

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»

На правах рукописи

Горбунова Юлия Дмитриевна

**АНАЛИЗ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ
ЭЛЛИПТИЧЕСКИХ СТАЛЬНЫХ ДНИЩ ПРИ ГОРЯЧЕЙ ШТАМПОВКЕ**

Специальность 05.16.05 – Обработка металлов давлением

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
д.т.н., профессор
Г.А. Орлов

Екатеринбург – 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 СОСТОЯНИЕ ПРОИЗВОДСТВА ГОРЯЧЕШТАМПОВАННЫХ ЭЛЛИПТИЧЕСКИХ ДНИЦ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ).....	9
1.1 Требования к конструкции, материалу и качеству эллиптических днищ. Требования нормативной документации.....	9
1.2 Разработка технологического процесса горячей штамповки эллиптических днищ.....	14
1.3 Основные этапы штамповки эллиптических днищ.....	26
1.4 Контроль качества горячештампованных эллиптических днищ.....	28
1.5 Факторы, влияющие на изменение толщины стенки эллиптических днищ при горячей штамповке.....	31
1.6 Результаты ранее проведенных исследований изменения толщины стенки днищ при горячей штамповке.....	35
1.7 Возможности компьютерного моделирования процессов обработки металлов давлением.....	40
1.8 Выводы, постановка целей и задач исследования.....	42
2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ЭЛЛИПТИЧЕСКИХ ДНИЦ ПРИ ГОРЯЧЕЙ ШТАМПОВКЕ.....	44
2.1 Методика проведения эксперимента.....	44
2.2 Результаты экспериментального исследования.....	49
2.3 Анализ результатов экспериментального исследования.....	64
2.4 Влияние зазора между сменным кольцом и пуансоном на форму эллиптических днищ.....	65
2.5 Статистическая оценка экспериментальных данных.....	67
2.6 Выводы.....	75
3 КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЯЧЕЙ ШТАМПОВКИ ЭЛЛИПТИЧЕСКОГО ДНИЩА.....	77
3.1 Постановка задачи.....	77

3.2 Результаты компьютерного моделирования. Сопоставление результатов теоретического и экспериментального исследований.....	79
3.2.1 Форма модели штампованного днища.....	80
3.2.2 Силовые параметры рассчитанного процесса штамповки.....	80
3.2.3 Изменение толщины модели штампованного днища.....	83
3.2.4 Анализ распределения показателей напряженно-деформированного состояния по объему днища.....	87
3.3 Выводы.....	91
4 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА.....	93
4.1 Защита поверхности заготовок при помощи покрытий.....	93
4.2 Изготовление многослойной заготовки.....	96
4.3 Оценка качества горячештампованных эллиптических днищ с использованием комплексных показателей.....	97
4.4 Выводы.....	105
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	107
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	109
Приложение. Акт о внедрении результатов диссертационной работы.....	124

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Крупногабаритные стальные детали сосудов и аппаратов, применяемых в химической, нефтеперерабатывающей и других отраслях промышленности, должны обладать достаточной прочностью в условиях эксплуатации на протяжении расчетного срока службы. Одними из наиболее металлоемких конструктивных элементов сосудов и аппаратов являются их замыкающие элементы – днища.

Преимущественное применение нашли рассматриваемые в данной работе эллиптические днища, так как такая форма образующих обеспечивает более высокие прочностные характеристики. В условиях серийного производства эллиптические днища изготавливаются горячей листовой штамповкой на гидравлических прессах. В силу особенностей этого вида обработки давлением, днище получается с переменной толщиной стенки. Технологическое утонение стенки днища в процессе горячей штамповки компенсируется за счет увеличения толщины листовой заготовки.

В ПАО «Уралхиммаш» в настоящее время, для выполнения норм российских и международных стандартов ASME, DIN и др., расчетную толщину листовой заготовки днища увеличивают на 15% для компенсации утонения при горячей штамповке, что приводит к значительному повышению металлоемкости детали.

Таким образом, исследования, направленные на обоснование возможности снижения исполнительной толщины заготовки горячештампованного эллиптического днища при сохранении требуемой прочности, являются актуальными, так как приводят к экономии металла. Снижение металлоемкости деталей обеспечивает также и экономию энергоресурсов на предприятии, поэтому данное исследование соответствует одному из приоритетных направлений развития науки РФ, связанному с энергоэффективностью и энергосбережением, и является актуальным.

В связи с этим, исследования, направленные на изучение изменения толщины стенки эллиптических днищ при горячей штамповке и на совершенствование технологии их изготовления, следует **считать актуальными**.

Степень разработанности темы

Изучению разнотолщинности эллиптических днищ при горячей штамповке посвящены труды Мошнина Е.Н. [1, 2], Ризванова Р.Г. [3, 4] и др.

