных.

Поэтому для определения усилий и величины хода пуансона на прессе шаговой формовки целесообразно применять координатный метод.

Применение координатного метода связано с необходимостью определить общую зависимость величины хода пуансона от варьируемых параметров.

Разработка математической модели, предназначенной для определения геометрических параметров после формоизменения на прессе шаговой формовки и определения усилий, позволит прогнозировать возможность изготовления электросварных труб большого диаметра и правильно выбирать инструмент для осуществления процесса.

Для оценочного определения величины зазора между листом и пуансоном применим метод конечных элементов.

4.1 Численная модель процесса формовки и исследование полученных результатов

Для численного моделирования процесса шаговой формовки листа в качестве программного продукта был выбран MSC Marc [97].

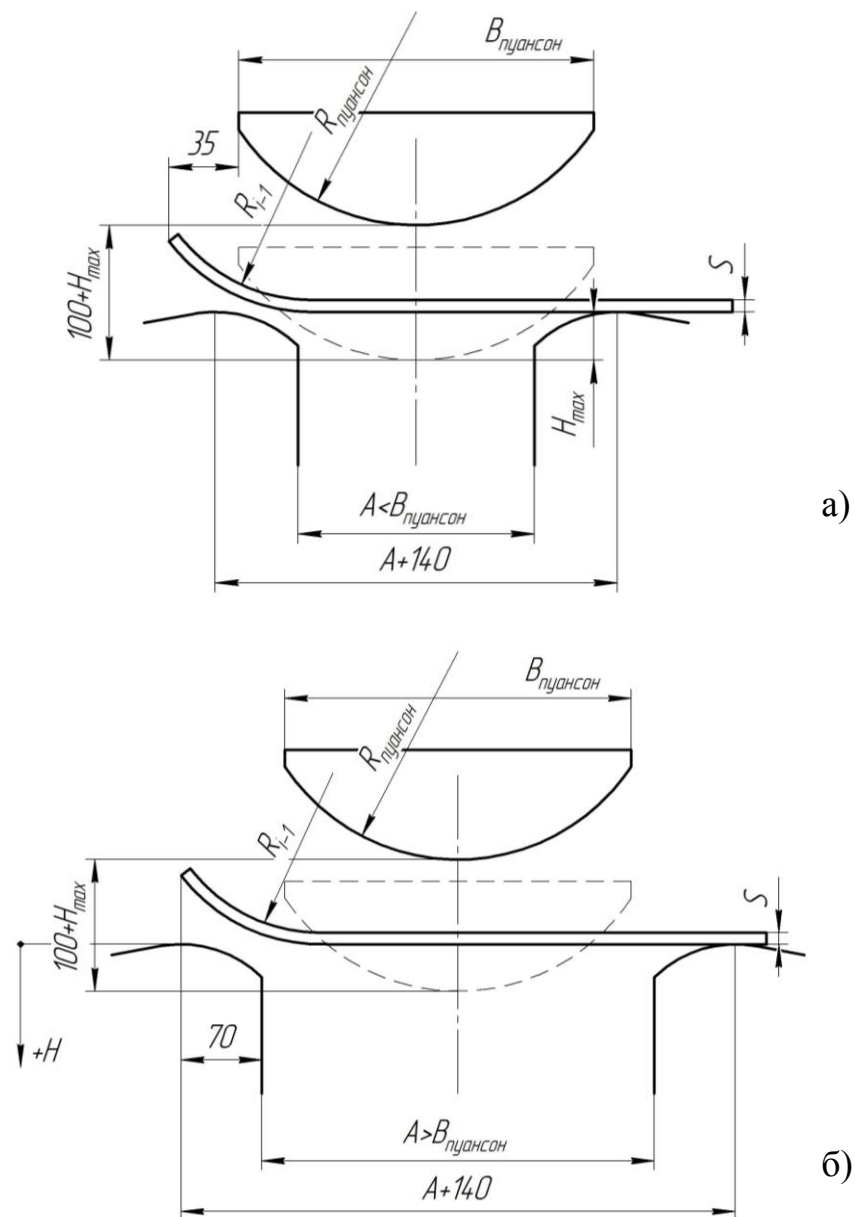


Рисунок 41 – Схемы к определению зазора между листом и пуансоном методом конечных элементов

Для определения зазора между листом и пуансоном (Δ , мм) предложены расчетные схемы, представленные на рисунке 41. Численная модель представлена в двумерной декартовой системе координат. При создании модели инструмента и моделирования процесса шаговой формовки листа задавались следующие параметры:

- геометрия пуансона и опор нижнего инструмента (согласно чертежам компании SMS Meer);
- начальное положение пуансона;
- геометрические параметры листовой заготовки с начальным радиусом;
- ход рабочего инструмента, $100 + H_{\max}$, мм. Положительное направление хода рабочего инструмента показано на рисунке 41;
- контактное трение. В расчетах был принят коэффициент трения равный 0,15 [98];
- реологическое поведение материала листа – изотропное упруго-пластическое;
- реологическое поведение материала пуансона и опор нижнего инструмента – абсолютно жесткое тело.

Для определения зазора при процессе шаговой формовки листа в работе выбран ПФЭ. С целью оценочного исследования по определению зазора между листом и пуансоном каждый из факторов варьируем на 3-х уровнях. В ПФЭ были выбраны следующие факторы:

S – с пределами изменения величины от 8 мм, до 48 мм с интервалом 20 мм;

σ_T – величина предела текучести равна 450 МПа, что соответствует стали для труб класса прочности K52;

$R_{\text{пуансон}}$ – радиус пуансона, с величинами равными: 180 мм, 350 мм, 450 мм;

A – расстояние между опорами нижнего инструмента, с величинами равными: 200 мм, 350 мм, 450 мм;

R_{i-1} – радиус заготовки на предыдущем шаге, с величинами равными: 200 мм, 435 мм, 670 мм;

$B_{\text{пуансон}}$ – ширина пуансона, мм. Ширина пуансона зависит от радиуса пуансона;

H_{max} – максимальный ход пуансона. Максимальный ход пуансона согласно рисунку 41-а), можно рассчитать по выражению:

$$H_{\text{max}} = R_{\text{пуансон}} + R_{\text{бойка}} - \sqrt{(R_{\text{пуансон}} + S + R_{\text{бойка}})^2 - \left(\frac{A + 140}{2}\right)^2}. \quad (31)$$

Количество численных экспериментов по предложенной схеме ПФЭ 3^4 составляет 81 шт.

В результате решения задач математического моделирования был определен максимальный зазор между листом и пуансоном.

Исходные параметры и результаты расчета сведены в таблицу 11.

По результатам вычислений видно, что максимальный зазор между листом и пуансоном не превышает 3 мм.

Установлено, что величина зазора между листом и пуансоном имеет стохастический характер. Для обработки данных была построена диаграмма Парето (рисунок 42), в которой фиксировалось количество значений величины зазора в интервале от 0 до 3 мм с шагом 0,25 мм.

Как видно из рисунка 42 большое количество повторений (82,7% от общего количества экспериментов) величины зазора между пуансоном и листом лежит в интервале от 0 до 1,25 мм. Следовательно, при различных значениях факторов образование зазора между листом и пуансоном может достигать до 1,25 мм.

Таблица 11 – Сводная таблица результатов расчета в MSC Марс для определения зазора между листом и пуансоном

№	S , мм	R_{i-1} , мм	$R_{\text{пуансон}}$, мм	$B_{\text{пуансон}}$, мм	A , мм	H_{max} , мм	Δ , мм
1	2	3	4	5	6	7	8
1	8	200	180	300	200	47,5	0
2					350	128,6	1
3*					450	–	
4			350	400	200	24,7	0,1
5					350	63	0
6					450	99,7	0,6
7			450	500	200	18,5	0
8					350	48,7	0
9					450	76,4	0
10		435	180	300	200	47,5	0,4
11					350	128,6	0,7
12*					450	–	
13			350	400	200	24,7	0,2
14					350	63	0,5
15					450	99,7	0
16			450	500	200	18,5	0
17					350	48,7	0
18					450	76,4	0,2
19		670	180	300	200	47,5	0,4
20					350	128,6	0,3
21*			450	–			
22			350	400	200	24,7	0
23		350			63	0,3	

Продолжение таблицы 11

1	2	3	4	5	6	7	8		
24	8	670	350	400	450	99,7	0,2		
25					200	18,5	0,1		
26			450	500	350	48,7	0,2		
27					450	76,4	0,3		
28	28	200	180	300	200	23,2	0		
29					350	93,3	1,9		
30*					450	191,5			
31					200	3,3	0,5		
32			350	400	350	39,6	0		
33					450	73,9	1,8		
34					200	-2,4	1,4		
35			450	500	350	26,5	0,7		
36					450	52,9	0,3		
37			435	180	300	200	23,2	1,1	
38		350				93,3	2,2		
39*		450				191,5			
40							200	3,3	0,2
41		350				400	350	39,6	0,2
42					450	73,9	0,3		
43					200	-2,4	0,1		
44		450		500	350	26,5	0		
45					450	52,9	0		
46		670		180	300	200	23,2	1,2	
47			350			93,3	1,5		
48*	450		191,5						

Продолжение таблицы 11

1	2	3	4	5	6	7	8
49	28	670	350	400	200	3,3	1
50					350	39,6	0,9
51					450	73,9	1
52			450	500	200	-2,4	0,5
53					350	26,5	0,4
54					450	52,9	0,3
55	48	200	180	300	200	-0,5	0
56					350	61,9	1,2
57*					450	136,6	
58			350	400	200	-18,1	0,1
59					350	16,4	0
60					450	48,8	1,4
61		450	500	200	200	-23,3	0,9
62					350	4,5	0,8
63					450	29,8	0,3
64			180	300	200	-0,5	1,4
65					350	61,9	2,8
66*					450	136,6	
67		435	350	400	200	-18,1	0,3
68					350	16,4	0,4
69					450	48,8	0,4
70			450	500	200	-23,3	0
71					350	4,5	0
72					450	29,8	0
73		670	180	300	200	-0,5	1,5

Продолжение таблицы 11

1	2	3	4	5	6	7	8
74	48	670	180	300	350	61,9	2,3
75*					450	136,6	
76			350	400	200	-18,1	1,1
77					350	16,4	1,7
78			450	500	450	48,8	2,1
79					200	-23,3	1,0
80					350	4,5	1,8
81			450		450	29,8	0,7

Примечание: численные эксперименты, отмеченные «*» не рассчитывались из-за большого хода пуансона

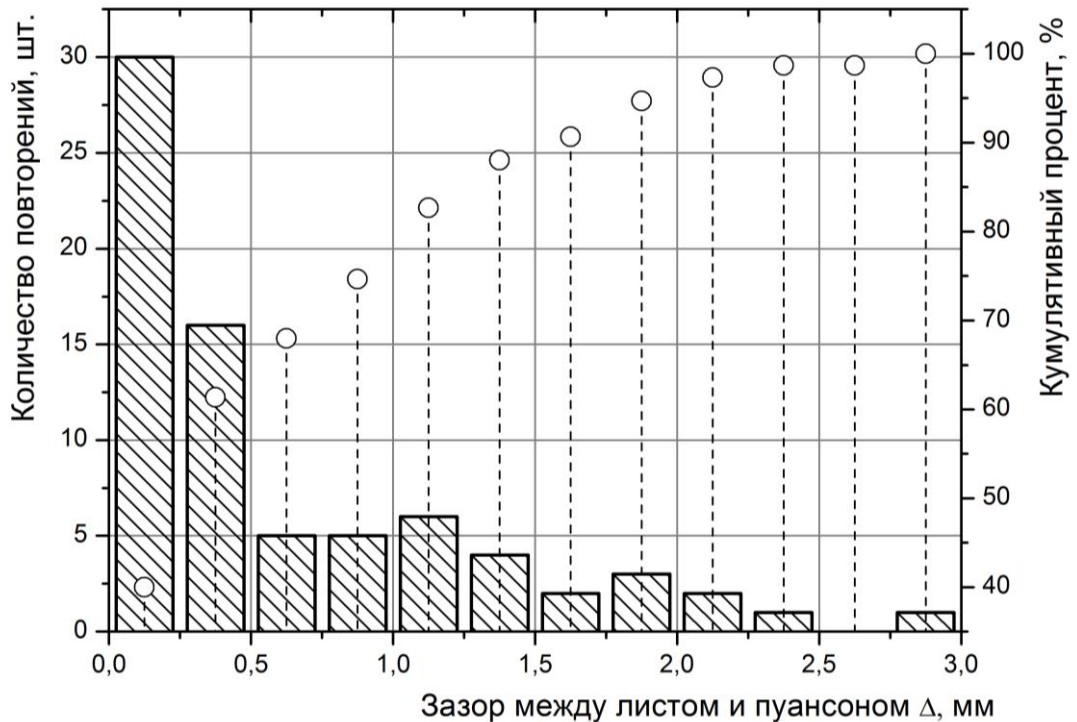


Рисунок 42 – Распределение величины зазора в рассматриваемых интервалах

Большие значения величины зазора между пуансоном и листом (от 1,5 до 3 мм) как правило образовывались в результате расчетов по второй расчетной схеме. Также при увеличении толщины стенки величина зазора несколько увеличивается.

Для разработки математической модели координатным методом по результатам вычислений можно сделать допущение, что зазор между листом и пуансоном в процессе формовки не образуется.

4.2 Введение системы координат, допущений и упрощений

Для теоретического исследования процесса шаговой формовки примем прямоугольную систему координат, которая в пространстве образуется двумя взаимно перпендикулярными осями OX , OY . Оси координат пересекаются в точке O , которая является центром окружности левой опоры нижнего инструмента. Выбранное положительное направление указано стрелками на

рисунках 43, 44. Также обозначим положительное направление хода пуансона, представленное на рисунках 43, 44.

Для описания процесса шаговой формовки листа координатным методом примем следующую систему допущений и упрощений:

- 1) деформируемый металл идеально упруго-пластичный;
- 2) силы контактного трения постоянны;
- 3) контакт между листом и опорами нижнего инструмента – точечный;
- 4) радиус предыдущего шага и радиус формуемого шага при нагрузке постоянны;
- 5) зазор между листом и пуансоном по вертикальной составляющей отсутствует;
- 6) радиус заготовки под нагрузкой не равен радиусу пуансона;
- 7) переход от деформируемого участка к недеформируемому происходит по касательной;
- 8) форма трубной заготовки без прямолинейных участков. Это допущение справедливо лишь в случае формовки листа пуансоном шириной равной или большей расстояния между опорами нижнего инструмента. В случае, когда ширина пуансона намного меньше расстояния между опорами нижнего инструмента – допущение необходимо учитывать;
- 9) профиль подогнутой кромки при расчетах первого шага заменяется однорадиусным профилем.

В ходе математического моделирования, описанного в пункте 4.1 допущения 6-8 полностью подтверждаются. Допущение 5 также справедливо поскольку зазор между листом и пуансоном в большинстве случаев в ходе численных экспериментов не превышает 1,25 мм.

4.3 Разработка модели исследуемого процесса

Изменение геометрии трубной заготовки при шаговой формовке листа определяется рядом факторов, главными из которых являются: радиус

пуансона, радиус опор, расстояние между опорами нижнего инструмента, толщина стенки трубной заготовки, механические свойства формуемого листа и др., см. рисунки 43, 44 [101, 102].

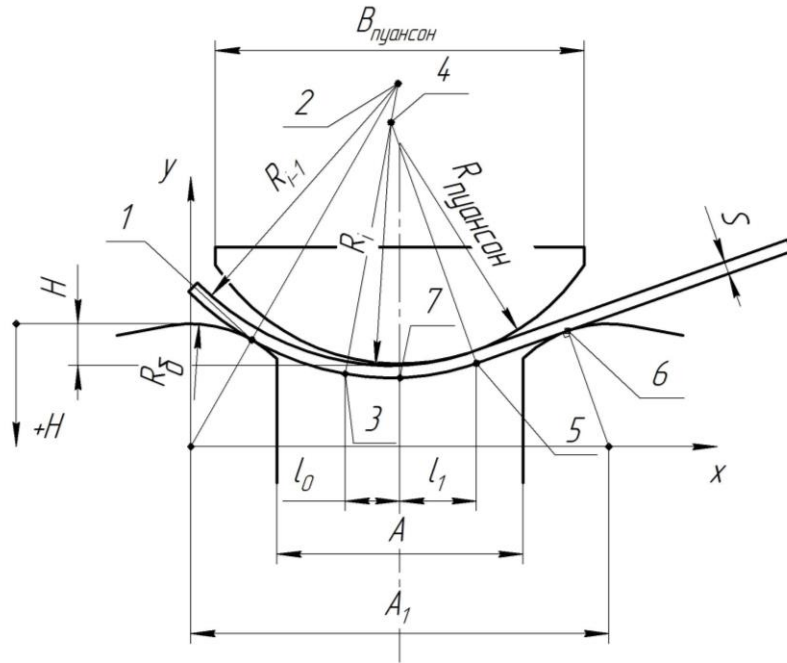


Рисунок 43 – Расчетная схема процесса шаговой формовки листа с геометрическими граничными условиями без наличия прямолинейного участка

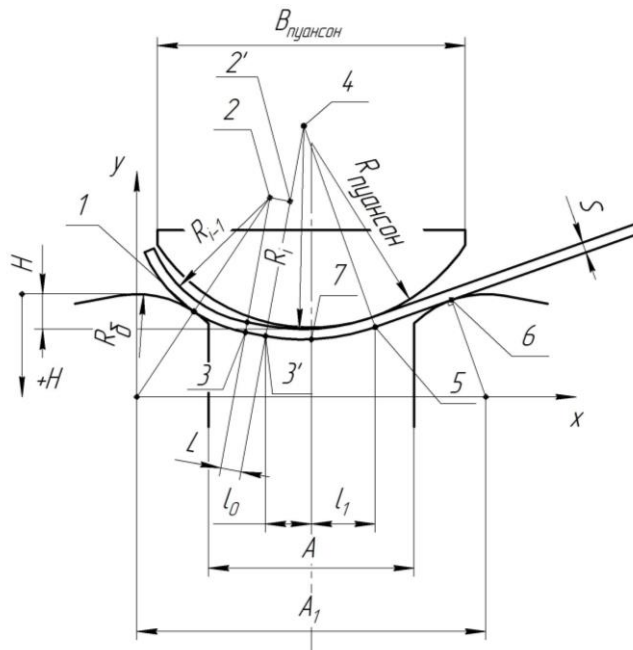


Рисунок 44 – Расчетная схема процесса шаговой формовки листа с геометрическими граничными условиями с наличием прямолинейного участка

Определяющие параметры исследуемого процесса:

R_{i-1} – распружиненный радиус заготовки на предыдущем шаге, мм;

R_i – радиус заготовки под нагрузкой на текущем шаге, мм;

ρ_i – распружиненный радиус заготовки на текущем шаге, мм;

R_6 – радиус опоры нижнего инструмента, мм;

l_0 и l_1 – горизонтальные проекции точек перехода от R_{i-1} к R_i и от R_i к прямолинейному участку, мм;

L – прямолинейный участок при формовке, мм;

A – расстояние между опорами нижнего инструмента, мм;

A_1 – расстояние между центрами радиусов опор нижнего инструмента, мм. $A_1 = A + 140$;

$R_{\text{пуансон}}$ – радиус пуансона, мм;

$B_{\text{пуансон}}$ – ширина пуансона, мм;

H – глубина опускания пуансона, мм;

1-9 – узловые точки для описания геометрии;

$D_{\text{вн}}$ – внутренний диаметр трубы, мм;

K – ширина между боковыми кромками заготовки после формовки, мм;

a – большая полуось эллипса, мм;

c – величина овала эллипса, мм.

Для определения радиуса R_i воспользуемся уравнениями (3) – (7).

Определение требуемого готового радиуса заготовки на i -ом шаге возможно при построении эллипса с длиной дуги, вычисляемой по формуле [98], и известном отношении малой полуоси к большой.

$$\Pi \approx D_{\text{вн}} \cdot \pi + K = \frac{\pi}{2} \sqrt{2(a^2 + (a - c)^2) - \frac{c^2}{4}} + K. \quad (32)$$

Формула для определения радиуса заготовки на i -ом шаге имеет вид [98]:

$$\rho_i = a^2(a-c)^2 \left(\frac{x^2}{a^4} + \frac{y^2}{(a-c)^4} \right)^{\frac{3}{2}}, \quad (33)$$

где x и y – координаты точки профиля в центре формуемого шага, мм.