В этих работах содержатся результаты экспериментальных и теоретических исследований разнотолщинности днищ: получены распределения толщины стенки днищ вдоль образующей, определены напряженное состояние и температурное поле металла днищ на различных этапах штамповки и показано их влияние на распределение толщины стенки штампованного днища.

Однако в перечисленных работах не рассматривается связь полученных результатов исследований с технологией изготовления днищ. Опубликованные исследования охватывают только углеродистые и низколегированные стали, не рассмотрены особенности формоизменения днищ из аустенитных сталей и из двухслойного стального листа. В трудах отсутствуют вычислительные и компьютерные модели процесса штамповки днищ с использованием современных численных методов решения краевых задач, таких, как метод конечных элементов.

Целью работы является снижение металлоемкости эллиптических горячештампованных днищ за счет уменьшения технологической прибавки на расчетную толщину заготовки, компенсирующей утонение металла в процессе изготовления, соответствующей современному состоянию технологического процесса.

Для достижения поставленной цели сформулированы **следующие задачи**:

1. Провести экспериментальное исследование фактической разнотолщинности эллиптических горячештампованных днищ различного сортамента, изготавливаемых на предприятии ПАО «Уралхиммаш».
2. Получить закономерности изменения толщины стенки для различных групп сталей и режимов обработки.

3. Разработать трехмерную компьютерную модель процесса горячей штамповки эллиптического днища с использованием метода конечных элементов и провести моделирование в программном комплексе DEFORM-3D.

4. Разработать рекомендации, направленные на совершенствование существующего технологического процесса изготовления горячештампованных днищ с целью снижения их металлоемкости, энергоемкости и трудоемкости процесса изготовления.

Научная новизна работы

- получены новые закономерности изменения толщины стенки эллиптических днищ при горячей штамповке для различных групп сталей, при различных режимах обработки в результате анализа экспериментальных данных;
- разработана трехмерная компьютерная модель процесса горячей штамповки эллиптических днищ, проведен анализ показателей напряженно-деформированного состояния металла по объему днищ;
- предложена иерархическая структура единичных показателей качества днищ, проведена оценка их качества с помощью комплексных показателей.

Теоретическая значимость работы заключается в результатах компьютерного моделирования процесса горячей штамповки эллиптических днищ, которые расширяют знания об этом виде обработки давлением; в получении регрессионных зависимостей распределения изменения толщины стенки горячештампованных днищ по их образующим.

Практическая значимость работы состоит в формулировке рекомендаций по расчету толщины стенки днищ из различных сталей, разработке мероприятий по рационализации процесса горячей штамповки эллиптических днищ с целью снижения их металлоемкости, а также методов исследования качества указанных изделий, что подтверждается актом внедрения ПАО «Уралхиммаш».

Методология и методы исследования

В экспериментальной части работы для исследования изменения толщины стенки днищ при горячей штамповке использован метод ультразвуковой толщинометрии. Для обработки полученных данных использованы традиционные методы математической статистики.

В теоретической части использован современный метод решения прикладных задач обработки металлов давлением – метод конечных элементов, реализованный в программном комплексе DEFORM-3D.

Для оценки качества горячештампованных эллиптических днищ применены современные методы квалиметрии.

Положения, выносимые на защиту.

1. Закономерности изменения толщины стенки днищ при штамповке в зависимости от группы стали, режимов обработки.
2. Трехмерная компьютерная модель процесса горячей штамповки эллиптического днища.
3. Методика комплексной оценки качества горячештампованных эллиптических днищ с использованием принципов квалиметрии.

Степень достоверности результатов работы в экспериментальной части подтверждена применением современных средств измерений и методов статистической обработки полученных данных, сравнением с известными аналогами из технической литературы.

В теоретической части – экспериментальной проверкой результатов вычислительного эксперимента.

Апробация результатов работы.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах:

- V Российская научно-техническая конференция «Ресурс и диагностика материалов и конструкций», г. Екатеринбург, ИМАШ УрО РАН, 2009;

- VI Российская научно-техническая конференция «Ресурс и диагностика материалов и конструкций», г. Екатеринбург, ИМАШ УрО РАН, 2011;
- X Международная научно-техническая конференция «Авиамашиностроение и транспорт Сибири», ИРННТУ, Иркутск, 2018;
- XIX Международная научно-техническая конференция «Уральская школа-семинар металлосведов-молосдых ученых», УрФУ, Екатеринбург, 2018;
- Научно-практический семинар студентов, аспирантов и соискателей кафедры «Обработка металлов давлением» ИНМиТ УрФУ «Метосды вычислительного (на математических и компьютерных моделях) физического и промышленного экспериментов и эффективное использование их для исследования технологических процессов», УрФУ, Екатеринбург, 2018.

Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 3-х статьях, опубликованных в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

1 СОСТОЯНИЕ ПРОИЗВОДСТВА ГОРЯЧЕШТАМПОВАННЫХ ЭЛЛИПТИЧЕСКИХ ДНИЩ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)

1.1 Требования к конструкции, материалу и качеству эллиптических днищ.

Требования нормативной документации

1.1.1 Конструкция эллиптических днищ

Для эллиптических днищ меридиональную кривую выполняют по полуэллипсу. У края днища поверхность эллипсоида переходит в цилиндрический борт. Борт необходим для того, чтобы изгибающие моменты, возникающие в месте соединения днища с обечайкой корпуса аппарата, воздействовали на цельный металл, а не на сварной шов. Воздействие изгибающих моментов на сварной шов нежелательно, и поэтому его располагают вне напряженной зоны - переносят в сечение, удаленное от края, в котором изгибающие моменты малы.

Эллиптические днища имеют преимущественное применение в сосудах и аппаратах, т.к. по форме они более выгодны в прочностном отношении. Распределение напряжений в них более равномерное вследствие постепенного и непрерывного изменения радиусов кривизны в направлении от центра к краю [5-7].

Радиус кривизны в любой точке А эллипса - рисунок 1.1:

$$\rho = \left(\frac{D_6}{2}\right)^2 \times H^2 \times \left[\frac{x^2}{\left(\frac{D_6}{2}\right)^2} + \frac{y^2}{H^4} \right]^{\frac{3}{2}}, \quad (1)$$

где x и y – координаты заданной точки.

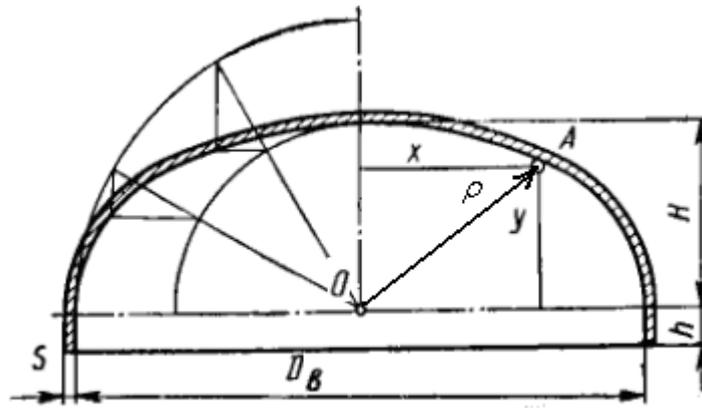


Рисунок 1.1 – К формуле по расчету радиуса кривизны эллиптического днища

Форма и размеры эллиптических днищ для сосудов и аппаратов регламентированы ГОСТ 6533 [8]. Допускаются другие базовые диаметры эллиптических днищ при условии, что высота выпуклой части равна не менее 0,25 внутреннего диаметра днища. Согласно ГОСТ 6533 [8], различают:

- днища с наружными базовыми размерами и высотой эллиптической части

$h_n = 0,25 \times D_n$ - рисунок 1.2, а;

- днища с внутренними базовыми размерами и высотой эллиптической части

$h_e = 0,25 \times D_e$ - рисунок 1.2, б.

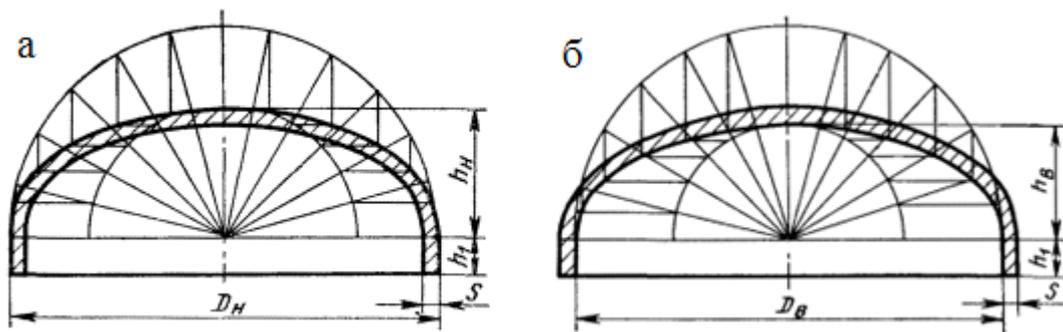


Рисунок 1.2 – Форма эллиптических днищ с наружными (а) и внутренними (б) базовыми размерами

Днища малых диаметров $\varnothing 133 - 1420$ мм предназначены для присоединения к трубам, поэтому для них, как и для труб, номинальным базовым размером является наружный диаметр. Днища диаметром $\varnothing 250 - 4500$ мм (и более)

предназначены для присоединения к цилиндрическим корпусам различных аппаратов, поэтому для них, как и для аппаратов, номинальным базовым размером является внутренний диаметр.

Днища допускается изготавливать из штампованных лепестков и шарового сегмента. Количество лепестков не регламентируется.

По конструктивно-технологическим признакам эллиптические днища могут быть классифицированы [9]:

1) По размерам: малогабаритные ($D_{\text{дн}} < 300$ мм), среднегабаритные ($D_{\text{дн}} = 300 \div 1000$ мм), крупногабаритные ($D_{\text{дн}} > 1000$ мм).

2) В зависимости от относительной толщины стенки $S_{\text{отн}} = \frac{S_{\text{заг}}}{D} \times 100$ ($S_{\text{заг}}$ - толщина заготовки, D - диаметр днища): особо толстостенные $S_{\text{отн}} > 10,0$; толстостенные $S_{\text{отн}} = 10,0 \div 5,0$; среднестенные $S_{\text{отн}} = 5,0 \div 1,5$; тонкостенные $S_{\text{отн}} = 1,5 \div 0,15$; особо тонкостенные $S_{\text{отн}} < 0,15$.

3) По варианту исполнения днища бывают цельноштампованные и штампосварные. В данной работе рассматриваются цельноштампованные днища.

4) По точности: особо точные, повышенной точности, нормальной точности, пониженной точности.

1.1.2 Исполнительная толщина стенки днища

Исполнительная толщина стенки является результатом прочностного расчета эллиптического днища. Номинальная толщина стенки должна приниматься по расчетной толщине стенки с учетом прибавок с округлением до ближайшего большего размера, имеющегося в сортаменте толщин соответствующих полуфабрикатов – листов.

Обоснование всех прибавок к расчетным толщинам должно быть приведено в технической документации – в расчетах на прочность, прилагаемых к паспорту на изделие.

На рисунке 1.3 приведена расчетная схема эллиптического днища согласно ГОСТ 34233.2 [10].

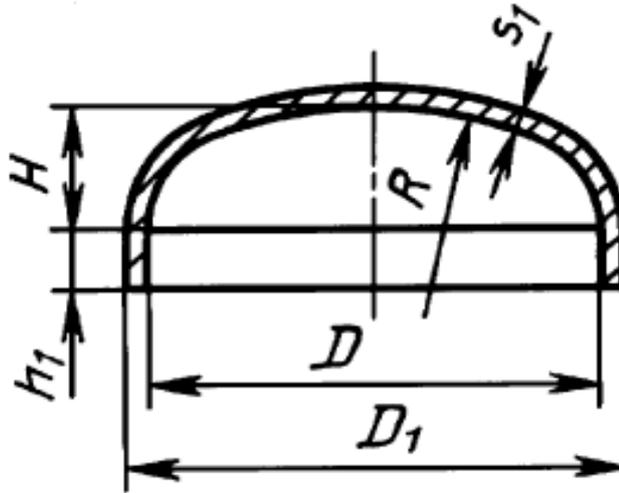


Рисунок 1.3 – К формуле по расчету толщины стенки эллиптического днища

Толщину стенки днища, нагруженного внутренним избыточным давлением, вычисляют по формуле:

$$s_1 \geq s_{1p} + c, \quad (2)$$

где s_{1p} - расчетная толщина стенки днища; c - сумма прибавок к расчетной толщине.

Расчетную толщину стенки днища определяют в его вершине, где поверхность имеет наибольший радиус кривизны:

$$s_{1p} = \frac{p \times R}{2 \times \varphi \times [\sigma] - 0,5 \times p}, \quad (3)$$

где R - радиус кривизны в вершине днища, для эллиптических днищ с высотой выпуклой части $H = 0,25 \times D$: $R = D$; p - расчетное внутреннее избыточное давление; $[\sigma]$ - допускаемое напряжение при расчетной температуре; φ - коэффициент прочности сварного шва.

Прибавку к расчетным толщинам вычисляют по формуле:

$$c = c_1 + c_2 + c_3, \quad (4)$$

где c_1 - прибавка для компенсации коррозии и эрозии, назначается с учетом условий эксплуатации, расчетного срока службы (лет), скорости коррозии

(мм/год), при двухстороннем контакте с коррозионной средой данная прибавка соответственно, должна быть увеличена; C_2 - прибавка для компенсации минусового допуска проката, принимается по предельному минусовому отклонению толщины стенки листа, установленному стандартами или техническими условиями на прокат; C_3 - прибавка для компенсации утонения стенки при технологических операциях.