Расстояние между формуемыми шагами определяется по формуле:

$$l_{\text{шаг}} = \frac{\Pi - (B + 35 \cdot 2)}{n - 1}, \quad (34)$$

где n – количество шагов;

"35 · 2" – зазор между манипуляторами и краем пуансона.

Решение задачи согласно рисунка 43 примет вид:

$$y_1 = \sqrt{R_0^2 - x_1^2}, \quad (35)$$

$$x_2 = \frac{R_0 + (R_{i-1} + S)}{R_0} \cdot x_1, \quad (36)$$

$$y_2 = \sqrt{(R_{i-1} + S)^2 - (x_2 - x_1)^2} + y_1, \quad (37)$$

$$x_3 = \frac{A_1}{2} - l_0, \quad (38)$$

$$y_3 = y_2 - \sqrt{(R_{i-1} + S)^2 - (x_2 - x_3)^2}, \quad (39)$$

$$x_4 = x_3 - (R_i + S) \cdot (x_3 - x_2) \cdot \sqrt{\frac{1}{(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2}}, \quad (40)$$

$$y_4 = y_3 - (R_i + S) \cdot (y_3 - y_2) \cdot \sqrt{\frac{1}{(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2}}, \quad (41)$$

$$x_5 = \frac{A_1}{2} + l_1, \quad (42)$$

$$y_5 = y_4 - \sqrt{(R_i + S)^2 - (x_2 - x_5)^2}, \quad (43)$$

$$x_6 = \frac{A_1 \cdot (R_i + S) + R_6(x_4 - x_5)}{(R_i + S)}, \quad (44)$$

$$y_6 = \sqrt{R_6^2 - (A_1 - x_6)^2}, \quad (45)$$

$$y_7 = y_4 - \sqrt{R_i^2 - \left(x_4 - \frac{A_1}{2}\right)^2}, \quad (46)$$

$$H = R_6 - y_7 - S. \quad (47)$$

Решение задачи согласно рисунка 44 будет отличаться только дополнительными уравнениями:

$$x_3' = \frac{A_1}{2} - l_0, \quad (48)$$

$$y_3' = y_2 - \sqrt{L^2 + (R_{i-1} + S)^2 - (x_2 - x_3')^2}, \quad (49)$$

$$\begin{cases} L^2 = (x_2 - x_2')^2 + (y_2 - y_2')^2 \\ (R_{i-1} + S)^2 = (x_2' - x_3')^2 + (y_2' - y_3')^2 \end{cases}, \quad (50)$$

$$\begin{cases} L^2 = (x_3 - x_3')^2 + (y_3 - y_3')^2 \\ (R_{i-1} + S)^2 = (x_2 - x_3)^2 + (y_2 - y_3)^2 \end{cases} \quad (51)$$

Преобразуя уравнение (50) получаем следующее выражение:

$$\begin{aligned} & \left(1 + \frac{(x_3' - x_2)^2}{(y_3' - y_2)^2} \right) \cdot x_2'^2 + \\ & + \left(\frac{(x_3' - x_2) \left((R_{i-1} + S)^2 - L^2 - x_3'^2 + y_3'^2 + x_2^2 + y_2^2 \right)}{(y_3' - y_2)^2} - 2x_2 - \frac{2y_2(x_2 - x_3')}{y_3' - y_2} \right) \cdot x_2' + \\ & + x_2^2 + y_2^2 - L^2 - 2y_2 \frac{L^2 - (R_{i-1} + S)^2 - x_2^2 - y_2^2 + x_3'^2 - y_3'^2}{2(y_3' - y_2)} - \\ & - L^2 \frac{2(R_{i-1} + S)^2 - L^2 + 2(y_3'^2 - x_3'^2 + x_2^2 + y_2^2)}{4(y_3' - y_2)^2} + \\ & + (R_{i-1} + S)^2 \frac{(R_{i-1} + S)^2 + 2(y_3'^2 - x_3'^2 + x_2^2 + y_2^2)}{4(y_3' - y_2)^2} + \\ & + \frac{(y_3'^2 - x_3'^2 + x_2^2 + y_2^2)^2}{4(y_3' - y_2)^2} = 0. \end{aligned} \quad (52)$$

Произведем замену:

$$T = 1 + \frac{\left(x_3' - x_2\right)^2}{\left(y_2 - y_3'\right)^2}, \quad (53)$$

$$U = \frac{\left(x_3' - x_2\right)\left(\left(R_{i-1} + S\right)^2 - L^2 - x_3'^2 - y_3'^2 + x_2^2 + y_2^2\right)}{\left(y_2 - y_3'\right)^2} - 2x_2 - \frac{2y_2\left(x_3' - x_2\right)}{y_2 - y_3'}, \quad (54)$$

$$Y = x_2^2 + y_2^2 - L^2 - 2y_2 \frac{\left(R_{i-1} + S\right)^2 - L^2 + x_2^2 + y_2^2 - x_3'^2 - y_3'^2}{2\left(y_2 - y_3'\right)} - L^2 \frac{2\left(R_{i-1} + S\right)^2 - L^2 + 2\left(y_3'^2 - x_3'^2 + x_2^2 + y_2^2\right)}{4\left(y_2 - y_3'\right)^2} + \left(R_{i-1} + S\right)^2 \frac{\left(R_{i-1} + S\right)^2 + 2\left(x_2^2 + y_2^2 - y_3'^2 - x_3'^2\right)}{4\left(y_2 - y_3'\right)^2} + \frac{\left(x_2^2 + y_2^2 - y_3'^2 - x_3'^2\right)^2}{4\left(y_2 - y_3'\right)^2}. \quad (55)$$

Тогда:

$$x_2' = -\frac{U - \sqrt{U^2 - 4 \cdot T \cdot Y}}{2 \cdot T}, \quad (56)$$

$$y_2' = y_2 - \sqrt{L^2 - (x_2 - x_2')^2}. \quad (57)$$

Аналогичным образом решается уравнение (51):

$$x_3 = -\frac{U_1 - \sqrt{U_1^2 - 4 \cdot T_1 \cdot Y_1}}{2 \cdot T_1}, \quad (58)$$

$$y_3 = y_3 + \sqrt{L^2 - (x_3 - x_3')^2}, \quad (59)$$

где T_1, U_1, Y_1 – коэффициенты уравнения:

$$T_1 = 1 + \frac{(x_3' - x_2)^2}{(y_3' - y_2)^2}, \quad (60)$$

$$U_1 = -\frac{(x_3' - x_2) \left((R_{i-1} + S)^2 - L^2 + x_3'^2 + y_3'^2 - x_2^2 - y_2^2 \right)}{(y_3' - y_2)^2} - \frac{-2x_3' - \frac{2y_3'(x_2 - x_3')}{y_3' - y_2}}{y_3' - y_2}, \quad (61)$$

$$\begin{aligned}
Y_1 = & x_3'^2 + y_3'^2 - L^2 - \\
& - y_3' \frac{(R_{i-1} + S)^2 - L^2 - x_2^2 - y_2^2 + x_3'^2 + y_3'^2}{y_3' - y_2} - \\
& - L^2 \frac{2(R_{i-1} + S)^2 - L^2 + 2(y_3'^2 + x_3'^2 - x_2^2 - y_2^2)}{4(y_3' - y_2)^2} + \\
& + (R_{i-1} + S)^2 \frac{(R_{i-1} + S)^2 + 2(y_3'^2 + x_3'^2 - x_2^2 - y_2^2)}{4(y_3' - y_2)^2} + \\
& + \frac{(y_3'^2 + x_3'^2 - x_2^2 - y_2^2)^2}{4(y_3' - y_2)^2}.
\end{aligned} \tag{62}$$

Система уравнений решается с помощью алгоритма, представленного на рисунке 45.

Из анализа полученных выражений следует, что при известных значениях l_0 , l_1 и L определяется ход пуансона. Однако данные параметры заранее не известны. Для определения значимости каждого фактора произведем вычисления по предложенным уравнениям. Результаты вычисления представлены в таблице 12.

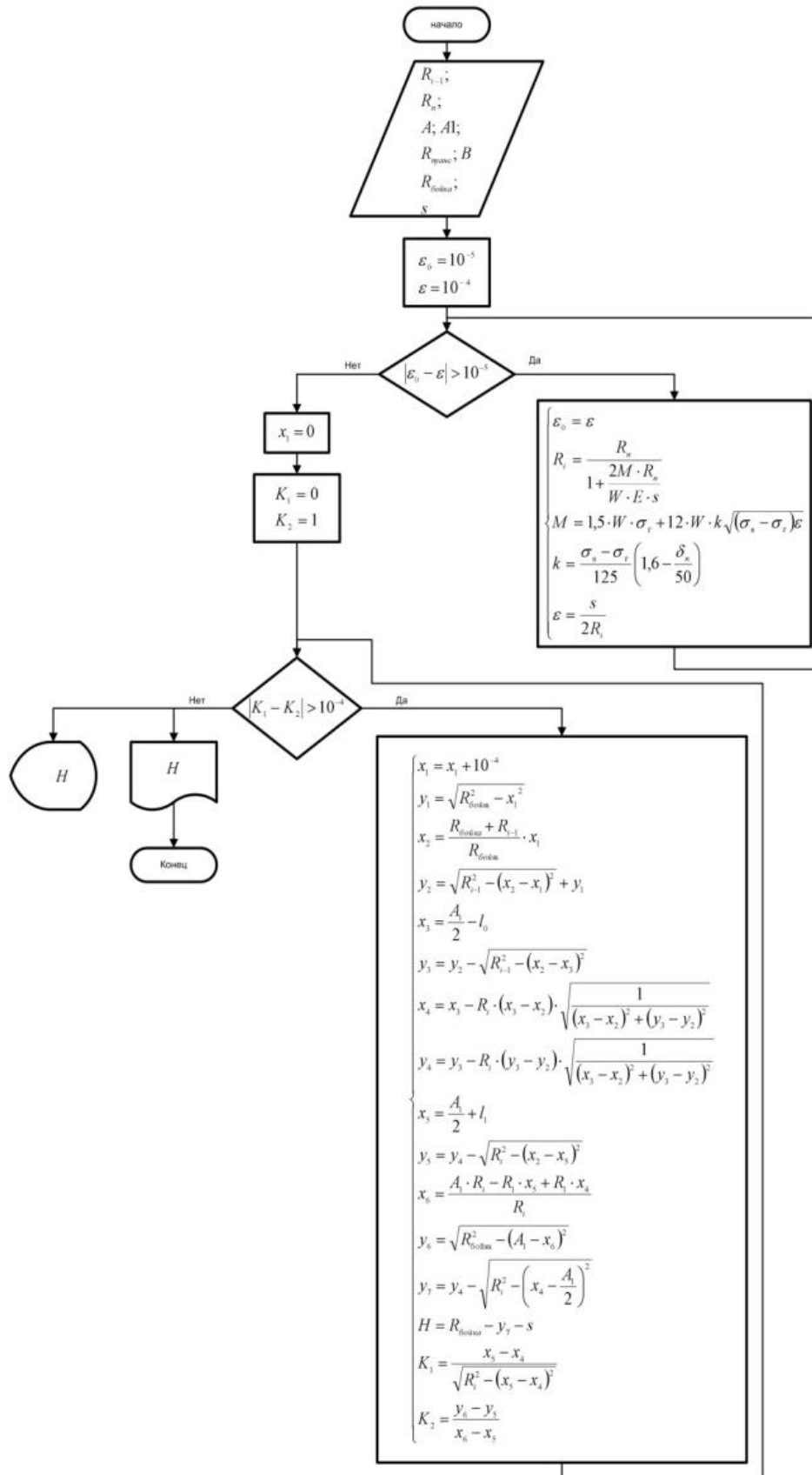


Рисунок 45 – Алгоритм расчета глубины опускания пуансона на i -ом шаге

Таблица 12 – Результаты вычисления хода пуансона в зависимости от изменения l_0 , l_1 и L

A_1 , мм	S , мм	R_6 , мм	$R_{\text{пуансон}}$, мм	R_i , мм	R_{i-1} , мм	L , мм	l_0 , мм	l_1 , мм	H , мм
580	10	100	475	600	635	0	94,7	151,5	56,1
								132,6	54,0
								113,6	51,66
								94,7	48,99
							75,76	151,5	55,94
							56,82		55,75
							37,9		55,57
							0		55,13
						60	94,7	151,5	49,28
								132,6	47,21
								113,6	44,81
								94,7	42,17
							75,76	151,5	48,22
							56,82		47,11
							37,9		45,99
							0		43,73

Из таблицы видно, что при $L = const = 0$, $l_1 = const$, $l_0 = var$ глубина хода пуансона незначительно изменяется. При наличие прямолинейного участка глубина хода пуансона изменяется в большом интервале.

Для определения прямолинейного участка при формовке листа на i -ом шаге воспользуемся следующим уравнением:

$$L = l_{\text{Н шаг}} - \widehat{l}_{0_i} - \widehat{l}_{1_{i-1}}, \quad (63)$$

где \widehat{l}_{0_i} – длина дуги от горизонтальной проекции l_{0_i} на текущем шаге формовки листа, см. рисунок 46;

$\widehat{l}_{1_{i-1}}$ – длина дуги от горизонтальной проекции $l_{1_{i-1}}$ на предыдущем шаге формовки листа;

$l_{\text{Н шаг}}$ – длина шага по наружной поверхности:

$$l_{\text{Н шаг}} = \left(1 + \frac{\pi \cdot S}{\Pi}\right) \cdot l_{\text{ шаг}}, \quad (64)$$

$$\widehat{l}_{0_i} = (R_i + S) \cdot 2 \cdot \arcsin \left(\frac{R_i + S}{\sqrt{(x'_{3i} - x_{7i})^2 + (y'_{3i} - y_{7i})^2}} \right), \quad (65)$$

$$\widehat{l}_{1_{i-1}} = (R_{i-1} + S) \cdot 2 \cdot \arcsin \left(\frac{R_{i-1} + S}{\sqrt{(x_{5i-1} - x_{7i-1})^2 + (y_{5i-1} - y_{7i-1})^2}} \right). \quad (66)$$

Для определения горизонтальных проекций l_0 и l_1 разобьем процесс формовки листа на i -ом шаге на следующие этапы:

- 1) минимальная глубина опускания пуансона;
- 2) средняя глубина опускания пуансона;
- 3) максимальная глубина опускания пуансона.

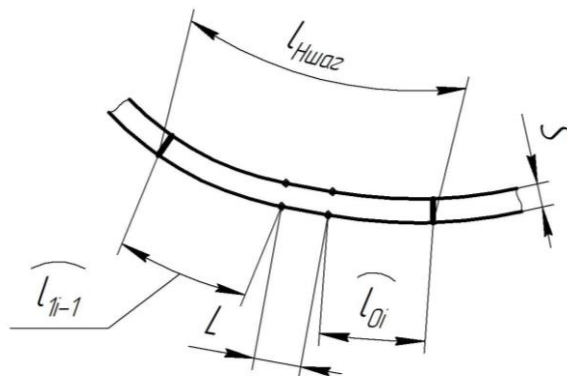


Рисунок 46 – Схема к расчету прямолинейного участка при шаговой формовке листа

4.3.1 Первый этап формовки листа

На первом этапе лист одновременно касается двух опор нижнего инструмента и пуансона, при этом не происходит локального изгиба заготовки в очаге деформации. В этом случае горизонтальные проекции l_0 и l_1 (рисунок 47) определяются по уравнениям:

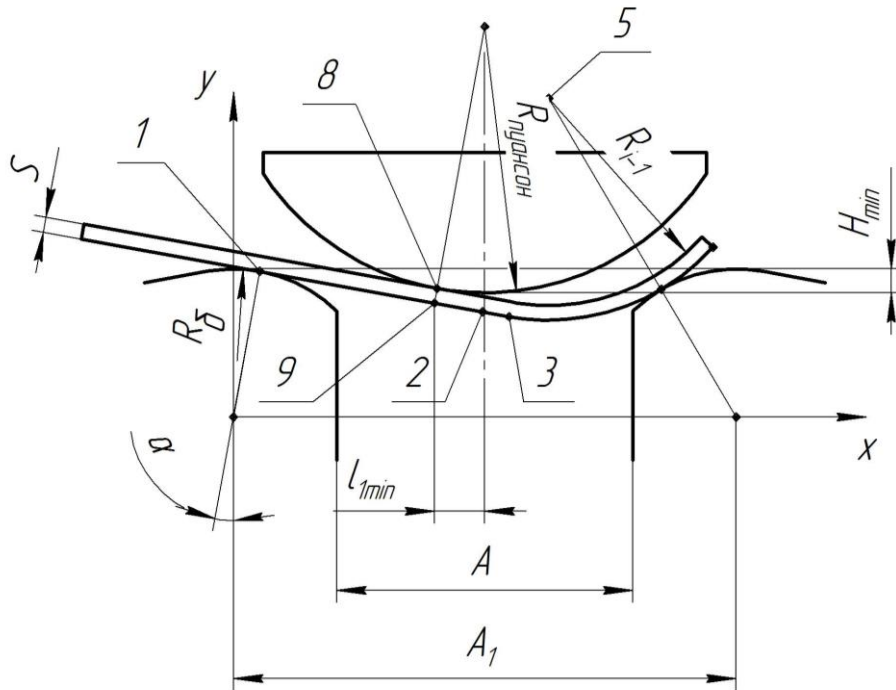


Рисунок 47 – Схема к определению минимальной глубины опускания пуансона

$$y_1 = \sqrt{R_0^2 - x_1^2}, \quad (67)$$

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{x_1}{R_0}\right), \quad (68)$$

$$l = R_0 \alpha, \quad (69)$$

$$x_2 = x_1 + \left(\frac{A_1}{2} - l\right) \cos(\alpha), \quad (70)$$

$$y_2 = y_1 - \left(\frac{A_1}{2} - l \right) \sin(\alpha), \quad (71)$$

$$y_3 = y_2 - \Delta X \cdot \sin(\alpha), \quad (72)$$

$$x_3 = x_2 + \Delta X \cdot \cos(\alpha), \quad (73)$$

$$x_5 = x_3 + (R_{i-1} + S) \cdot \sin(\alpha), \quad (74)$$

$$y_5 = y_3 + (R_{i-1} + S) \cdot \cos(\alpha), \quad (75)$$

$$x_9 = \frac{A_1}{2} - (R_{\text{пуансон}} + S) \cdot \sin(\alpha), \quad (76)$$

$$y_9 = \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2} \cdot x_9 + \left(y_1 - \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2} \cdot x_1 \right), \quad (77)$$

$$y_8 = y_9 + (R_{\text{пуансон}} + S) \cdot \cos(\alpha), \quad (78)$$

$$H_{\min} = y_1 - y_8 + R_{\text{пуансон}}, \quad (79)$$

$$l_{1\min} = \frac{A_1}{2} - x_9, \quad (80)$$

$$l_{0\min} = -l_{1\min}, \quad (81)$$

$$L = l_{\text{Н шаг}}, \quad (82)$$

где α – угол наклона несформованной части листа относительно оси абсцисс,

радиан;

$\Delta X = x_3 - x_2$ – расстояние на листе от точки перегиба до оси пуансона в свободном состоянии до формовки листа, мм.

4.3.2 Второй этап формовки листа

Для определения l_0 и l_1 на втором этапе сделаем следующие допущения:

- 1) при средней глубине опускания пуансона $l_0 = 0$, (рисунок 48, 49);
- 2) радиус деформированного участка листа равен радиусу пуансона.