Прибавка C_3 принимается по данным предприятия изготовителя - на основании его опыта, практики.

Прибавки C_2 и C_3 учитывают в тех случаях, когда их суммарное значение превышает 5% номинальной толщины листа.

При расчетах на прочность учитывается утонение в средней части эллиптического днища на площади, определяемой от центральной точки днища по внутренней поверхности, величиной радиуса, равного $\sqrt{(D_e + S) \times S}$ [11], где D_e - внутренний диаметр; S - исполнительная толщина листа заготовки днища. Утонение в зоне отбортовки не учитывается, если не превышает 15% исполнительной толщины листа [12]. С точки зрения прочностных расчетов, распределение и величина суммарного напряжения, действующего в зоне отбортовки, при нагрузке давлением выпуклого днища, не являются критическими [13].

1.1.3 Материал для изготовления днищ

Марки материалов для изготовления днищ должны соответствовать требованиям ГОСТ 34347 [14].

При применении некачественного или несоответствующего нормативной документации проката возможно возникновение различных дефектов поверхности, размеров и формы днищ.

Перед изготовлением материал заготовок днищ следует проверять по химическому составу, механическим свойствам, размерам, состоянию

поверхности заготовок. Листовой прокат, предназначенный для изготовления заготовок днищ, должен быть термически обработан, выправлен по плоскости. В особых случаях проверяется способ выплавки металла листа.

Листы подвергают ультразвуковому контролю для выявления внутренних дефектов проката – плен, закатов, расслоений, трещин, наличия неметаллических включений.

Для изготовления эллиптических днищ применяют цельные заготовки, или сварные из частей с расположением сварных швов в соответствии с требованиями ГОСТ 34347 [14]. Сварные соединения заготовки перед штамповкой подвергаются неразрушающему контролю.

Поверхности вырезанной заготовки должны быть очищены от грата, брызг металла, образованных в результате термической резки и сварки, острые кромки заготовки притуплены, заусенцы удалены, сварной шов зачищен заподлицо с основным металлом с обеих сторон заготовки.

1.2 Разработка технологического процесса горячей штамповки эллиптических днищ

В условиях серийного производства эллиптические днища изготавливаются вытяжкой в штампах на гидравлических прессах с предварительным нагревом исходной заготовки перед деформацией [15-19].

Разработка технологического процесса горячей штамповки эллиптических днищ предполагает необходимость выбора или расчета большого числа параметров [20-23]:

- определение основных и вспомогательных операций и последовательности их выполнения, начиная с подготовки листа для штамповки и заканчивая разметкой штампованной заготовки для обработки борта;

- расчеты размеров и конфигурации заготовки, количества переходов вытяжки, силовых параметров штамповки (сил штамповки и прижима заготовки с учетом реальных температурных полей и зазоров между инструментами);

- определение температурного режима нагрева заготовок под штамповку, введение по необходимости дополнительных операций с учетом изменения температуры заготовки при ее переносе и установке в штамп, при штамповке и ее последующем охлаждении;

- расчет и конструирование штампов, шаблонов для контроля формы, вспомогательных устройств, приспособлений;

- подбор прессового оборудования.

На практике, проектируя технологические процессы листовой горячей штамповки, опираются на результаты фундаментальных исследований, представленных в трудах Мошнина Е.Н., Любченко А.А., Мельникова Э.Л., Лукьянова В.П., Абдеева Р.Г., Козлова Ю.И., Горохова Е.Д., Шевелкина Б.Н. и др.

Технология изготовления горячештампованных эллиптических днищ должна обеспечивать:

- размеры и форму в соответствии с требованиями нормативной документации;

- необходимый уровень механических свойств металла, указанный в стандартах или технических условиях на материал.

1.2.1 Конструкция штампов для штамповки эллиптических днищ

Штамп для изготовления эллиптических днищ – инструмент многократного применения, работает при повышенных температурах, испытывает большие напряжения, вызываемые деформирующими силами. Оснастка для штамповки днищ металлоемкая и дорогостоящая.

Для штамповки эллиптических днищ широко применяют гидравлические прессы простого и двойного действия.

На рисунках 1.4 и 1.5 представлены типовые конструкции штампов и схемы штамповки эллиптических днищ на прессе простого действия и на прессе двойного действия.