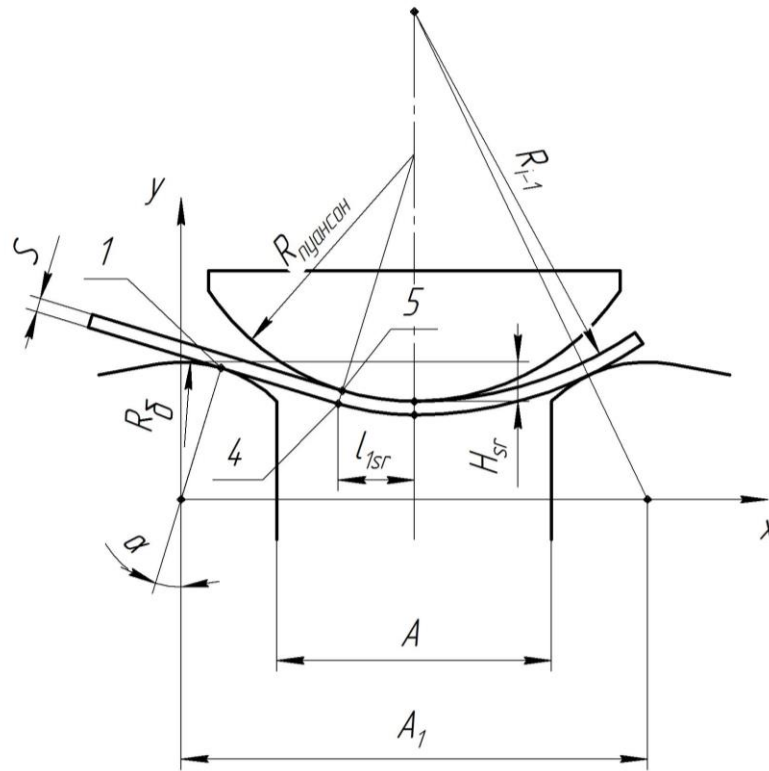


Рисунок 48 – Схема к определению средней глубины опускания пуансона без наличия прямолинейного участка

Согласно рисунка 48 глубина опускания пуансона определяется по следующей формуле:

$$H_{sr} = R_6 - \left[\sqrt{(R_{i-1} + S + R_6)^2 - \left(\frac{A_1}{2}\right)^2} - R_{i-1} \right]. \quad (83)$$

С учетом прямолинейного участка (рисунок 49) глубина опускания пуансона определяется по формуле:

$$H_{sr} = R_6 - \left[\sqrt{(R_{i-1} + S + R_6)^2 - \left(\frac{A_1}{2} - L\right)^2} - R_{i-1} \right]. \quad (84)$$

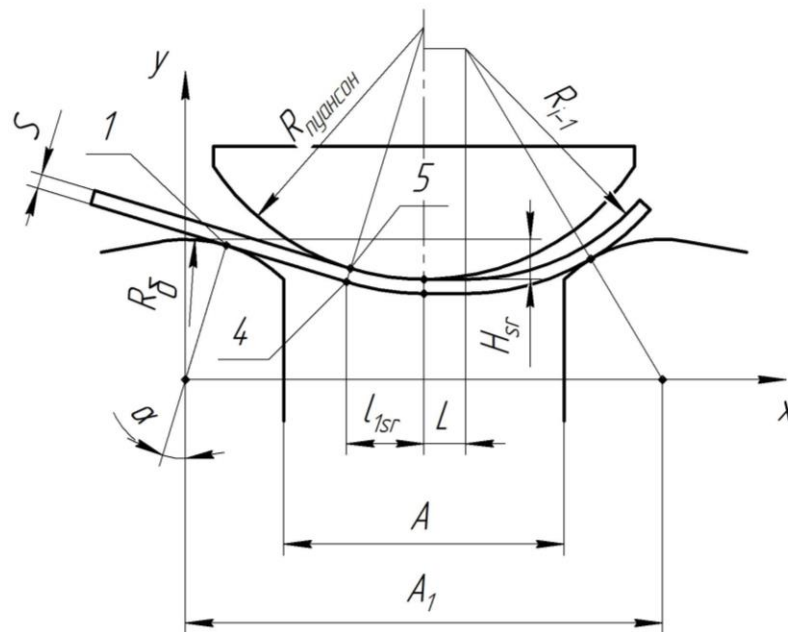


Рисунок 49 – Схема к определению средней глубины опускания пуансона с наличием прямолинейного участка

Горизонтальная проекция l_{sr} в обоих случаях находится из последовательного вычисления уравнений:

$$y_1 = \sqrt{R_6^2 - x_1^2}, \quad (85)$$

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{x_1}{R_6}\right), \quad (86)$$

$$x_4 = \frac{A_1}{2} - (R_{\text{пуансон}} + S) \cdot \sin(\alpha), \quad (87)$$

$$x_5 = \frac{R_{\text{пуансон}} \cdot x_4}{R_{\text{пуансон}} + S}, \quad (88)$$

$$l_{1sr} = x_4, \quad (89)$$

$$L = l_{\text{Ншаг}} - \widehat{l}_{1_{i-1}}, \quad (90)$$

где α – угол наклона несформованной части листа относительно оси абсцисс, радиан.

4.3.3 Третий этап формовки листа

На третьем этапе формовки листа при условии, что $B_{\text{пуансон}} \geq A$, глубина прогиба определяется по формуле (31).

Следовательно, $l_{0\max}$ и $l_{1\max}$ вычисляются как:

$$l_{0\max} = l_{1\max} = \frac{R_{\text{пуансон}} + S}{R_{\text{пуансон}} + S + R_{\text{г}}} \cdot \frac{A_1}{2}, \quad (91)$$

$$L = 0, \quad (92)$$

$$\widehat{l}_{0\max} = \widehat{l}_{1\max} = (R_{\text{пуансон}} + S) \cdot \arcsin\left(\frac{l_{0\max}}{R_{\text{пуансон}} + S}\right). \quad (93)$$

В таблице 13 представлены результаты расчетов горизонтальных проекций l_0 и l_1 в зависимости от глубины опускания пуансона. Графически результаты расчетов представлены на рисунке 50.

Таблица 13 – Результаты вычисления горизонтальных проекций l_0 и l_1 от глубины опускания пуансона

A_1 , мм	S , мм	R_0 , мм	$R_{\text{пуансон}}$, мм	R_{i-1} , мм	H , мм	l_0 , мм	l_1 , мм
580	10	100	475	635	10,8	-38	38
					20	-37	45
					30	-36	66
					40	-31	90
					48,8	1	126
					50	8	135
					60	110	192
					66,9	240	238

Аппроксимирующие функции горизонтальных проекций имеют вид:

$$l_1 = K_0 + K_1 \cdot H + K_2 \cdot H^2 + K_3 \cdot H^3, \quad (94)$$

$$l_0 = N_0 + N_1 \cdot H + N_2 \cdot H^2 + N_3 \cdot H^3 + N_4 \cdot H^4 + N_5 \cdot H^5, \quad (95)$$

где $K_i, N_j, i = 0...3, j = 0...5$ – коэффициенты аппроксимации.

Полученный вид уравнений горизонтальных проекций можно упростить до вида, представленного ниже:

$$l_1 = G_0 + G_1 \cdot H^2 + G_2 \cdot H^3, \quad (96)$$

$$l_0 = F_0 + F_1 \cdot H^4 + F_2 \cdot H^5, \quad (97)$$

$$G_2 = \frac{l_{1\max} + l_{1\min}}{-\frac{H_{\min}^2 + H_{sr}^3 - l_{1\min} - l_{sr}}{H_{sr}^2 + H_{\min}^2} (H_{\min}^2 + H_{\max}^2) + (H_{\min}^3 + H_{\max}^3)}, \quad (98)$$

$$G_1 = -\frac{G_2(H_{\min}^3 + H_{sr}^3) - l_{1\min} - l_{1sr}}{H_{sr}^2 + H_{\min}^2}, \quad (99)$$

$$G_0 = G_1 H_{\min}^2 + G_2 H_{\min}^3 - l_{1\min}, \quad (100)$$

$$F_2 = \frac{l_{1\max} - |l_{1\min}|}{-\frac{H_{\min}^4 + H_{sr}^5 + |l_{1\min}|}{H_{sr}^4 + H_{\min}^4} (H_{\min}^4 + H_{\max}^4) + (H_{\min}^5 + H_{\max}^5)}, \quad (101)$$

$$F_1 = -\frac{F_2(H_{\min}^5 + H_{sr}^5) + |l_{1\min}|}{H_{sr}^4 + H_{\min}^4}, \quad (102)$$

$$F_0 = F_1 H_{\min}^4 + F_2 H_{\min}^5 + |l_{1\min}|. \quad (103)$$

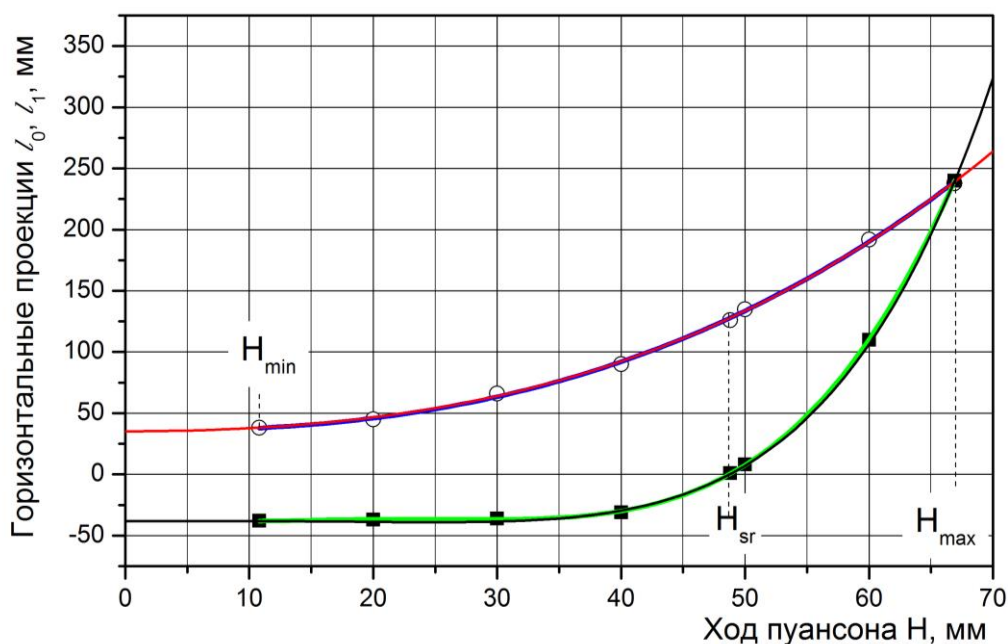


Рисунок 50 – Зависимость горизонтальных проекций l_0 и l_1 от глубины опускания пуансона: \circ – вычисленные значения l_1 ; \blacksquare – вычисленные значения l_0 ; --- – аппроксимирующее уравнение (94) для l_1 ; --- – аппроксимирующее уравнение (95) для l_0 ; --- – аппроксимирующее уравнение (96) для l_1 ; --- – аппроксимирующее уравнение (97) для l_0

В таблице 14 для предложенного случая (см. таблицу 12) приведены численные значения коэффициентов аппроксимации уравнений (94) – (97).

Таблица 14 – Сводная таблица значений коэффициентов для используемых уравнений

Номер уравнения	Аппроксимирующие коэффициенты					
	1			2		
94	K_0	K_1	K_2	K_3		
	36,3	-0,174	0,026	$3,23 \times 10^{-4}$		
95	N_0	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5
	-28,9	-2,4	0,226	$-8,53 \times 10^{-3}$	$1,26 \times 10^{-4}$	$-4,12 \times 10^{-7}$
96	G_0	G_1	G_2			
	35,2	0,021	$3,7 \times 10^{-4}$			
97	F_0	F_1	F_2			
	-38,1	$-1,2 \times 10^{-5}$	$3,9 \times 10^{-7}$			

Решение всех уравнений возможно с использованием алгоритма, представленного на рисунке 51.

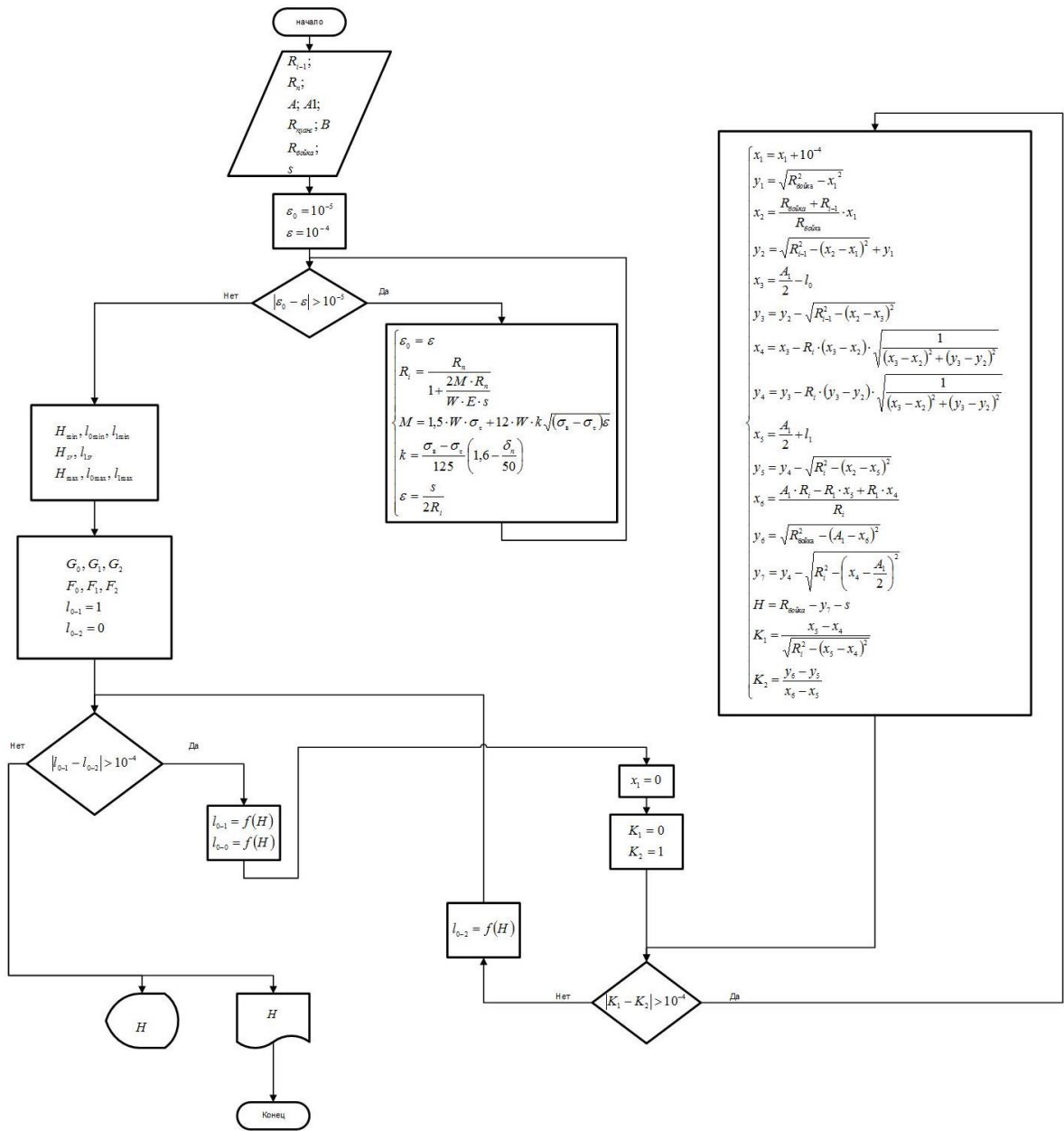


Рисунок 51 – Общий вид алгоритма для расчетов глубины опускания пуансона и горизонтальных проекций l_0, l_1, L

4.4 Определение усилий при формовке листа в трубную заготовку

Из общей схемы, представленной на рисунке 52, деформированного участка на i -том шаге усилие пуансона определяется по следующему уравнению [72]:

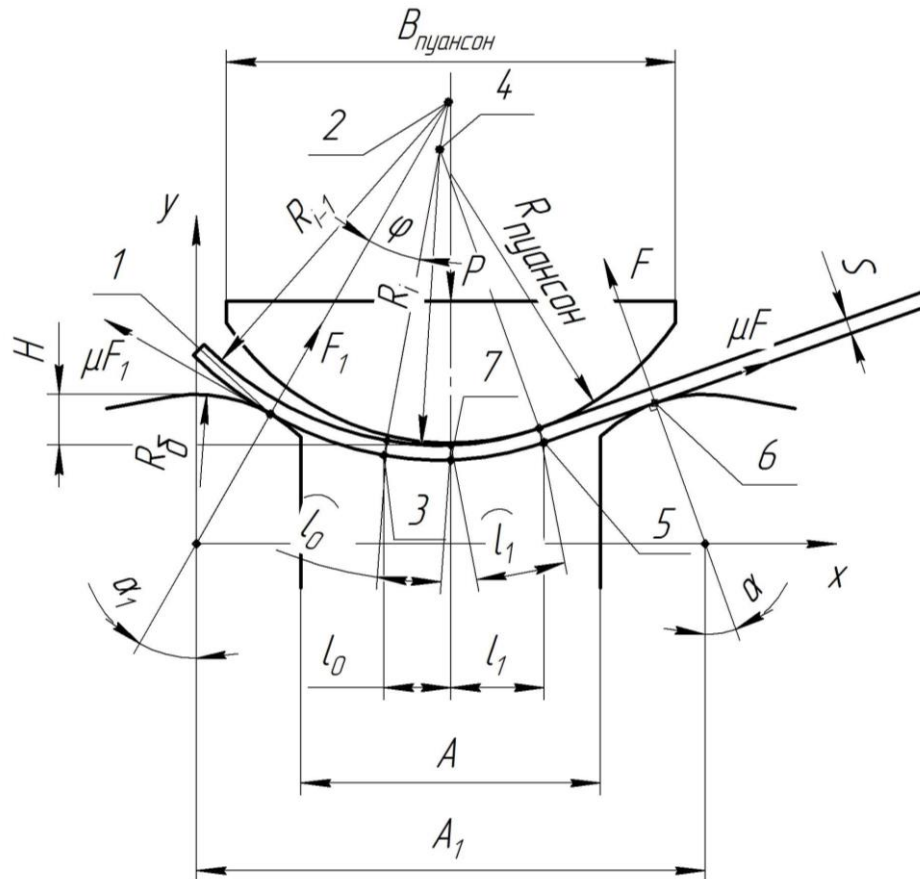


Рисунок 52 – Схема очага деформации при расчете хода пуансона

$$P = F \cdot (\cos(\alpha) + \mu \cdot \sin(\alpha)) + F_1 \cdot (\cos(\alpha_1) + \mu \cdot \sin(\alpha_1)), \quad (104)$$

где F , F_1 – реакции трубной заготовки и опор нижнего инструмента, Н;

α , α_1 – углы контакта трубной заготовки и опор нижнего инструмента, радиан;

μ – коэффициент трения;

φ_1 – угол между центром окружности R_{i-1} и местом сопряжения окружностей, радиан;

M – изгибающий момент в контактной зоне пуансона и трубной заготовки, Н·м:

$$F = \frac{M \cdot \cos(\alpha)}{\frac{A_1}{2} - l_1}, \quad (105)$$

$$F_1 = \frac{M}{2 \cdot R_{i-1} \cdot \sin\left(\frac{\alpha_1 - \varphi_1}{2}\right) \cdot \left(\cos\left(\frac{\alpha_1 - \varphi_1}{2}\right) + \mu \cdot \sin\left(\frac{\alpha_1 - \varphi_1}{2}\right)\right)}, \quad (106)$$

$$\alpha_1 = \arcsin\left(\frac{R_{\text{бойка}}}{x_1}\right), \quad (107)$$

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{R_{\text{бойка}}}{A_1 - x_6}\right), \quad (108)$$

$$\varphi_1 = \arcsin\left(\frac{R_{i-1}}{x_2 - x_3}\right). \quad (109)$$

4.5 Численное исследование влияния изменения радиуса пуансона и расстояния между опорами нижнего инструмента на величину усилий при шаговой формовки труб

Рассмотрим изменение усилия формовки на i -том участке в зависимости от следующих переменных факторов:

A – расстояние между опорами нижнего инструмента, мм;

$R_{\text{пуансон}}$ – радиус пуансона, мм;

и постоянных: $D = 720$ мм; $S = 22$ мм; $R_{i-1} = 295$ мм; $R_i = 311,67$ мм; $R_6 = 100$ мм;

$\sigma_r = 435$ МПа; $\sigma_b = 552$ МПа. Механические свойства соответствуют стали для труб категории прочности X56. Расчет параметров производился согласно

методикам, описанным в пунктах 4.2 – 4.4. Результаты расчетов представлены в таблице 15.

Таблица 15 – Расчетные данные погонного усилия при формовке для различных значений радиусов пуансона и расстояний между опорами нижнего инструмента

$R_{\text{пуансон}},$ мм	A, мм	P, МН/м	$R_{\text{пуансон}},$ мм	A, мм	P, МН/м	$R_{\text{пуансон}},$ мм	A, мм	P, МН/м
1	2	3	4	5	6	7	8	9
180	200	0,693	225	200	0,787	280	200	1,075
	240	0,658		240	0,766		240	1,144
	280	0,625		280	0,747		280	1,251
	320	0,593		320	0,731		320	1,426
	380	0,542		380	0,707		370	1,856
195	200	0,695	240	200	0,846	300	200	1,256
	240	0,66		240	0,837		240	1,429
	280	0,627		280	0,833		280	1,743
	320	0,595		320	0,833		320	2,454
	380	0,548		380	0,841		380	-
210	200	0,737	260	200	0,945	325	200	1,619
	240	0,708		240	0,963		240	2,175
	280	0,68		280	0,994		270	3,289
	320	0,654		320	1,04		320	-
	380	0,615		380	1,156		380	-

На рисунке 53 представлен график изменения погонного усилия в зависимости от расстояний между опорами нижнего инструмента и радиусами пуансона.

Из рисунка 54 видно, что при радиусе пуансона равном 240 мм разница

значений погонного усилия при различных расстояниях между опорами нижнего инструмента минимальна.

Из рисунка 53 видно, что при увеличении радиуса пуансона свыше 240 мм погонное усилие формовки резко увеличивается с увеличением расстояния между опорами нижнего инструмента. Это связано с тем, что при увеличении расстояния между опорами нижнего инструмента увеличивается ход пуансона и тем самым увеличивается контактная площадь формируемой трубной заготовки.

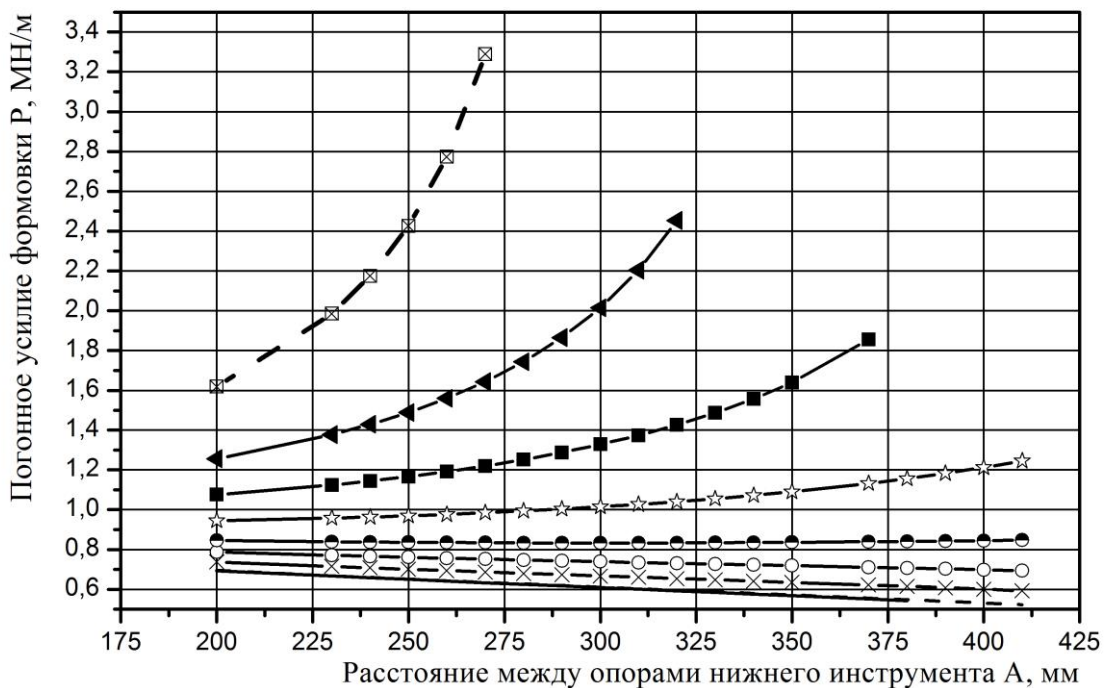


Рисунок 53 – Зависимость изменения погонного усилия от расстояний между

опорами нижнего инструмента: — — $R_{\text{пуансон}} = 180$ мм;

- - - — $R_{\text{пуансон}} = 195$ мм; —×— — $R_{\text{пуансон}} = 210$ мм; —○— — $R_{\text{пуансон}} = 225$ мм;

—●— — $R_{\text{пуансон}} = 240$ мм; —☆— — $R_{\text{пуансон}} = 260$ мм; —■— — $R_{\text{пуансон}} = 280$ мм;

—◀— — $R_{\text{пуансон}} = 300$ мм; —⊠— — $R_{\text{пуансон}} = 325$ мм

На рисунке 54 представлен график зависимости изменения усилия от радиуса пуансона в пределах изменения расстояния между опорами нижнего инструмента.

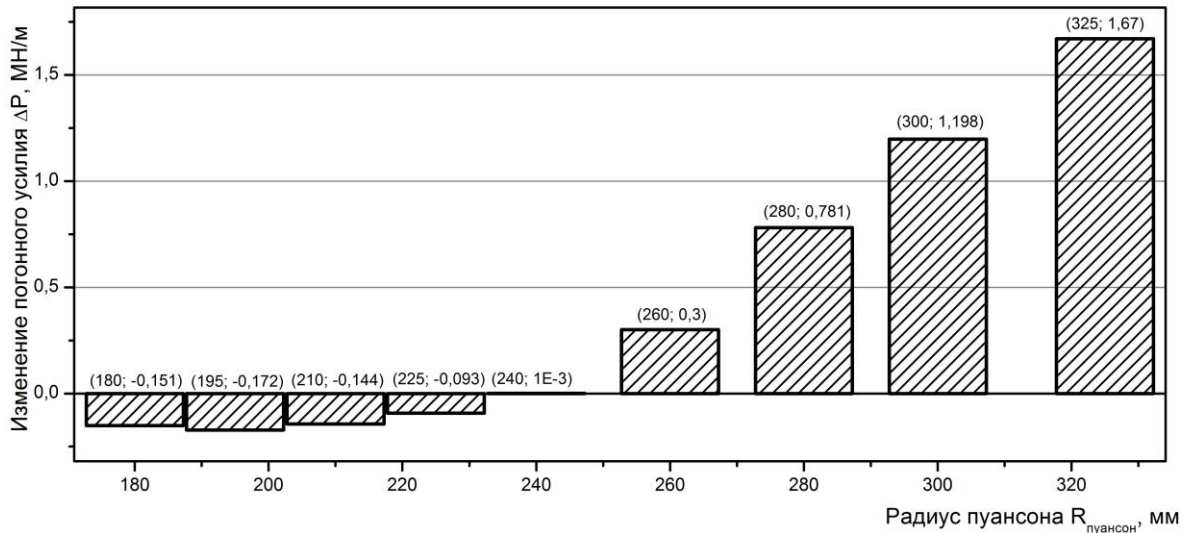


Рисунок 54 – Зависимость изменения погонного усилия от радиуса пуансона в пределах изменения расстояния между опорами нижнего инструмента

Увеличение усилия при увеличении радиуса пуансона подтверждается и в работе [66].

Таким образом, $R_{\text{пуансон}} = 240$ мм является рациональным значением при производстве труб большого диаметра исследуемого сортамента.

При выборе расстояния между опорами нижнего инструмента необходимо выполнить следующие условия:

$$l_{\text{шаг}} < \frac{(\hat{l}_0 + \hat{l}_1)}{\alpha_{\text{расп}}}, \quad (110)$$

$$L_{\text{шаг}} > \frac{A}{2}, \quad (111)$$

где $l_{\text{шаг}}$ – длина между формируемыми шагами трубной заготовки, мм;

$L_{\text{шаг}}$ – длина от подогнутой кромки до первого шага трубной заготовки, мм;

$\alpha_{\text{расп}}$ – коэффициент распухания стали;

$$\alpha_{\text{расп}} = \frac{\rho_i}{R_i}. \quad (112)$$

Средний коэффициент распухания составит:

$$\alpha_{\text{расп}} = \frac{345}{311,67} = 1,11.$$

Количество шагов при производстве труб диаметром 720 мм с толщиной стенки 22 мм равно 17:

$$l_{\text{шаг}} = 109 \text{ мм},$$

$$L_{\text{шаг}} = 210 \text{ мм}.$$

В таблице 16 представлены результаты вычислений суммы длины дуг $\widehat{l}_0, \widehat{l}_1$ в зависимости от расстояния между опорами нижнего инструмента.

Таблица 16 – Расчетные данные суммы горизонтальных проекций при различных расстояниях между опорами нижнего инструмента

A, мм	$\Sigma l = l_0 + l_1,$ мм	A, мм	$\Sigma l = l_0 + l_1,$ мм	A, мм	$\Sigma l = l_0 + l_1,$ мм
200	86,068	280	157,115	340	214,025
230	112,028	290	166,37	350	223,763
240	120,813	300	175,764	370	243,393
250	129,784	310	185,231	380	253,317
260	138,814	320	194,721	390	263,274
270	147,909	330	204,313	400	273,259

Исходя из условий уравнений (111) – (113), расстояние между опорами

нижнего инструмента применяется равным 250 мм.

Аналогичные вычисления были проведены для различных механических свойств. Результаты расчетов по выбору рационального значения пуансона представлены в таблице 17.

Таблица 17 – Выбранный рациональный радиус пуансона в зависимости от механических свойств для труб размером 720x 22 мм

Класс прочности труб	$R_{\text{пуансон}}, \text{ мм}$	Класс прочности труб	$R_{\text{пуансон}}, \text{ мм}$
К34	260	К60	240
К52	240	К65	240
К56	240	К80	225

Таким образом, для производства труб категорией прочности X46SS диаметром 720 мм с толщиной стенки 22 мм по предложенной методике необходимы: радиус пуансона равный 240 мм, расстояние между опорами нижнего инструмента равное 250 мм.

4.6 Численное исследование влияния изменения кривизны по длине опор нижнего инструмента на прямолинейность кромок трубной заготовки

Как отмечалось в пункте 1.3 и 2.3 основными показателями качества трубных заготовок являются прямолинейность и параллельность кромок, отсутствие плоских участков вдоль кромок и др.

В процессе получения трубных заготовок на прессах шаговой формовки существует множество регулируемых параметров, отвечающих за конечную геометрию и качество трубной заготовки, наиболее важными из них являются:

- 1) ход пуансона;
- 2) наклон пуансона относительно продольной оси;
- 3) продольный изгиб опор нижнего инструмента.

К качественным показателям можно отнести прямолинейность продольных кромок трубной заготовки, одинаковые значения ширины раскрытия заготовки на переднем и заднем торцах трубной заготовки и др. Прямолинейность продольных кромок на прессе шаговой формовки определяется за счет изменения продольного изгиба опор нижнего инструмента. Производство труб на прессе шаговой формовки без изгиба опор нижнего инструмента на практике приводит к многочисленным прерываниям процесса сварки технологического шва на сборочно-сварочном стане.

В производстве труб наибольшее влияние изгиба опор нижнего инструмента в результате промышленных формовок было выявлено для труб с толщиной стенки до 12 мм включительно. Причем изгиб кромок трубной заготовки при симметричном формовании сторон отличался между собой (рисунок 55). Пунктирной линией отмечено теоретическая прямолинейность кромок трубной заготовки.

Как видно из рисунка 55 правая кромка в середине не прямолинейна, в отличие от левой кромки.

Появление такого дефекта негативно отражалось при сборке трубной заготовки и наложении технологического шва.

Для определения зависимости влияния изгиба опор нижнего инструмента на прямолинейность продольных кромок был поставлен ряд задач компьютерного математического моделирования процесса шаговой формовки.

Расчеты производились на примере формовки труб размером 530x10 мм из марки стали 10Г2ФБЮ.

При подготовке к расчетам необходимо определить геометрию листовой заготовки после прессы подгибки кромок. Исходные данные для расчета представлены в таблице 18.

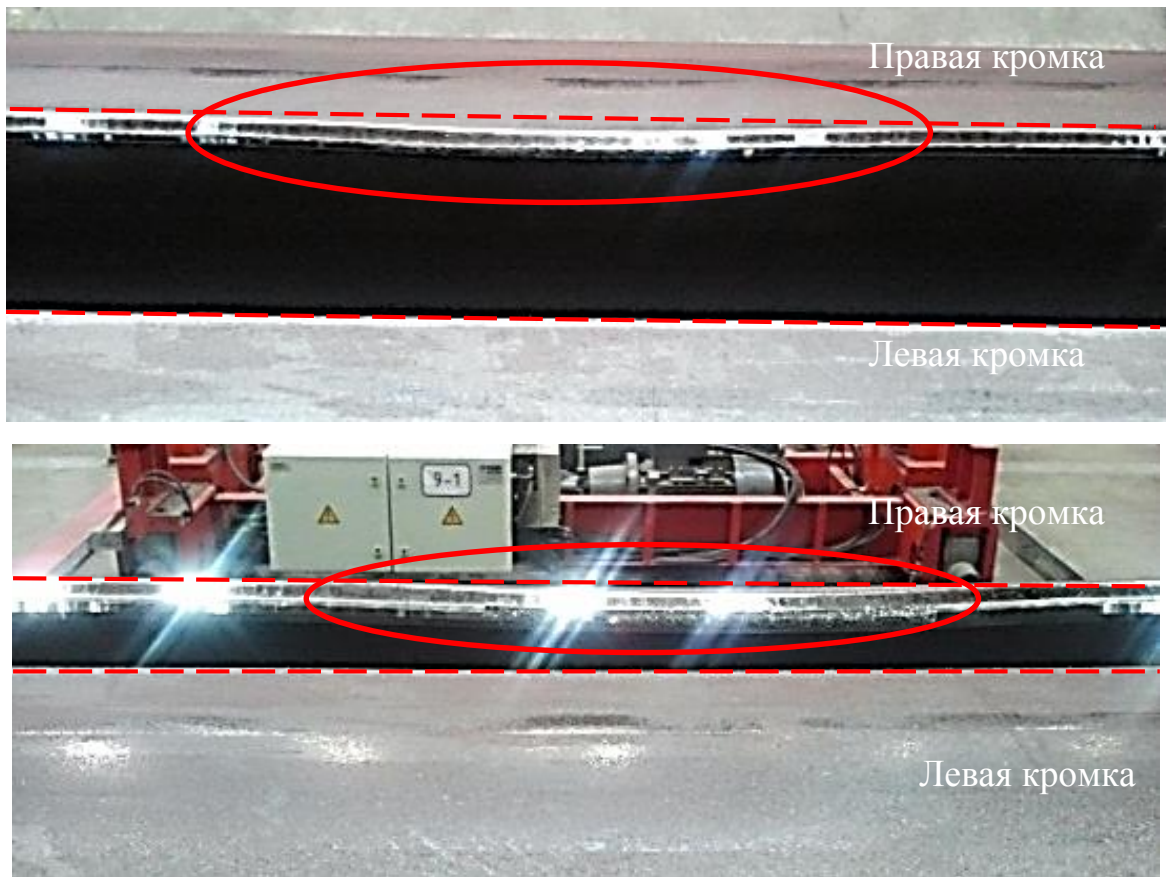


Рисунок 55 – Продольный вид кромок сформованной трубной заготовки
(середина заготовки)

Таблица 18 – Исходные данные для расчета режимов формоизменения

параметр	значение, мм	параметр	значение, %	параметр	значение, МПа
D	530	ε	1%	σ_τ	572
S	10	ε_r	20%	σ_B	662

По уравнению (3) – (7) определим радиус заготовки после снятия нагрузки.

$$R = \frac{\frac{530-10}{1+0,2} - 10}{2} = 212 \text{ мм},$$

$$k = \frac{662 - 572}{125} \left(1,6 - \frac{0,07}{50} \right) = 1,15.$$

При определении значения $\varepsilon_{\text{отн}}$ необходимо знать величину R_i , которую предстоит рассчитать. Поэтому $\varepsilon_{\text{отн}}$ принимается приближенно равной 0,02.

$$M = W \cdot (858 + 895) = 1753 \cdot W;$$

$$R_i = \frac{212}{1 + \frac{2 \cdot 1753 \cdot 212}{2 \times 10^5 \cdot 10}} = 154,6 \text{ мм};$$

$$\varepsilon_{\text{отн}} = \frac{10}{2 \cdot 154,6} = 0,032.$$

После проведения уточняющего расчета R_i получим:

$$R_i = 178,3 \text{ мм}.$$

Для вычисленного радиуса подходит гибочный блок №1 (см. Приложение А).

Местоположение рассчитанного радиуса на гибочном блоке определяется как (см. Приложение А):

$$\begin{aligned} X_i = & 205,41 - 23,48 \times 10^{-3} \cdot R_i + 234,39 \times 10^{-6} \cdot R_i^2 - \\ & - 9,54 \times 10^{-6} \cdot R_i^3 + 7,88 \times 10^{-9} \cdot R_i^4 + 5 \times 10^{-12} \cdot R_i^5 \end{aligned} \quad (113)$$

$$X_i = 163,5 \text{ мм}.$$

Величина высоты подогнутой кромки листа по уравнению (25) составит:

$$H = 48 \text{ мм.}$$

Из уравнения (10) ширина подгибаемого участка листа составит:

$$B = \frac{\left(325,8 + \frac{10}{2}\right)^2 - \left(178,3 + \frac{10}{2}\right)^2}{2 \cdot 212,13} + 0,28 + 10 = 189,8 \text{ мм.}$$

Необходимая ширина листа перед прессом подгибки кромок по уравнению (20) составит:

$$L_{\text{лист}} = \frac{\pi \cdot (530 - 10)}{1 + 0,01} = 1617 \text{ мм.}$$

Для расчетов ходов пуансона на прессе шаговой формовки была сделана прорисовка требуемой трубной заготовки с определением радиусов относительно номера шага формовки (рисунок 56).

Расчет величины ходов пуансона производился по уравнениям (35) – (94) и (97) – (104). Радиус пуансона был выбран равным 180 мм, расстояние между опорами нижнего инструмента 200 мм. Результаты расчетов представлены в таблице 19.

Таблица 19 – Расчетные значения ходов пуансона для получения трубной заготовки

№ шага формовки	1	2	3	4	5	6	7	15
Ход пуансона, мм	39	35	34	34	33	32	31	31

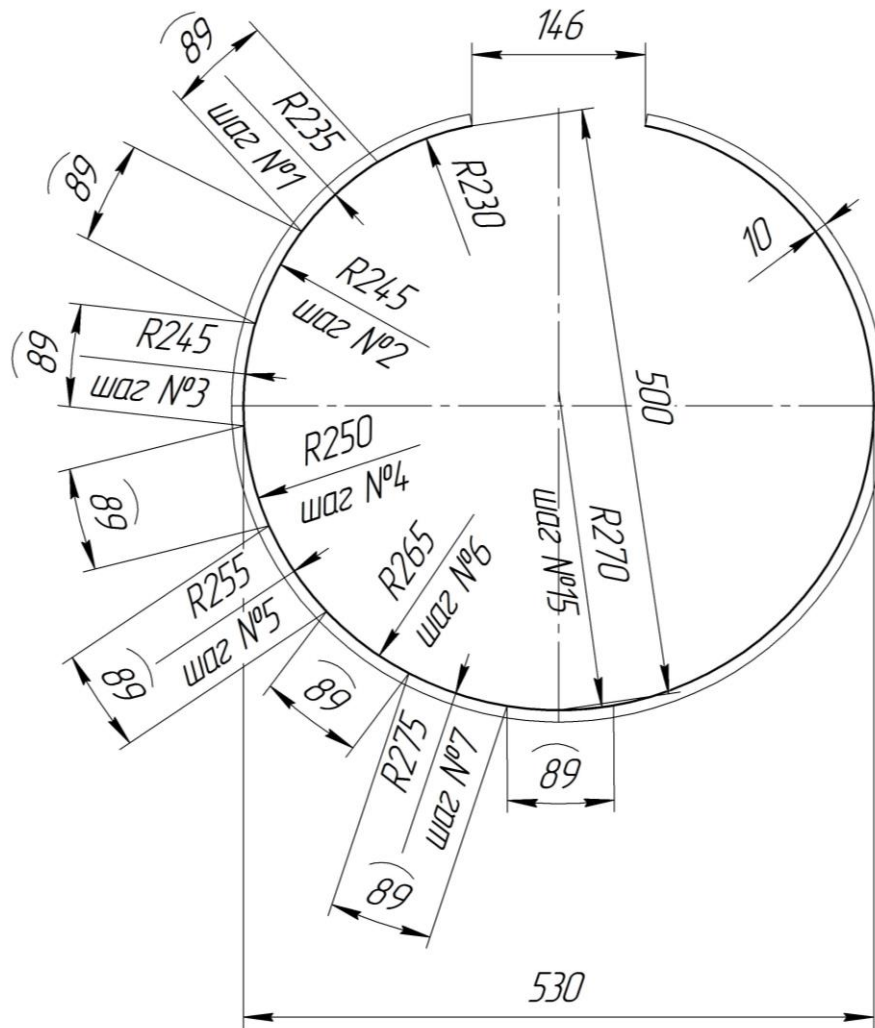


Рисунок 56 – Схема профиля трубной заготовки для получения труб диаметром 530 мм с толщиной стенки 10 мм

Существующая схема формовки трубной заготовки на прессе шаговой формовки предполагает, что форма заготовки делится на четыре сектора, в которых изгиб опор нижнего инструмента постоянен и симметричен относительно оси симметрии (рисунок 57).