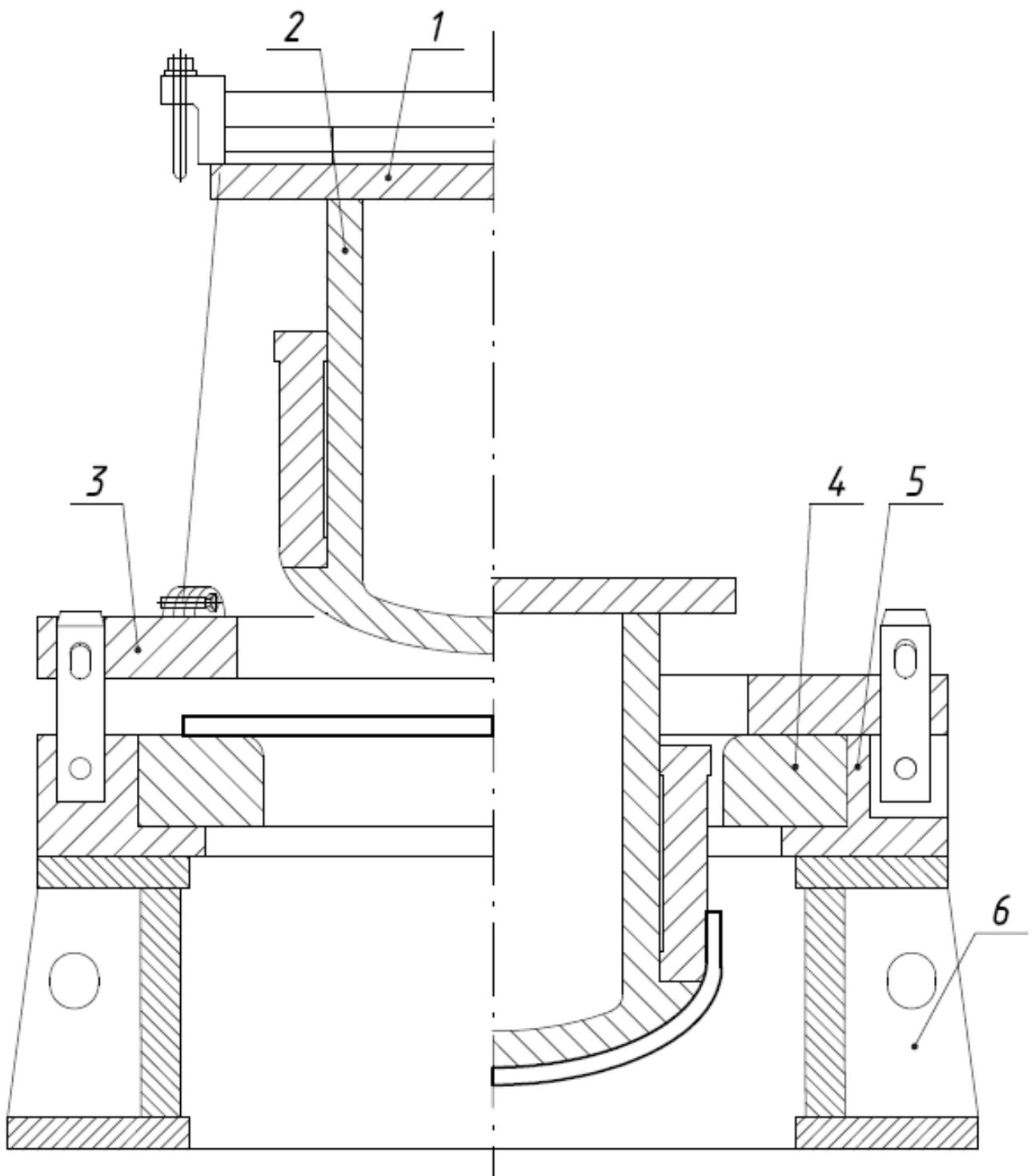


Рисунок 1.4 – Типовая конструкция штампа и схема штамповки эллиптического днища на прессе простого действия: 1 – верхняя плита штампа, 2 – пуансон разъемной конструкции (закрепляется к ползуну прессы), 3 – прижимное кольцо (подвешивается на цепи к верхней плите прессы), 4 – сменное кольцо, 5 – матрица, 6 – стойки

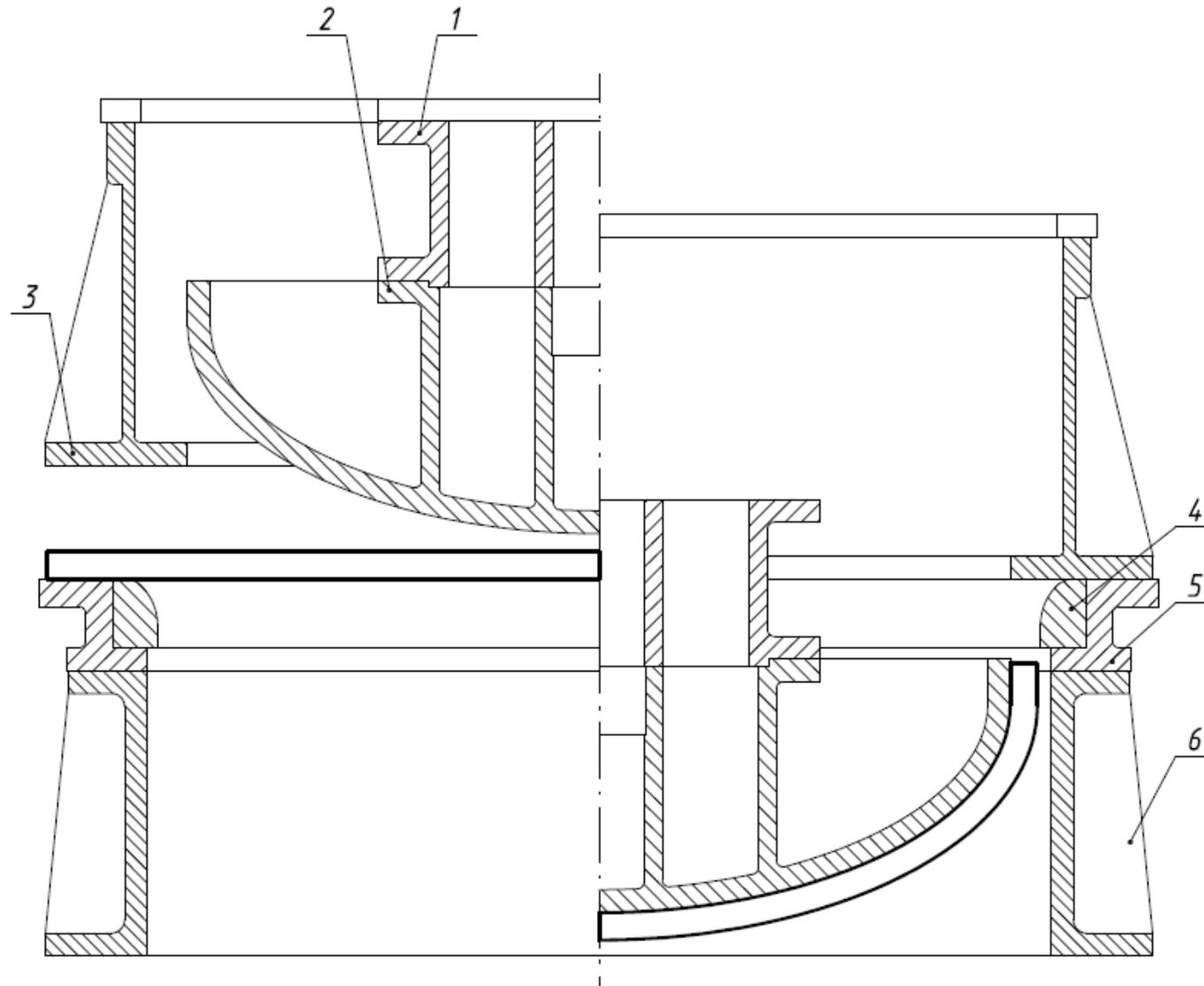


Рисунок 1.5 – Типовая конструкция штампа и схема штамповки эллиптического днища на прессе двойного действия: 1 – пуансонодержатель, 2 – пуансон цельной конструкции (закрепляется через пуансонодержатель к ползуну прессы), 3 – прижим (закрепляется к траверсе прессы), 4 – сменное кольцо, 5 – матрица, 6 – стойки

При штамповке днище формируется по рабочим поверхностям пуансона и сменного кольца.

Штампы для штамповки эллиптических днищ выполняют преимущественно литыми или сварно-литыми. Детали, воспринимающие растягивающие и изгибающие нагрузки, изготавливают из инструментальной стали, а детали, работающие на сжатие, изготавливают также из серого или высокопрочного чугуна. В отдельных случаях, детали штампа могут быть сварными из толстолистного материала. Иногда, по производственной необходимости, наиболее тяжелые детали штампа выполняют скрепленными болтами или сварными из нескольких литых деталей.

Пуансоны изготавливают разъемной конструкции или цельными. Пуансоны разъемной конструкции имеют преимущественное применение, т.к. облегчается съём днища по окончании штамповки. В конце хода пуансона вниз, после окончания формообразования днища, фланец пуансона упирается в сменное кольцо – матрицу, и он выдвигается из днища. Благодаря этому, штампованное днище не удерживается на пуансоне и падает вниз. Разъемная конструкция пуансона была разработана и впервые применена на заводе ПАО «Уралхиммаш» [1, 24-26].