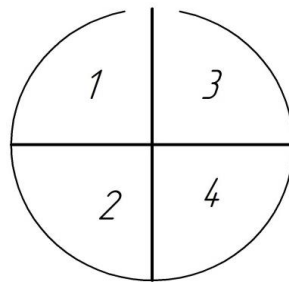


Рисунок 57 – Схема деления трубной заготовки на сегменты

Первый этап расчетов заключался в исследовании изменения кривизны продольных кромок листа при формовке заготовки с продольным изгибом опор нижнего инструмента по существующей схеме, представленной на рисунке 58.

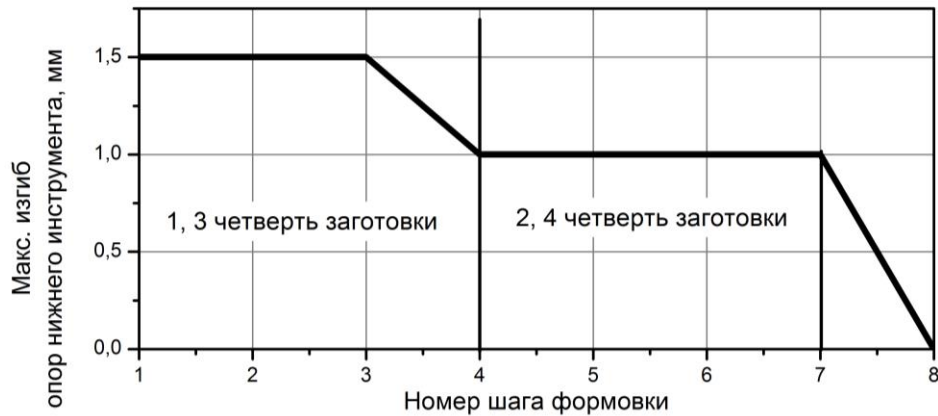


Рисунок 58 – Существующая схема продольного изгиба опор нижнего инструмента относительно шагов формовки

На рисунках 59 и 60 представлено напряженно-деформированное состояние подогнутого листа на первом и втором шаге формовки соответственно.

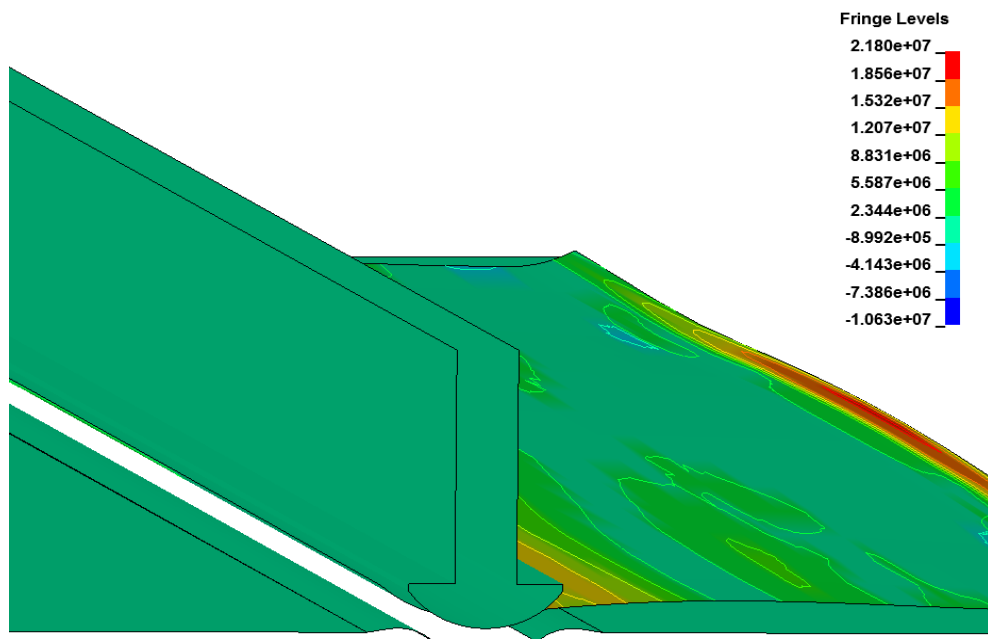


Рисунок 59 – Эпюра напряжений листа на первом шаге формовки, Па (относительно плоскости XY)

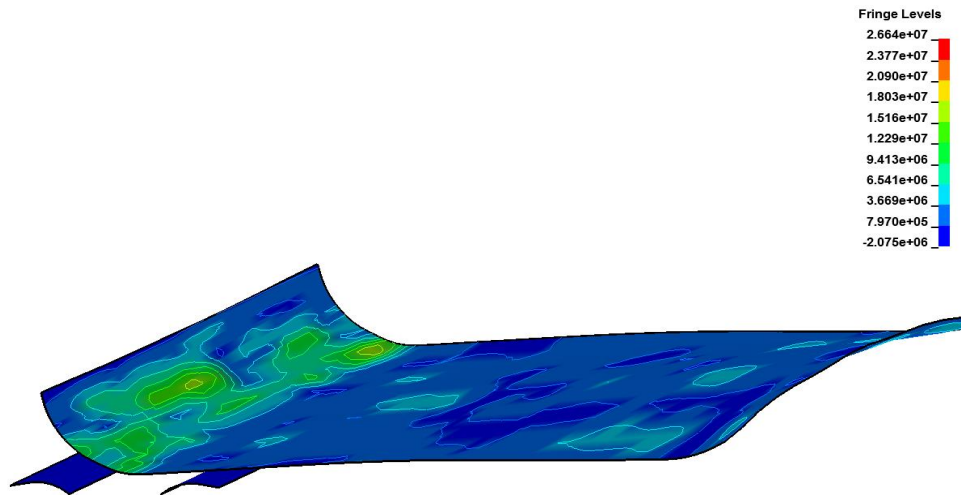


Рисунок 60 – Эпюра напряжений листа на втором шаге формовки, Па
(относительно плоскости XY)

Из эпюр видно, что несформованная часть листа по длине заготовки изгибается сильнее, чем сформованная, и эта разница возрастает с каждым последующим шагом. В свою очередь при переходе максимального изгиба с третьего шага на четвертый правая часть листа изогнута в пластической зоне (даже при условии, что максимальный изгиб опор нижнего инструмента на четвертом шаге меньше или равен третьему, в этом случае результат идентичный). Общее уменьшение максимальной величины изгиба опор нижнего инструмента по четвертям при численном исследовании существенных результатов не дало.

На основе полученных результатов предложена следующая схема изгиба опор нижнего инструмента, представленная на рисунке 61.

В такой схеме уровень изгиба правой кромки с каждым шагом уменьшается, и за счет плавного понижения значения продольного изгиба опор нижнего инструмента, общая дискретность деформаций уменьшается, вследствие чего правая кромка листа деформируется в упругой зоне (рисунок 62, 63). Формовка правой стороны с идентичными значениями максимального изгиба опор нижнего инструмента позволяет выровнять кромку листа относительно левой стороны и в последствии получить симметричную

заготовку по всей длине.

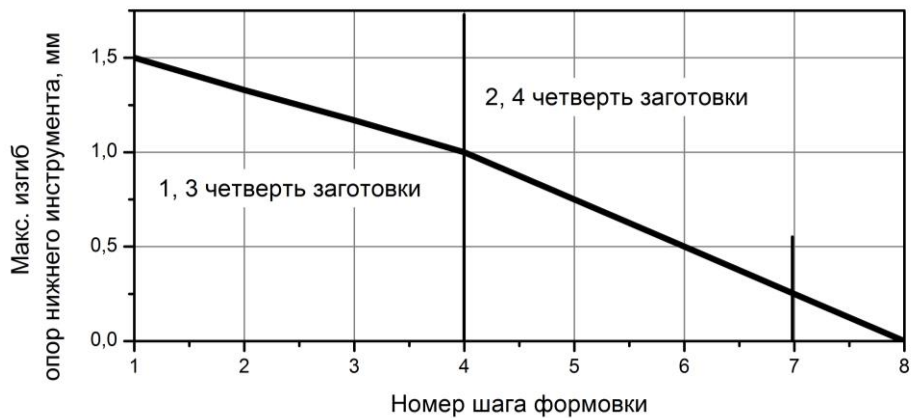


Рисунок 61 – Предложенная продольного изгиба опор нижнего инструмента относительно шагов формовки

Реализация предложенной схемы продольного изгиба опор нижнего инструмента позволила уменьшить неравномерное искривление продольных кромок листа в процессе формовки. Данное техническое решение способствовало увеличению объема годной продукции на трубах с толщиной стенки до 12 мм.

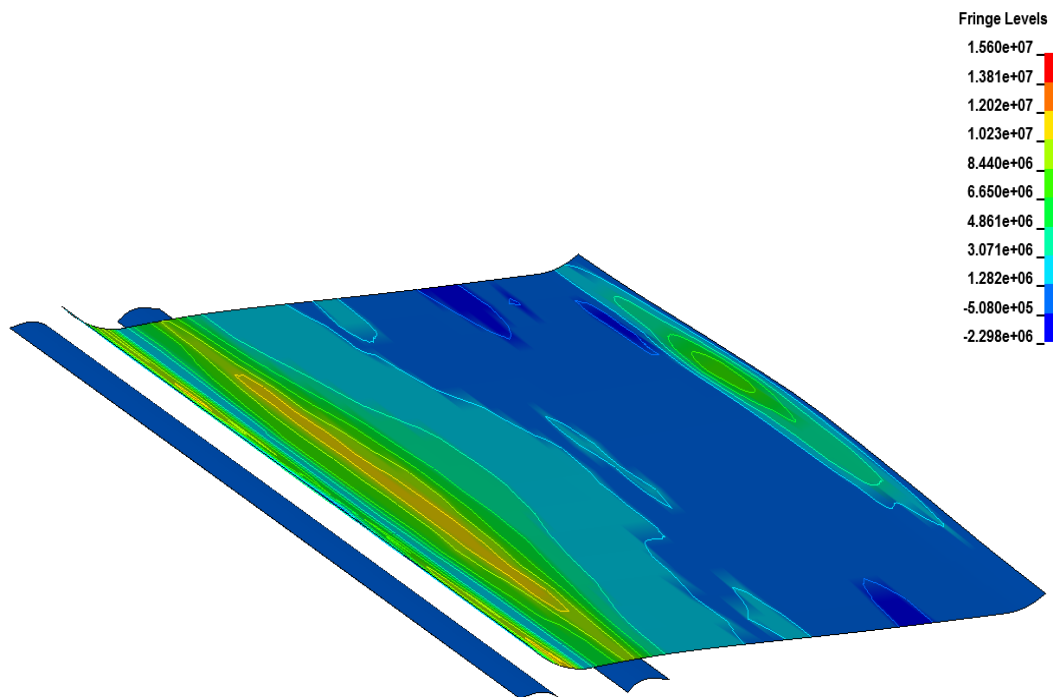


Рисунок 62 – Эпюра напряжений листа на первом шаге формовки, Па (относительно плоскости XY)

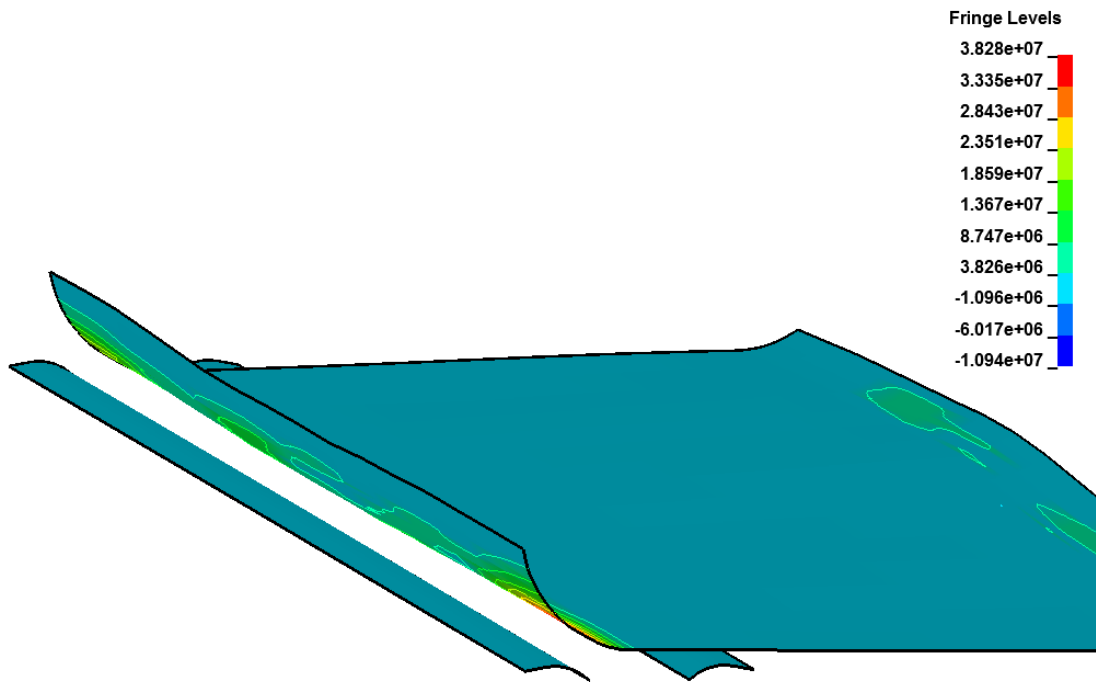


Рисунок 63 – Эпюра напряжений листа на втором шаге формовки, Па
(относительно плоскости XY)

4.7 Выводы

1. Проведенное численное исследование показало, что величина зазора, образованного между листом и пуансоном при максимальном ходе пуансона в отдельных случаях не превышает 3 мм, а в 82 % случаев не более 1,25 мм.

2. Разработанный комплекс математических моделей позволяет осуществлять системный анализ процесса шаговой формовки.

3. С помощью разработанной математической модели можно определить необходимые значения хода пуансона и усилия на каждом шаге формовки для требуемой трубной заготовки.

4. Полученный комплекс математических моделей может быть использован для расчета настроечных параметров пресса шаговой формовки.

5. Разработанный комплекс математических моделей позволяет спрогнозировать геометрию трубной заготовки после формовки на прессе шаговой формовки.

6. С помощью разработанной математической модели можно производить расчет технологических параметров на один сортамент при различном количестве шагов на прессе шаговой формовки.

7. Разработанная математическая модель может быть использована для определения рационального радиуса пуансона и расстояния между опорами нижнего инструмента.

8. Проведенное численное исследование по изменению продольного изгиба опор нижнего инструмента подтвердил тот факт, что при изменении продольного изгиба опор нижнего инструмента на каждом шаге в сторону уменьшения улучшает геометрию трубной заготовки и тем самым повышает качественные показатели по прямолинейности боковых кромок трубной заготовки.

5 Автоматизированная система расчета и генерирования технологических режимов формоизменяющих операций

На основе представленных в главах 3 и 4 методик расчета настроечных и контролируемых параметров прессы подгибки кромок и прессы шаговой формовки была произведена формализация алгоритмов расчета и создана автоматизированная система расчета, архивирования данных для изготовления труб различного диаметра, толщины стенки и марок сталей [103].

Данная система состоит из нескольких интегрированных в единый комплекс частей.

Расчетная часть программы, написана на языке Visual Basic 6.0, включает в себя две основные части: расчет настроечных параметров для кромкогибочного прессы, расчет настроечных параметров для прессы шаговой формовки, и визуализации геометрии спроектированной трубной заготовки до сборочно-сварочного стана.

Исходными данными являются следующие параметры (рисунок 64):

- 1) диаметр трубы;
- 2) толщина стенки;
- 3) коэффициент деформации трубы;
- 4) геометрические размеры продольной фаски;
- 5) механические свойства материала (минимальные и максимальные значения предела текучести и временного сопротивления).

Остальные параметры, представленные на рисунке 64 являются вспомогательными и предназначены только для составления технологических карт под соответствующие типоразмеры труб и нормативную документацию.

Расчет настроечных параметров на пресс подгибки кромок для конкретного типоразмера труб (наружный диаметр, толщина стенки и класс прочности труб или марка стали), производится на основе полученных уравнений, изложенных в главе 3, вычисляется условный номер верхней

Расчет настроечных параметров прессы шаговой формовки также производится для выбранного типоразмера трубы по уравнениям представленных в главе 4 (рисунок 66).

Предварительно выбор радиуса пуансона и расстояния между опорами нижнего инструмента производится автоматически. В программном комплексе в полной мере реализованы результаты расчетов по методике, описанной в пункте 4.7, для различных типоразмеров труб и марочного сортамента. Также предварительно выбирается количество шагов формовки. Существует возможность изменения радиуса пуансона, расстояния между опорами нижнего инструмента, количества шагов. При неверном выборе радиуса пуансона и расстояния между опорами нижнего инструмента в программе предусмотрены оповещения пользователя.

The screenshot shows a software window titled "Пресс шаговой формовки" (Stepped Forming Press). It contains several input fields and buttons for configuring the process. The main parameters are:

- Inputs:** D (720), S (10), Радиус пуансона (260), Высота пуансона (90), Ширина пуансона (350), Расстояние между бойками (230), Толщина пластин (215), Величина шага формовки (112), Количество шагов формовки (17), Расстояние от подогнутой кромки заготовки до первой/последней отметки шага, мм (210), Ширина разъема (180), Овал заготовки (30), Радиус шаблона (345).
- Buttons:** Обнулить, Re RUN, Генерировать ТК, Save, Тычковый нож.
- Calculated Values:** Максимальный ход пуансона (39.6), 110.2, 1088.5, Шаблон черт. №54103М-001-024...№54104.
- Options:** Альтернативный расчет, 1 диап., 2 диап., 3 диап., 4 диап.
- Table of Parameters:**

	1	2	3	4	5	6	7	8	17
	33	30.6	30.3	30.6	29.7	29.8	28.7	28.6	29.3
	35.5	35.5							
Усилие, кН	4633.2	3756.3	3972.7	3751.6	3749.7	3738	3734.3	3719	3727.2

Рисунок 66 – Общий вид рассчитанных технологических режимов для операции шаговой формовки

До проектирования геометрии трубной заготовки расчетный модуль вычисляет ход пуансона по упрощенной методике. При проектировании геометрии трубной заготовки до сборочно-сварочного стана предусмотрен специальный модуль для графического отображения радиусов на конкретном шаге и вычисление овальности, и ширины разъема заготовки (рисунок 67). После завершения проектирования запускается основной модуль по вычислению хода пуансона.

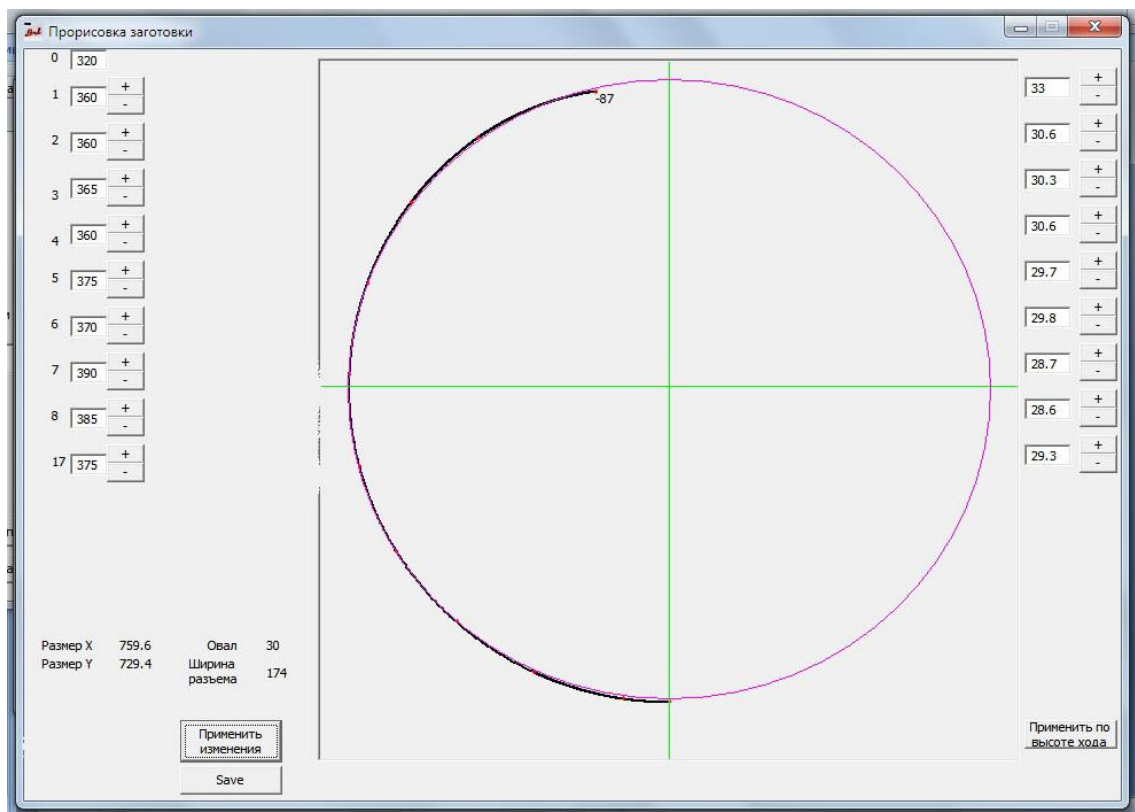


Рисунок 67 – Общий вид модуля для расчета радиусов трубной заготовки относительно шагов

Вторая часть автоматизированной системы включает в себя представление текстовой информации в среде MS Word и архивацию данных (рисунок 68). Кроме этого при запуске процедуры сохранения информации в MS Word основные данные (исходные данные, радиус заготовки на каждом шаге, процент гибки и др.) сохраняются в формате «*.txt».

Полученные файлы сохраняются в директорию с названием условного номера сортамента. При повторном расчете и сохранении результатов в

директории сохраняется файл с новой редакцией. Таким образом в директории хранятся все редакции технологических карт необходимых для производства сортамента.

Для реализации программы необходимы следующие программные и аппаратные средства:

- операционная система Windows 8 и ниже;
- MS Word 2010;
- оперативная память 128 Мбайт (минимум);
- 10 Мбайт памяти на жестком диске (необходимый минимум для хранения созданных технологических карт).

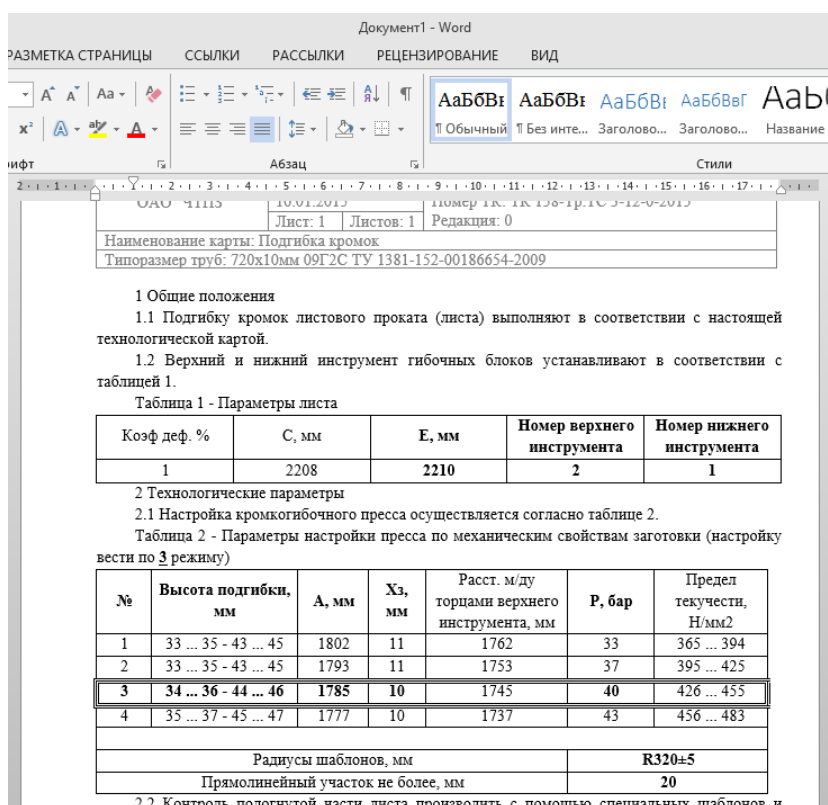


Рисунок 68 – Пример составленной технологической карты для процесса подгибки кромок

На разработанную программу было получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [103].

Программа была принята для разработки технологических режимов в условиях производства на ОАО «ЧТПЗ» в ТЭСЦ «Высота 239». Дата начала

тестирования программы – 1 августа 2013 г., внедрение – с 1 ноября 2013 г. (Приложение Б). С начала тестирования было разработано и опробовано более 200 технологических карт для производства труб различного сортамента.

За все время тестирования и внедрения не выявлено существенных различий между результатами замеров трубной заготовки и расчетными значениями, полученными с помощью разработанного программного обеспечения.

Применение программы позволило сократить время на составление технологических карт в 4-6 раза (до 20 минут). Также программа позволяет анализировать полученную геометрию трубной заготовки по фактическим ходам пуансона, для этого в программе реализован обратный расчет. При известном ходе пуансона рассчитываются радиусы заготовки на соответствующих шагах.

- 6 Разработка и освоение изготовления опытной партии труб категории прочности X46SS диаметром 720 мм с толщиной стенки 22 мм

6.1 Расчет технологических параметров для производства труб

Согласно утвержденному техническому заданию по цеху ТЭСЦ «Высота 239» ОАО «ЧТПЗ» № 22913-1-2013 от 14.11.2013 г. по производству опытной партии труб под контролем «Газпром ВНИИГАЗ» по проекту «Производство сероводородостойких труб», было проведено изготовление опытной партии труб категории прочности X46SS диаметром 720 мм с толщиной стенки 22 мм.

Для этого необходимо было подготовить технологические карты на соответствующие операции (подгибка кромок, шаговая формовка, сборка трубной заготовки, сварка и др.).

Расчет технологических параметров производился с использованием разработанного программного продукта для ЭВМ «ZV_JCO» [103]. В качестве исходных данных были взяты параметры, представленные в таблице 20.

Таблица 20 – Исходные данные для расчета режимов формоизменения

параметр	значение, мм	параметр	значение, %	параметр	значение, МПа
D	720	ε	1	σ_r	405
S	22	ε_r	17	σ_B	522

По уравнению (20) требуемая ширина листа составляет 2171 мм.

Геометрические размеры фаски представлены на рисунке 69.

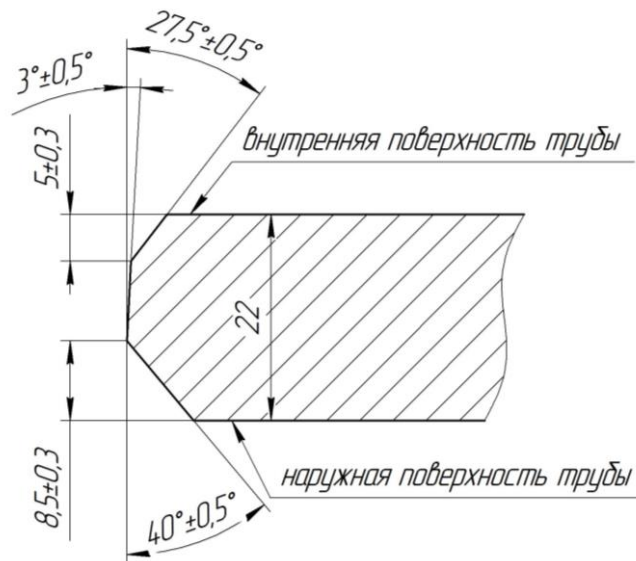


Рисунок 69 – Геометрические размеры фаски

В таблице 21 представлены рассчитанные значения на пресс подгибки кромок.

Таблица 21 – Настроечные параметры для пресса подгибки кромок

Условный номер верхней гибочной матрицы	Условный номер нижней гибочной матрицы	Высота подгибки, мм	A, мм	Xз, мм	Расстояние между торцами верхнего инструмента, мм	P, бар
2	1	55 – 63	1711	25	1671	75

где A – расстояние между точками начала эвольвенты на верхней гибочной матрице, мм;

Xз – смещение нижней гибочной матрицы относительно верхней, мм;

P – давление гибки, бар.

Для расчетов ходов пуансона на прессе шаговой формовки была сделана прорисовка требуемой трубной заготовки, с определением радиусов по ходам (рисунок 70).

Проведенный расчет по методике, описанной в главе 4.5 радиус пуансона

на пресс шаговой формовки должен составлять 280 мм. Расстояние между опорами нижнего инструмента было выбрано 290 мм. Количество шагов – 17.

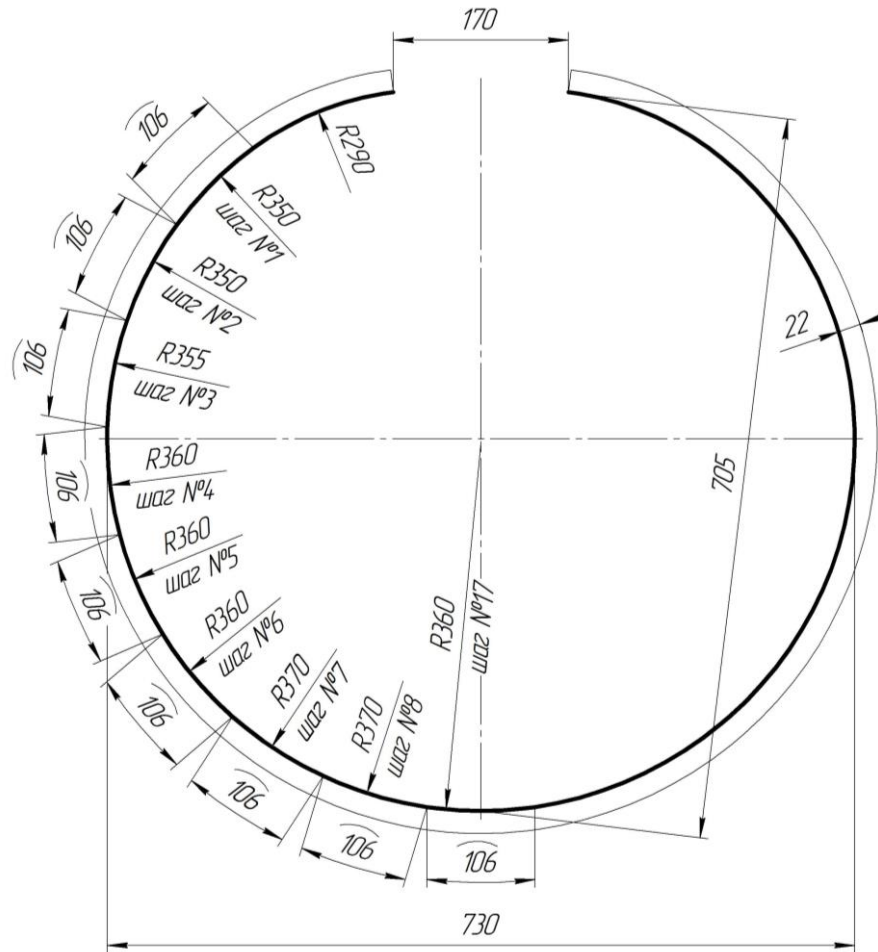


Рисунок 70 – Схема профиля трубной заготовки для получения труб диаметром 720 мм с толщиной стенки 22 мм

Результаты расчетов величины ходов пуансона представлены в таблице 22.

Таблица 22 – Расчетные значения ходов пуансона для изготовления трубной заготовки

№ шага формовки	1	2	3	4	5	6	7	8	17
Ход пуансона, мм	28±3	26±3	26±3	25±3	25±3	25±3	24±3	24±3	24±3

6.2 Сопровождение опытного изготовления труб

Результаты замеров высоты подгибки кромок листов представлены в Приложении В и таблице 23. Разница в высоте между правой и левой стороной на первом листе составляла 9 мм, что является недопустимым значением (допуск на разницу между высотами составляет 2 мм). Было принято решение о перенастройке центрователей листа перед прессом. Первый лист был отправлен обратно на пресс подгибки кромок для исправления разницы в высоте между левой и правой кромками. В ходе повторного измерения разница между высотами составила 4 мм, после чего лист был направлен на пресс шаговой формовки.

При замере второго и последующих листов, разница между высотой подгибки кромок листа не превышала 2 мм.

Таблица 23 – Результаты замеров высоты подгибки кромок листа на прессе подгибки кромок

№ трубы	Высота подгибки		Радиус подгибки (соответствует/не соответствует)
	левая сторона, мм	правая сторона, мм	
1300209271	67	58	соответствует
1300209272	58	60	соответствует
1300209273	57	58	соответствует
1300209274	58	60	соответствует
1300209275	59	60	соответствует
1300209276	57	57	соответствует
1300209277	57	58	соответствует
1300209278	56	57	соответствует
1300209279	60	61	соответствует

Первый лист на прессе шаговой формовки получился с некоторым отступлением от технологической карты, но в пределах допуска.

Результаты фактических значений ходов пуансона представлены в Приложении В и таблице 24. Отклонения между расчетными и фактическими значениями не превышало 3 мм.

Таблица 24 – Результаты фактического хода пуансона по шагам

№ трубы	Ход пуансона, мм								
	Шаг №1	Шаг №2	Шаг №3	Шаг №4	Шаг №5	Шаг №6	Шаг №7	Шаг №8	Шаг №17
1300209271	29	28	26	24	23	24	25	24	25
1300209272	29	28	25	24	23	24	25	23	25
1300209273	29	28	24	23	23	24	24	25	26
1300209274	29	28	24	23	23	23	25	26	27
1300209275	29	28	24	23	23	24	25	25	27
1300209276	29	28	24	23	23	24	26	26	27
1300209277	29	28	24	23	23	23	24	26	26
1300209278	29	28	24	23	23	24	25	26	26
1300209279	29	28	24	23	23	24	24	24	26

Расстояние между кромками на первых трех сформованных заготовках были в интервале значений от 160 до 185 мм. Овальность составила в горизонтальном направлении от 20 до 35 мм. На последующих заготовках овальность контролировалась только после сборочно-сварочного стана.

После формовки трубные заготовки были направлены на сборочно-сварочный стан. На сборочно-сварочном стане кроме овальности заготовки также фиксировалось значения отклонения от теоретической окружности. Зафиксированные значения овальности заготовок были в интервале от 7 до 10 мм, что соответствовало требуемым значениям на данный типоразмер труб

(допуск от 5 до 11 мм). Значение отклонения от теоретической окружности замерялись с помощью специального шаблона. По результатам измерений все зафиксированные значения находились в пределах допуска.

После сборочно-сварочного стана трубные заготовки прошли все остальные операции такие как: сварка внутреннего и наружного швов, экспандирование, испытание статическим давлением и др., и отделочные операции.

По результатам приемки сторонней организации трубы были приняты с первого предъявления.

6.3 Анализ результатов опытного изготовления труб

Как показывают значения высоты подогнутой части листа зафиксированные после прохождения операции подгибки кромки листа и значения глубины опускания пуансона, зафиксированные на прессе шаговой формовки, находятся в пределах допуска (Приложение В).

Таким образом, можно сделать вывод о том, что разработанные в главах 3 и 4 методики расчета настроечных параметров и контролируемых величин пресса подгибки кромок и пресса шаговой формовки позволяют получать достаточно точные значения технологических параметров. В результате этого при производстве труб различного сортамента в значительной мере отпадает необходимость в изготовлении настроечных труб.

6.4 Выводы

Изготовлена опытная партия труб категории прочности X46SS диаметром 720 мм с толщиной стенки 22 мм, с применением разработанной программы для ЭВМ «ZV_JCO». При этом на трубах не было обнаружено дефектов, связанных с формоизменяющими операциями такими как подгибка кромок, шаговой формовки, сборки трубной заготовки и экспандирования.

Заключение

На основании выполненных в работе исследований разработаны теоретические положения и технологические предложения, совокупность которых можно квалифицировать как достижения в развитии новых технических решений и математического моделирования процессов подгибки кромок и шаговой формовки, обеспечивающих снижение потерь металла при изготовлении труб широкого сортамента. При этом, в частности, получены следующие результаты:

1. Разработаны теоретические решения и технические рекомендации по совершенствованию технологий подгибки кромок листа и шаговой формовки сварных труб классом прочности до K80 (X100) и выше, диаметром до 1420 мм, толщиной стенки до 45 мм в условиях ОАО «ЧТПЗ» цеха «Высота 239».

2. Впервые на основе анализа условий процесса подгибки кромок листа с использованием метода конечных элементов получены статистически значимые регрессионные уравнения, позволяющие определять параметры подгибаемой части листа в зависимости от сортамента трубы. Разработана математическая модель для расчета параметров настройки прессы подгибки кромок, а также для определения значений контролируемых параметров трубной заготовки.

3. Проведен теоретический анализ влияния ширины подгибаемой кромки листа в зависимости от сортамента труб. Даны рекомендации по изготовлению сварных труб большого диаметра различного сортамента на стадии подгибки кромок листа с получением труб, отвечающих современным требованиям по геометрическим параметрам, предъявляемым в нормативных документах.

4. Разработан комплекс математических моделей, позволяющий осуществлять анализ процесса формоизменения трубной заготовки при шаговой формовке, определять ее геометрию и проводить расчет хода пуансона для получения требуемого профиля трубной заготовки.

5. Исследовано влияние геометрических параметров очага деформации при шаговой формовке на усилие формовки трубной заготовки. Даны рекомендации для выбора радиуса пуансона и расстояния между опорами нижнего инструмента при изготовлении труб.

6. Для практического использования разработанных математических моделей создана программа для ЭВМ, позволяющая рассчитывать технологические параметры настройки прессы подгибки кромок листа и прессы шаговой формовки, а также определять значения контролируемых параметров для требуемой трубной заготовки (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013660023).

7. Теоретические решения и разработанная программа для ЭВМ по совершенствованию процесса подгибки кромок листа и шаговой формовки заготовок проверены экспериментально на всем сортаменте, выпускаемом в цехе «Высота 239» ОАО «ЧТПЗ».

Библиографический список

1. Мазур, И.И. Безопасность трубопроводных систем / И.И. Мазур, О.М. Иванцов – М.: ИЦ «ЕЛИМА», 2004. – 1104 с.
2. Матвеев, Ю.М. Производство электросварных труб большого диаметра / Ю.М. Матвеев, В.Я. Иванцов, Н.А. Грум-Гржимайло – М.: Metallurgy, 1968. – 192 с.
3. ТУ 1381-001-00186654-2012. Трубы стальные электросварные прямошовные из стали класса прочности К60 для магистральных газопроводов на рабочее давление 11,8 МПа и промышленных газопроводов на рабочее давление 12,9 МПа. Введ. 2012-23-07. Челябинск, 2012. 39 с.
4. ТУ 1381-018-00186654-2009. Трубы стальные электросварные прямошовные диаметром 530 – 1220 мм для нефтепроводов. Введ. 2010-01-02. Челябинск, 2009. 35 с.
5. ТУ 14-158-157-2008. Трубы стальные электросварные прямошовные сероводородостойкие диаметром 530-1020 мм классов прочности К48-К52 (Х42SS-Х52SS) для газопроводов объектов ОАО «ГАЗПРОМ». Введ. 2013-01-10. Челябинск, 2008. 40 с.
6. N-GE-PLM-SPE-00-LINEPISP rev. 03. Спецификация на магистральные трубы по проекту расширения «Северного потока» (NEXT). Введ. 2021-11-21. 30 с.
7. Пышминцев, И.Ю. Научные вопросы / И.Ю. Пышминцев // Your Tube. – 2014. – №3 (18). – С. 8 – 11.
8. Пат. 101204720, КНР, МПК В 21 С 37/08, В 21 D 05/00. Manufacture method of X80 pipeline JOE direct sew submerged arc welding tube / Xiaoxiang Wang, Yanfeng Li. Заявл. 10.12.2007; опубл. 24.11.2010.
9. 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.

10. Пат. 101205596, КНР, МПК В 23 К 35/22, В 23 К 9/18. X120 pipeline steel submerged arc straight weld pipe and manufacture technique thereof / Yanfeng Li, Jinghui Ren. Заявл. 10.12.2007; опубл. 25.06.2008.
11. Пат. 103084752, КНР, МПК В 23 К 35/30, В 23 К 9/18. High-strength high-tenacity submerged-arc welding wire for X100 pipeline steel / Cao Neng, Qian Weifang. Заявл. 23.01.2013; опубл. 8.05.2013.
12. Пат. 103521549, КНР, МПК В 21 С 37/08, В 23 К 9/16. Manufacturing method of X100 high-steel-grade large-opening-diameter thick-wall longitudinal submerged-arc welded pipe / Bi Zongyue, Liu Bin. Заявл. 7.10.2013; опубл. 22.01.2014.
13. Пат. 102205458, КНР, МПК В 23 К 9/18, В 23 К 9/23. Manufacturing method for X120 steel-level spiral seam hidden arc welding tube / Yanfeng Li, Peng Tian. Заявл. 5.5.2011; опубл. 5.10.2011.
14. Лупин, В.А. Перспективы и надежность труб большого диаметра / В.А. Лупин // Достижения в теории и практике трубного производства. Сборник научных трудов конференции «Трубы России – 2004». – 2004. – С. 316 – 323.
15. 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.
16. 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.
17. Пат. 2012073343, США, МПК В 21 D 11/10, В 21 С 37/06, В 21 С 37/08. Method for producing metal sealing elements / P. Rolf. Заявл. 22.5.2009; опубл. 29.03.2012.
18. Дрюян, В.М. Теория и технология трубного производства: Учебник. – Днепропетровск: РИА «Днепр-ВАЛ», 2001. – 544 с.
19. Шевакин, Ю.Ф. Производство труб / Ю.Ф. Шевакин, А.З. Глейберг – М.: «Металлургия», 1968. – 440 с.

20. Шмитц, Х. Штучное производство сварных труб с продольным швом / Х. Шмитц // Производство труб, пер. с нем: «Металлургия». – 1980. – С. 124 – 136.
21. 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.
22. Самусев, С.В. Разработка методики расчета параметров инструмента для унификации групп сварных труб на участке кромкогибочных прессов / С.В. Самусев, А.В. Люскин, А.И. Романцов и др. // Известия высш. уч. зав. Черная металлургия. – 2013. – № 3. – С. 20 – 22.
23. Naeini, H.M. Analysis of deformation behavior of the large diameter pipe by U-O bending process / H.M. Naeini, G.H. Liaghat, R. Mahchid, A. Sajedinejad, K. Vahedi, B. Ahmadimehr // Journal of Materials Processing Technology. – 2006. – Vol. 177. – P. 179 – 182.
24. 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.
25. Пат. 102248038, КНР, МПК В 21 D 5/06, В 21 D 37/10. Four-pillar type steel tube pre-bending machine / Yecgun Xia, Raolin Xia. Заявл. 23.6.2011; опубл. 23.11.2011.
26. Пат. 102009025301, ФРГ, МПК В 21 D 5/04, В 21 С 37/08. Metal plate deformation apparatus for use during pipe production, has bending apron mounted on mold frame, metal plate arranged toward mold frame, and metal plate pressurizing tool arranged to contact radius surface of mold frame / K. Dieter. Заявл. 15.6.2009; опубл. 16.12.2010.

27. Пат. 20100114853, Республика Корея, МПК В 21 D 5/10, В 21 D 11/02. Apparatus and process for deforming metal sheet / К. Dieter. Заявл. 16.4.2009; опубл. 26.10.2010.
28. Пат. 2360756, Российская Федерация, МПК В 21 D 5/00. Гибочный пресс для сгибания стального листа при изготовлении трубы / Кольбе М., Фельдманн У. – № 2007148900/02: Заявл. 25.12.2007; опубл. 10.07.2009; Бюл. № 19. – 8 с.
29. Пат. 2373012, Российская Федерация, МПК В 21 D 5/04, В 30 В 1/32. Пресс / Шурман К., Себастьян Л. – № 2008105901/02: Заявл. 51.2.2008; опубл. 20.11.2009; Бюл. № 32. – 16 с.
30. Пат. 4311228, ФРГ, МПК В 21 D 5/10, В 21 C 37/08. Method and edge-bending press for forming the edge strips on a metal sheet to be formed into a slotted tube / Hermes R., Kolbe M. Заявл. 2.4.1993; опубл. 6.10.1994.
31. Пат. 7861566, США, МПК В 21 D 51/18. Sheet-bending press for making pipe / Kolbe M., Feldmann U. Заявл. 03.1.2008; опубл. 04.01.2011.
32. Заявка 2011173168, Япония, МПК В 21 D 5/01, В 21 D 19/08. Bending method of plate member / Kolbe M., Feldmann U. Заявл. 22.2.2011; опубл. 8.9.2011.
33. Böhmer, K. 5014038-05.620 Регулировка отгибочного прессы / К. Böhmer. SMS MEER. 2009. – 59 с.
34. Самусев, С.В. Разработка технологических режимов участка формовки трубной заготовки в линии ТЭСА-1420 ОАО «Челябинский трубопрокатный завод» / С.В. Самусев, А.И. Романцов, К.Л. Жигунов, В.В. Больдт, М.С. Сигида // Производство проката. – 2011. – № 10. – С. 20 – 28.
35. Самусев, С.В. Методики формоизменения трубной заготовки для производства труб ответственного назначения для проекта «Южный поток» в условиях ОАО «ЧТПЗ» / С.В. Самусев, А.В. Люскин, В.В. Больдт, К.Л. Жигунов, А.И. Романцов // Сборник докладов международного научно-технического конгресса «ОМД 2014. Фундаментальные проблемы. Инновационные материалы и технологии». – 2014. – Ч. 2. – С. 46.

36. Шинкин, В.Н. Технологические расчеты процессов производства труб большого диаметра по технологии SMS Meer / В.Н. Шинкин, А.П. Коликов // *Металлург.* – 2011. – № 11. – С. 77 – 81.

37. Шинкин, В.Н. Модель пластического формоизменения кромок листовой заготовки при производстве труб большого диаметра для магистральных трубопроводов / В.Н. Шинкин, А.П. Коликов // *Известия высш. уч. зав. Черная металлургия.* – 2011. – № 9. – С. 45 – 49.

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

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

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

41. Lifeng, F. Quality control on crimping of large diameter welding pipe / F. Lifeng, G. Ying, L. Qiang, X. Hongshen // *Chinese journal of mechanical engineering.* – 2012. – № 4. – P. 1 – 10.

42. Самусев, С.В. Экспериментальное исследование формоизменения трубной заготовки методом фотограмметрии на участке кромкогибочного прессы линии ТЭСА 1420 / С.В. Самусев, М.А. Товмасян, О.С. Хлыбов, и др. // *Известия высш. уч. зав. Черная металлургия.* – 2014. – № 5. – С. 15 – 18.

43. Жигулев, Г.П. Расчет энергосиловых параметров процесса подгибки на участке производства сварных труб для магистральных трубопроводов / Г.П. Жигулев, С.В. Самусев, В.А. Фадеев, Ф.Х. Файзулаев // *Известия высш. уч. зав. Черная металлургия.* – 2014. – № 7. – С. 40 – 43.

44. Пат. 101898207, КНР, МПК В 21 D 5/00. Four-point bending progressive die forming method for large straight seam pipe blank / Zhao J., Honglei S. Заявл. 12.7.2010; опубл. 30.5.2012.
45. Пат. 201136014, КНР, МПК В 21 D 5/06, В 21 D 43/00, В 21 С 37/08. 18m U-shaping pressure / Jiuyan W. Заявл. 24.10.2007; опубл. 22.10.2008.
46. 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.
47. Пат. 2005021910, Япония, МПК В 21 С 37/08, В 21 D 05/01. Rocker die type U press forming method in UO steel pipe manufacturing process, and rocker die type U press die / Seki H, Yamashita M. Заявл. 30.6.2003; опубл. 27.1.2005.
48. Пат. 10211520, Япония, МПК В 21 С 37/08, В 21 D 05/01. Manufacture of UOE steel tube / Miyamaru M., Horie M. Заявл. 29.1.1997; опубл. 11.08.1998.
49. Осадчий, В.Я. Производство и качество стальных труб: Учебное пособие для вузов / В.Я. Осадчий, А.П. Коликов – М.: Издательство МГУПИ, 2012. – 370 с.
50. Herynk, M.D. Effects of the UOE/UOC pipe manufacturing process on pipe collapse pressure / M.D. Herynk, S. Kyriakides, A. Onoufriou, H.D. Yun // International Journal of Mechanical Sciences. – 2007. – Vol. 49. – P. 533-553.
51. Кондратов, Л.А. Оценка формруемости и продольной устойчивости высокопрочных труб по технологии UOE / Кондратов Л.А. // Ин-т «Черметинформация» Новости черной металлургии за рубежом. – 2011. – № 2. – С. 56 – 58.
52. Yang, Z.Z. 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, H.B. Zhang // Acta Metallurgica Sinica (English Letters). – 2008. – V. 21. – № 2. – P. 85 – 93.
53. 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.

54. 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.

55. Шабалов, И.П. Влияние технологии формовки листовой заготовки на комплекс механических свойств электросварных труб / И.П. Шабалов, Г.А. Филиппов, Д.М. Соловьев // Сборник докладов международного научно-технического конгресса «ОМД 2014. Фундаментальные проблемы. Инновационные материалы и технологии». – 2014. – Ч. 2. – С. 17 – 23.

56. Brensing, K. Steel tube and pipe manufacturing processes / Karl-Heinz Brensing, Sommer Baldur – 63 pp.

57. Li, J. Numerically controlled rolling process of thick metal plate / J. Li, X.A. Yan, G.D. Wang, A.D. Jia // Journal of Materials Processing Technology. – 2002. – Vol. 129. P. 299 – 304.

58. Пат. 102218642, КНР, МПК В 23 Р 15/00, В 23 К 31/02, В 21 D 5/00. Manufacturing method of thick wall steel pipe with small radius-thickness ratio used for building structure / Qiongxian Liu, Chen Liu. Заявл. 29.04.2011; опубл. 20.3.2013.

59. Дерикс, В. Новые технологии экономичного и гибкого производства труб большого диаметра / В. Дерикс, Б. Гензер // Труды XIII Междунар. науч.-практ. конф. «Трубы-2005». Ч. 1. – Челябинск: ОАО «РосНИТИ», 2005. С. 105 – 108.

60. Пат. 102189149, КНР, МПК В 21 С 37/08. Technological method for forming high-strength thick wall steel tube / Jiasi W. Guorong H. Заявл. 8.3.2010; опубл. 14.11.2012.

61. Пат. 2529849, Евросоюз, МПК В 21 D 5/01, В 21 С 37/08. Device and method for manufacturing slot pipes made of sheet panels / Thome M. Kolbe M. Заявл. 31.5.2011; опубл. 5.12.2012.

62. Пат. 2427663, Российская Федерация, МПК С 22 С 38/00. Высокопрочная толстостенная сварная стальная труба для трубопровода с превосходной низкотемпературной вязкостью и способ ее изготовления / Хара Т., Асахи Х. – № 2009125552/02: Заявл. 4.12.2007; опубл. 27.08.2011; Бюл. № 24. – 32 с.

63. 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.

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

65. 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.

66. Streppel, A.H. Process modeling for air bending: validation by experiments and simulations / A.H. Streppel, D. Lutters, E. ten Brinke, H.H. Pijlman // Journal of Materials Processing Technology. – 2001. – Vol. 115. P. 76 – 82.

67. Hambli, R. Finite element damage modeling in bending process / R. Hambli, A. Mkaem, A. Potiron // Journal of Materials Processing Technology. – 2004. – Vol. 147. – P. 302 – 310.

68. Antonelli, L. Identification of elasto-plastic characteristics by means of air-bending test / L. Antonelli, P. Salvini, F. Vivio, V. Vullo // Journal of Materials Processing Technology. – 2007. – Vol. 183. – P. 127 – 139.

69. Canteli, J.A. Experimental identification of a thermo-mechanical model for air bending / J.A. Canteli, J.L. Cantero, M.H. Miguelez // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2008. – Vol. 203. – P. 267 – 276.
70. Chandel, J.D. Formation of X-120 M line pipe through J-C-O-E technique / J.D. Chandel, N.L. Singh // *Scientific Research*. – 2011. – V. 3. – P. 400 – 410. + известия 3-2014.
71. 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.
72. Шинкин, В.Н. Механика сплошных сред: Курс лекций / В.Н. Шинкин – М.: Изд. Дом МИСиС, 2010. – 235 с.
73. 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.
74. 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.
75. Матвеев, Ю.М. Атлас структур и дефектов сварных труб / Ю.М. Матвеев, В.Ф. Попов, Ю.И. Петраков, К.Г. Исерсон – М.: Металлургия, 1967. – 112с.
76. Селезнев, В.Е. Основы численного моделирования магистральных трубопроводов / В.Е. Селезнев, В.В. Алешин, С.Н. Прялов – М.: МАКС Пресс, 2009. – 436 с.
77. Wen, S.W. Finite element modeling of a submerged arc welding process / S.W. Wen, P. Hilton, D.C.J. Farrugia // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2001. – Vol. 119. – P. 203 – 209.
78. Palumbo, G. Effect of forming and calibration operations on the final shape of large diameter welded tubes / G. Palumbo, L. Tricarico // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2005. – Vol. 164 – 165. – P. 1089 – 1098.

79. Заявка 2006289439, Япония, МПК В 21 D 39/20, В 21 С 37/30. Method and device for expanding UOE steel tube / Shimomoto T. Заявл. 11.4.2005; опубл. 26.10.2006.

80. Заявка 05317994, Япония, МПК В 21 D 39/20, В 21 D 3/14. Method for expanding UOE steel pipe / Ohira N., Maeda K. Заявл. 22.5.1992; опубл. 3.12.1993.

81. Пат. 2817620, Япония, МПК В 21 D 39/20, В 21 С 37/08, В 21 D 3/14. Head for mechanical pipe expander / Hirose Y. Заявл. 22.4.1994; опубл. 30.10.1998.

82. Заявка 59197321, Япония, МПК В 21D 39/20. Expanding device for UOE pipe / Kamigaki T., Mizutani M. Заявл. 21.4.1983; опубл. 8.11.1984.

83. Пат. 0148086, Япония, МПК В 21 D 3/12, В 21 D 3/14. Method for controlling longitudinal warp in mechanical expander / Yazawa K., Hirata K. Заявл. 14.6.1983; опубл. 18.10.1989.

84. Пат. 5333281, Япония, МПК В 21 С 37/08. Method of preventing bend when expanding UOE steel pipe / Miwa T. Kawae E. Заявл. 17.2.2010; опубл. 6.11.2013.

85. Пат. 8474292, США, МПК В 21 D 39/20. Straightening a tube on an expander / Kolbe M., Feldmann U. Заявл. 16.10.2008; опубл. 2.7.2013.

86. Заявка 2006272365, Япония, МПК В 21 D 3/14. Equipment and method for pipe end sizing of UOE steel pipe / Yamamoto N., Konishi T. Заявл. 28.03.2005; опубл. 12.10.2006.

87. Разработка методики расчета и оценки режимов деформации трубной заготовки в линии кромкогибочных прессов, прессы шаговой формовки, сборочно-сварочного стана и прессы экспандера для производства газонефтепроводных труб диаметром 508-1422 мм с толщиной стенки до 45 мм и классом прочности К52-К80 (Х60-Х100) // Отчет о НИР (заключ.) / НИТУ МИСИС, рук. С.В. Самусев. – М. 2011. – 201 с. – Библиогр.: с. 201. – Инв. № 01201068251.

88. Материалы сайта www.ausferr.ru

89. Kolbe, M. 5002020-05.500 Производственный инструмент / M. Kolbe. SMS Meer. 2009. – 4 с.
90. Feldmann, U. 5002020-00.160 Werkzeugliste / U. Feldmann. SMS Meer. 2009. – 1 с.
91. Самусев, С.В. Способ сборки профиля заготовки после прессы пошаговой формовки в линии ТЭСА 1420 / С.В. Самусев, А.В. Люскин, В.В. Больдт // Известия Вузов Черная металлургия – 2010. – № 3. – С. 9-13.
92. Самусев, С.В. Анализ способов формовки заготовки для производства труб большого диаметра / С.В. Самусев, А.В. Люскин, В.В. Больдт // Сталь. – 2009. – № 12. – С. 46 – 49.
93. Степанский, Л. Г. Расчеты процессов обработки металлов давлением / Л. Г. Степанский – М.: Машиностроение, 1979. – 215 с.
94. Киреев, В. И. Численные методы в примерах и задачах: учебное пособие / В. И. Киреев, А. В. Пантелеев. – М.: Высш. шк. 2004. – 480 с.
95. Сегерлинд, Л. Применение метода конечных элементов: перевод с английского – М.: Мир, 1979. – 392 с.
96. Исследование процесса формовки трубных полуцилиндрических заготовок из стали повышенной прочности в двухшовном потоке трубоектросварочного цеха // Отчет о НИР (заключ.) / ВНИТИ, рук. В.К. Коломенский. Днепропетровск, 1971. – 60 с. – Библиогр.: с. 65. – Инв. №Р012743.
97. License for MSC Agreement: RE006574CTR Customer: Chelyabinsk Tube Rolling Plant.
98. Анурьев, В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: В 3-х т. Т. 1. / В. И. Анурьев – М.: Машиностроение, 2001. – 920 с.
99. Дубинский, Ф.С. Математическое планирование эксперимента в прокатке: Конспект лекций / Ф.С.Дубинский, М.А. Соседкова – Челябинск: Издательство ЮУрГУ, 2007. – 25 с.
100. Звонарев, Д.Ю. Разработка математической модели формирования прикромочной зоны листовой заготовки в процессе производства сварных

прямошовных труб большого диаметра / Д.Ю. Звонарев, В.Я. Осадчий, А.П. Коликов // Сборник докладов международного научно-технического конгресса «ОМД 2014. Фундаментальные проблемы. Инновационные материалы и технологии». – 2014. – Ч. 2. – С. 107.

101. Коликов, А.П. Математическая модель формовки листовой заготовки при производстве сварных труб большого диаметра / А.П. Коликов, Д.Ю. Звонарев, В.Я. Осадчий // Пластическая деформация металлов: сборник научных трудов в 2-х томах. – Днепропетровск. – 2014. – Т.1. – С. 118 – 122.

102. Осадчий, В.Я. Математическая модель формоизменения листовой заготовки при производстве сварных труб большого диаметра / В.Я. Осадчий, Е.А. Гаас, Д.Ю. Звонарев, А.П. Коликов // Сталь. – 2014. – № 5. – С. 63 – 67.

103. ZV JCO: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013660023 / Звонарев Д.Ю. – № 2013617699: заявл. 27.08.2013; опубл. 20.12.2013.

Приложение А
Технологические параметры гибочных матриц

Обозначения представлены в главе 3.

Таблица А.1 – Основные параметры верхних гибочных матриц [33]

№ гибочной матрицы	X_0 , мм	X_1 , мм	$R_{\text{экв}}$, мм	W , мм
1	125	160	212,13	10
2	160	210	274,54	20
3	165	270	352,13	10
4	190	320	453,59	10

Таблица А.2 – Узловые точки верхней гибочной матрицы №1

№	X , мм	Y , мм	R_i , мм	φ , град	№	X , мм	Y , мм	R_i , мм	φ , град
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0	325,81	0	22	105	18,99	246,20	21,50
2	5	0,04	322,54	0,88	23	110	21,02	241,51	22,77
3	10	0,16	319,23	1,78	24	115	23,19	236,67	24,08
4	15	0,35	315,89	2,68	25	120	25,49	231,69	25,42
5	20	0,62	312,51	3,9	26	125	27,94	226,53	26,82
6	25	0,98	309,09	4,52	27	130	30,55	221,19	28,26
7	30	1,41	305,62	5,45	28	135	33,32	215,63	29,76
8	35	1,93	302,11	6,40	29	140	36,27	209,85	31,32
9	40	2,54	298,55	7,36	30	145	39,41	203,79	32,96
10	45	3,23	294,95	8,34	31	150	42,76	197,43	34,68
11	50	4	291,28	9,33	32	155	46,34	190,70	36,49
12	55	4,87	287,57	10,33	33	160	50,17	183,57	38,42
13	60	5,83	283,79	11,35	34	165	54,28	175,92	40,48
14	65	6,88	279,94	12,39	35	170	58,72	167,67	42,71
15	70	8,02	276,03	13,45	36	175	63,53	158,64	45,15
16	75	9,27	272,04	14,52	37	180	68,80	148,61	47,86
17	80	10,61	267,97	15,62	38	185	74,63	137,21	50,94
18	85	12,07	263,81	16,74	39	190	81,20	123,79	54,56
19	90	13,62	259,57	17,89	40	195	88,83	107,01	59,10
20	95	15,29	255,22	19,07	41	200	98,31	83,08	65,56
21	100	17,08	250,77	20,27					

Аппроксимирующая функция связи горизонтальной проекции с радиусом эвольвенты для гибочной матрицы №1:

$$X_i = 205,41 - 23,48 \times 10^{-3} \cdot R_i + 234,39 \times 10^{-6} \cdot R_i^2 - 9,54 \times 10^{-6} \cdot R_i^3 + 7,88 \times 10^{-9} \cdot R_i^4 + 5 \times 10^{-12} \cdot R_i^5 \quad (\text{A.1})$$

Аппроксимирующую функция верхней гибочной матрицы №1:

$$Y(X) = 5,55 + 20,77 \cdot X_i - 3,6 \cdot X_i^2 + 417,52 \times 10^{-3} \cdot X_i^3 - 29,03 \times 10^{-3} \cdot X_i^4 + 1,27 \times 10^{-3} \cdot X_i^5 - 35,83 \times 10^{-6} \cdot X_i^6 + 667,89 \times 10^{-9} \cdot X_i^7 - 8,13 \times 10^{-9} \cdot X_i^8 + 62,11 \times 10^{-12} \cdot X_i^9 - 270,27 \times 10^{-15} \cdot X_i^{10} \quad (\text{A.2})$$

Таблица А.3 – Узловые точки верхней гибочной матрицы №2

№	X, мм	Y, мм	R _i , мм	φ, град	№	X, мм	Y, мм	R _i , мм	φ, град
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0	421,66	0	25	120	18,79	332,89	18,53
2	5	0,03	418,39	0,68	26	125	20,51	328,50	19,44
3	10	0,12	415,10	1,37	27	130	22,32	324,03	20,38
4	15	0,27	411,78	2,06	28	135	24,23	319,46	21,33
5	20	0,48	408,43	2,76	29	140	26,23	314,80	22,30
6	25	0,75	405,05	3,47	30	145	28,33	310,03	23,30
7	30	1,09	401,64	4,18	31	150	30,53	305,16	24,32
8	35	1,48	398,19	4,90	32	155	32,85	300,16	25,36
9	40	1,94	394,72	5,62	33	160	35,28	295,03	26,43
10	45	2,47	391,21	6,36	34	165	37,82	289,76	27,53
11	50	3,06	387,66	7,10	35	170	40,49	284,34	28,66
12	55	3,71	384,07	7,85	36	175	43,29	278,75	29,83
13	60	4,44	380,44	8,60	37	180	46,22	272,98	31,03
14	65	5,23	376,77	9,37	38	185	49,31	267,01	32,28
15	70	6,09	373,05	10,15	39	190	52,54	260,82	33,57
16	75	7,02	369,29	10,93	40	195	55,95	254,37	34,91
17	80	8,02	365,48	11,73	41	200	59,53	247,64	36,32
18	85	9,09	361,62	12,53	42	205	63,30	240,60	37,79
19	90	10,24	357,70	13,35	43	210	67,29	233,19	39,34

Продолжение таблицы А.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
20	95	11,47	353,73	14,18	44	215	71,50	225,35	40,97
21	100	12,77	349,70	15,02	45	220	75,98	217,02	42,71
22	105	14,15	345,60	15,87	46	225	80,75	208,10	44,57
23	110	15,61	341,44	16,74	47	230	85,85	198,45	46,58
24	115	17,16	337,20	17,63					

Аппроксимирующая функция связи горизонтальной проекции с радиусом эвольвенты для гибочной матрицы №2:

$$X_i = 194,6 + 1,2 \cdot R_i - 7,8 \times 10^{-3} \cdot R_i^2 + 2 \times 10^{-5} \cdot R_i^3 - 3,8 \times 10^{-8} \cdot R_i^4 + 2,8 \times 10^{-11} \cdot R_i^5 \quad (\text{A.3})$$

Аппроксимирующую функция верхней гибочной матрицы №2:

$$Y(X) = 6,17 + 24,59 \cdot X_i - 4,62 \cdot X_i^2 + 583,86 \times 10^{-3} \cdot X_i^3 - 44,32 \times 10^{-3} \cdot X_i^4 + 2,11 \times 10^{-3} \cdot X_i^5 - 65,49 \times 10^{-6} \cdot X_i^6 + 1,34 \times 10^{-6} \cdot X_i^7 - 17,87 \times 10^{-9} \cdot X_i^8 + 150,09 \times 10^{-12} \cdot X_i^9 - 718,68 \times 10^{-15} \cdot X_i^{10} + 1,5 \times 10^{-15} \cdot X_i^{11} \quad (\text{A.4})$$

Таблица А.4 – Узловые точки верхней гибочной матрицы №3

№	X, мм	Y, мм	R _i , мм	φ, град	№	X, мм	Y, мм	R _i , мм	φ, град
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0	540,83	0	31	150	22,81	430,36	17,98
2	5	0,02	537,57	0,53	32	155	24,47	426,03	18,68
3	10	0,09	534,28	1,07	33	160	26,19	421,63	19,4
4	15	0,21	530,98	1,60	34	165	27,99	417,17	20,12
5	20	0,37	527,65	2,15	35	170	29,86	412,64	20,86
6	25	0,58	524,30	2,69	36	175	31,80	408,04	21,61
7	30	0,84	520,92	3,24	37	180	33,82	403,36	22,37
8	35	1,15	517,53	3,79	38	185	35,91	398,60	23,14
9	40	1,51	514,10	4,35	39	190	38,09	393,75	23,93
10	45	1,91	510,66	4,91	40	195	40,35	388,81	24,74
11	50	2,37	507,18	5,48	41	200	42,70	383,78	25,56

Продолжение таблицы А.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
12	55	2,87	503,68	6,05	42	205	45,14	378,64	26,39
13	60	3,42	500,15	6,62	43	210	47,66	373,39	27,25
14	65	4,03	496,59	7,20	44	215	50,29	368,03	28,12
15	70	4,69	493	7,78	45	220	53,01	362,54	29,01
16	75	5,40	489,38	8,37	46	225	55,83	356,92	29,93
17	80	6,16	485,73	8,97	47	230	58,77	351,15	30,86
18	85	6,98	482,04	9,57	48	235	61,81	345,23	31,83
19	90	7,85	478,32	10,17	49	240	64,97	339,15	32,82
20	95	8,77	474,56	10,78	50	245	68,26	332,87	33,84
21	100	9,75	470,77	11,40	51	250	71,68	326,40	34,89
22	105	10,79	466,93	12,02	52	255	75,24	319,72	35,98
23	110	11,88	463,06	12,66	53	260	78,94	312,79	37,11
24	115	13,03	459,14	13,29	54	265	82,81	305,59	38,28
25	120	14,24	455,18	13,94	55	270	86,84	298,10	39,50
26	125	15,51	451,17	14,59	56	275	91,05	290,27	40,77
27	130	16,85	447,11	15,25	57	280	95,47	282,06	42,11
28	135	18,24	443	15,92	58	285	100,1	273,42	43,51
29	140	19,70	438,85	16,60	59	290	104,97	264,28	45
30	145	21,22	434,63	17,28	60	295	110,11	254,55	46,58

Аппроксимирующая функция связи горизонтальной проекции с радиусом эвольвенты для гибочной матрицы №3:

$$X_i = 343,06 - 51,57 \times 10^{-3} \cdot R_i + 289,29 \times 10^{-6} \cdot R_i^2 - 3,84 \times 10^{-6} \cdot R_i^3 + 2,21 \times 10^{-9} \cdot R_i^4 + 417,16 \times 10^{-15} \cdot R_i^5 \quad (\text{A.5})$$

Аппроксимирующую функция верхней гибочной матрицы №3:

$$Y(X) = 8,29 + 24,18 \cdot X_i - 3,48 \cdot X_i^2 + 338,5 \times 10^{-3} \cdot X_i^3 - 19,82 \times 10^{-3} \cdot X_i^4 + 729,36 \times 10^{-6} \cdot X_i^5 - 17,46 \times 10^{-6} \cdot X_i^6 + 275,61 \times 10^{-9} \cdot X_i^7 - 2,85 \times 10^{-9} \cdot X_i^8 + 18,47 \times 10^{-12} \cdot X_i^9 - 68,4 \times 10^{-15} \cdot X_i^{10} \quad (\text{A.6})$$

Таблица А.5 – Узловые точки верхней гибочной матрицы №4

№	X, мм	Y, мм	R _i , мм	φ, град	№	X, мм	Y, мм	R _i , мм	φ, град
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0	696,66	0	39	190	28,35	557,12	17,63
2	5	0,02	693,4	0,41	40	195	29,96	552,83	18,17
3	10	0,07	690,12	0,83	41	200	31,63	548,48	18,72
4	15	0,16	686,83	1,24	42	205	33,35	544,09	19,27
5	20	0,29	683,52	1,66	43	210	35,13	539,65	19,83
6	25	0,45	680,19	2,08	44	215	36,96	535,16	20,40
7	30	0,65	676,84	2,50	45	220	38,85	530,61	20,98
8	35	0,89	673,48	2,93	46	225	40,79	526	21,56
9	40	1,16	670,10	3,36	47	230	42,80	521,34	22,15
10	45	1,48	666,70	3,79	48	235	44,86	516,61	22,74
11	50	1,83	663,28	4,22	49	240	46,99	511,81	23,35
12	55	2,21	659,84	4,65	50	245	49,18	506,95	23,96
13	60	2,64	656,38	5,09	51	250	51,44	502,02	24,59
14	65	3,10	652,90	5,53	52	255	53,76	497,02	25,22
15	70	3,61	649,40	5,97	53	260	56,15	491,93	25,86
16	75	4,15	645,88	6,42	54	265	58,60	486,77	26,51
17	80	4,73	642,34	6,86	55	270	61,14	481,52	27,18
18	85	5,35	638,77	7,31	56	275	63,74	476,18	27,85
19	90	6,02	635,18	7,77	57	280	66,42	470,74	28,54
20	95	6,72	631,56	8,22	58	285	69,18	465,21	29,24
21	100	7,46	627,92	8,68	59	290	72,02	459,57	29,95
22	105	8,25	624,25	9,15	60	295	74,94	453,81	30,68
23	110	9,07	620,56	9,61	61	300	77,95	447,94	31,42
24	115	9,94	616,84	10,08	62	305	81,05	441,95	32,18
25	120	10,85	613,09	10,56	63	310	84,24	435,81	32,95
26	125	11,80	609,31	11,03	64	315	87,53	429,54	33,74
27	130	12,80	605,51	11,52	65	320	90,92	423,11	34,55
28	135	13,84	601,67	12	66	325	94,42	416,52	35,39
29	140	14,93	597,80	12,49	67	330	98,03	409,75	36,24
30	145	16,06	593,90	12,98	68	335	101,75	402,79	37,12
31	150	17,23	589,96	13,48	69	340	105,60	395,62	38,03
32	155	18,45	585,99	13,98	70	345	109,58	388,23	38,96
33	160	19,72	581,98	14,49	71	350	113,69	380,59	39,93
34	165	21,04	577,94	15	72	355	117,95	372,68	40,93
35	170	22,40	573,86	15,51	73	360	122,36	364,47	41,96
36	175	23,81	569,74	16,03	74	365	126,94	355,93	43,04
37	180	25,27	565,67	16,56	75	370	131,71	347,02	44,17
38	185	26,79	561,37	17,09	76	375	136,66	337,69	45,34

Аппроксимирующая функция связи горизонтальной проекции с радиусом эвольвенты для гибочной матрицы №4:

$$X_i = 442,87 - 62,27 \times 10^{-3} \cdot R_i + 271,37 \times 10^{-6} \cdot R_i^2 - 2,42 \times 10^{-6} \cdot R_i^3 + 1,14 \times 10^{-9} \cdot R_i^4 + 106,9 \times 10^{-15} \cdot R_i^5 \quad (\text{A.7})$$

Аппроксимирующую функция верхней гибочной матрицы №4:

$$Y(X) = 10,73 + 24,42 \cdot X_i - 2,8 \cdot X_i^2 + 218,07 \times 10^{-3} \cdot X_i^3 - 10,22 \times 10^{-3} \cdot X_i^4 + 301,35 \times 10^{-6} \cdot X_i^5 - 5,78 \times 10^{-6} \cdot X_i^6 + 73,15 \times 10^{-9} \cdot X_i^7 - 605,56 \times 10^{-12} \cdot X_i^8 + 3,15 \times 10^{-12} \cdot X_i^9 - 9,36 \times 10^{-15} \cdot X_i^{10} \quad (\text{A.8})$$

Таблица А.6 – Узловые точки нижней гибочной матрицы №1

№	X_2 , мм	Y_2 , мм	№	X_2 , мм	Y_2 , мм	№	X_2 , мм	Y_2 , мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	0	19	164	62,3	37	200	84,53
2	131,53	47,87	20	166	63,34	38	202	86,01
3	132	48,07	21	168	64,41	39	204	87,53
4	134	48,84	22	170	65,49	40	206	89,08
5	136	49,62	23	172	66,59	41	208	90,67
6	138	50,41	24	174	67,72	42	210	92,29
7	140	51,23	25	176	68,86	43	212	93,94
8	142	52,05	26	178	70,03	44	214	95,64
9	144	52,9	27	180	71,22	45	216	97,38
10	146	53,76	28	182	72,44	46	218	99,16
11	148	54,64	29	184	73,68	47	220	100,98
12	150	55,53	30	186	74,94	48	222	102,85
13	152	56,45	31	188	76,23	49	224	104,77
14	154	57,38	32	190	77,54	50	226	106,74
15	156	58,32	33	192	78,88	51	226,1	106,84
16	158	59,29	34	194	80,25	52	269,23	149,98
17	160	60,28	35	196	81,65			
18	162	61,28	36	198	83,07			

Аппроксимирующую функция нижней гибочной матрицы №1:

$$Y_2(X_2) = \begin{cases} 5,02 + 0,36 \cdot X_2, & X_2 \in [0; 131,53) \\ -13,71 + 769,98 \times 10^{-3} \cdot X_2 - \\ -4,03 \times 10^{-3} \cdot X_2^2 + 13,2 \times 10^{-6} \cdot X_2^3, & X_2 \in [131,53; 226,1] \\ -119,31 + 1 \cdot X_2, & X_2 \in (226,1; 269,23] \end{cases} \quad (\text{A.9})$$

Таблица А.7 – Узловые точки нижней гибочной матрицы №2

№	X_2 , мм	Y_2 , мм	№	X_2 , мм	Y_2 , мм	№	X_2 , мм	Y_2 , мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	0	14	156	23,94	27	312	84,75
2	12	0,77	15	168	27,14	28	324	91,49
3	24	1,7	16	180	30,56	29	336	98,59
4	36	2,81	17	192	34,2	30	348	106,1
5	48	4,09	18	204	38,07	31	360	113,98
6	60	5,54	19	216	42,18	32	372	122,43
7	72	7,18	20	228	46,53	33	384	131,34
8	84	9	21	240	51,14	34	396	140,8
9	96	11	22	252	56,01	35	408	150,89
10	108	13,19	23	264	61,16	36	420	161,67
11	120	15,58	24	276	66,59	37	431,7	172,95
12	132	18,16	25	288	72,32			
13	144	20,95	26	300	78,37			

Аппроксимирующую функция нижней гибочной матрицы №2:

$$Y_2(X_2) = -87,92 \times 10^{-3} + 65,17 \times 10^{-3} \cdot X_2 + 404,59 \times 10^{-6} \cdot X_2^2 + \\ + 1,59 \times 10^{-6} \cdot X_2^3 - 4,44 \times 10^{-9} \cdot X_2^4 + 6,39 \times 10^{-12} \cdot X_2^5 \quad (\text{A.10})$$

Приложение Б

Акт внедрения программного обеспечения «ZV JCO»

Утверждаю
 Заместитель технического директора ОАО «ЧТПЗ»
 А.И. Романцов
 20__ г.



Акт внедрения
 программного обеспечения «ZV JCO»

Разработчик: ведущий инженер по моделированию технологических процессов Звонарев Д.Ю.

Основание для разработки: отсутствие единой программы для расчета настроечных параметров прессы подгибки кромок, прессы шаговой формовки и сборочно-сварочного стана.

Место внедрения: ОАО «ЧТПЗ», ТЭСЦ «Высота 239»

Форма внедрения: установка на ПК Технологической группы ТЭСЦ «Высота 239» и настройка программного обеспечения для расчета настроечных и контролируемых параметров прессы подгибки кромок, прессы шаговой формовки и сборочно-сварочного стана.

Дата начала тестирования: 1 августа 2013 г.

Дата внедрения: 1 ноября 2013 г.

Результаты применения:

- а) сокращение времени на расчет настроечных и контролируемых параметров;
- б) снижение процента ошибок в расчетах;
- в) появление возможности сохранять рассчитанные настроечные параметры и при необходимости вносить в них изменения для получения новых технологических карт;
- г) создание баз данных марок сталей, их механических свойств, нормативных документов на изготовление труб большого диаметра, входящих в программное обеспечение, что исключает необходимость ручного ввода данных по механическим свойствам отдельных марок сталей из сторонних источников.

Эффективность внедрения: система удобна в работе и значительно повышает производительность труда. За все время тестирования и внедрения не выявлено существенных различий между результатами замеров трубной заготовки и расчетными значениями, полученными с помощью разработанного программного обеспечения.

Начальник ТЭСЦ «Высота 239»

Е.В. Губанов

Приложение В

Акт о проделанной работе по изготовлению опытной партии труб из класса прочности X46SS согласно требованиям ТУ 14-158-157-2008

Утверждаю
 Заместитель технического директора ОАО «ЧТПЗ»
 А.И. Романцов
 " 20 " г.



**Акт
 о проделанной работе**

по изготовлению опытной партии труб из класса прочности X46SS
 согласно требованиям ТУ 14-158-157-2008

Работа выполнялась в ТЭСЦ «Высота 239», с целью производства опытной партии сероводостойких труб из стали класса прочности X46SS по ТЗ № 22913-1-2013 от 14.11.2013г.

Согласно пункту 5 требований ТЗ необходимо обеспечить прохождение заданным листовым прокатом всех операций участка формовки в соответствии с требованиями ТУ 14-158-157-2008 и АТК 158-Тр.ТСЗ-256-2013.

Для производства труб диаметром 720 мм с толщиной стенки 22 мм из стали класса прочности X46SS с использованием ПО «ZV JCO» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013660023) были рассчитаны технологические режимы на операции подгибки кромок, шаговой формовки, представленные в виде технологических карт. В приложении А представлены фактические значения результатов замеров на прессе подгибки кромок и фактические значения ходов пуансона на прессе шаговой формовки.

Полученные трубные заготовки прошли дальнейший технологический цикл и были сданы согласно ТУ 14-158-157-2008 в присутствии Приемочной Комиссии в составе представителей ООО «Газпром ВНИИГАЗ» и ОАО «ЧТПЗ».

Ведущий инженер

Начальник ТЭСЦ «Высота 239»

Д.Ю. Звонарев

Е.В. Губанов

Приложение А

Таблица 1 – Результаты замеров высоты подгибки кромок на прессе подгибки кромок

№ трубы	Высота подгибки		Радиус подгибки (соответствует/не соответствует)
	левая сторона, мм	правая сторона, мм	
1300209271	67	58	соответствует
1300209272	58	60	соответствует
1300209273	57	58	соответствует
1300209274	58	60	соответствует
1300209275	59	60	соответствует
1300209276	57	57	соответствует
1300209277	57	58	соответствует
1300209278	56	57	соответствует
1300209279	60	61	соответствует

Таблица 2 – Результаты фактического хода пуансона по шагам

№ трубы	Ход пуансона, мм									
	Шаг №1	Шаг №2	Шаг №3	Шаг №4	Шаг №5	Шаг №6	Шаг №7	Шаг №8	Шаг №17	
1300209271	29	28	26	24	23	24	25	24	25	
1300209272	29	28	25	24	23	24	25	23	25	
1300209273	29	28	24	23	23	24	24	25	26	
1300209274	29	28	24	23	23	23	25	26	27	
1300209275	29	28	24	23	23	24	25	25	27	
1300209276	29	28	24	23	23	24	26	26	27	
1300209277	29	28	24	23	23	23	24	26	26	
1300209278	29	28	24	23	23	24	25	26	26	
1300209279	29	28	24	23	23	24	24	24	26	

Ведущий инженер



Д.Ю. Звонарев

Начальник участка формовки



С.В. Качесов

Зам. начальника цеха по технологии и качеству



Д.В. Кондусов