Конструкция штампов определяется следующими факторами технологического процесса:

- размеры и форма исходной и штампованной заготовки днища;
- способ штамповки – совмещенное или отдельное проведение переходов при штамповке за несколько переходов;
- необходимость дополнительного предупреждения появления дефектов - чрезмерных местных утонений, складок, вогнутостей, выпуклостей и перекосов, фестонов;
- конструкция и технические характеристики прессы.

Существуют общие задачи, которые необходимо решать при конструировании штампов. Они относятся как непосредственно к конструкции штампов, так и технологии, например, установка заготовки в штамп и ее

центрирование, удаление штампованной заготовки из штампа, складирование заготовок.

Для удобства смены штампов и их центрирования на столе и ползуне прессы необходимо предусматривать для подъема и транспортировки краном крюки, бобышки, рым-болты или отверстия в ребрах, а для центрирования – соответствующие риски или в некоторых случаях сухари-шпонки [1].

В связи с большим количеством типоразмеров днищ при небольших партиях, а также высокой стоимостью штамповой оснастки, с целью уменьшения материальных, трудовых затрат и сроков подготовки производства заводы изготавливают стандартизированную оснастку, в которой штампуют днища из разных сталей и сплавов.

Для каждого диаметра днища с внутренними базовыми размерами разрабатывается один унифицированный штамп, в котором для каждой толщины изготавливается свое сменное кольцо, а остальные детали штампа являются постоянными.

В штампах для горячей штамповки размеры рабочей поверхности пуансона устанавливают с учетом температурной усадки штампованной заготовки при остывании. Величина усадки зависит от марки металла. При этом, как правило, на заводах химического и нефтяного машиностроения линейные размеры пуансона принимают с учетом температурной усадки днищ, характерной для группы углеродистых и низколегированных сталей, то есть равной 1%.

Внутренний диаметр сменного кольца принимается равным диаметру пуансона, увеличенному на две толщины S заготовки и на два гарантированных зазора между заготовкой и стенкой сменного кольца – $(0,05...0,2) \times S$ на сторону. Чем больше толщина заготовки, тем больше принимают гарантированный зазор [1, 24, 27-29].

Недостаточный зазор между пуансоном и матрицей увеличивает силу вытяжки, и может привести к разрушению заготовки или значительному местному утонению, такой зазор приводит к увеличению сил трения между

материалом заготовки и сменным кольцом и способствует образованию задиров на его поверхности. Завышенный зазор способствует появлению вогнутостей, выпуклостей на эллиптической части днища, гофр на цилиндрической части, увеличенному наклону борта, что значительно снижает точность днища.

Скругление рабочей кромки сменного кольца должно быть достаточно большим. По конструктивным соображениям радиус скругления сменного кольца принимается $R_{с.м.к.} = (3...4) \times S$, а для особо толстостенных днищ (толщиной стенки более 40 мм) - $R_{с.м.к.} = (2...2,5) \times S$.

С целью уменьшения утонения стенки днища в отдельных случаях этот радиус можно увеличить до $R_{с.м.к.} = (6...8) \times S$. Однако при большом радиусе скругления сменного кольца может возникнуть складкообразование на кромке днища при выходе ее из прижима в конце вытяжки, а также образование вогнутостей, выпуклостей, поэтому применение сменных колец с большими радиусами скругления ограничено [1].

Для повышения износостойкости, поверхностной твердости сменных колец при изготовлении их рабочая поверхность подвергается закалке. При ремонте рабочая поверхность изношенных пуансонов и сменных колец наплавляется, затем обрабатывается на станке.

В процессе вытяжки днищ возможно образование таких дефектов, как гофры (волнистость на цилиндрической части днища) и радиальных вогнутостей, выпуклостей, исправление которых повышает трудоемкость изготовления днищ и увеличивает цикл сборки аппаратуры. Для предупреждения указанных дефектов фланцевую часть заготовки к матрице необходимо прижимать определенной силой прижима. На прессах простого действия заготовку прижимают специальным кольцом с помощью струбцин или клиньев (рисунок 1.4), на прессах двойного действия прижим крепится к траверсе пресса (рисунок 1.5). При штамповке тонкостенных днищ применение прижима обязательно [16, 30-33].

Предельные размеры заготовки, из которой могут быть получены днища вытяжкой без прижима, устанавливаются исходя из устойчивости заготовки во фланце.

Для определения предельной возможности получения эллиптических днищ вытяжкой без прижима в холодном или горячем состоянии рекомендована зависимость [1]:

$$\left(\frac{D_{заг.}}{S}\right)_{пр} = \frac{1,05 \times \frac{D_{заг.}}{D_{с.м.к.}} \times \left(5,5 + \frac{r_{с.м.к.}}{S}\right)}{\frac{D_{заг.}}{D_{с.м.к.}} - 1,09}, \quad (5)$$

где $D_{заг.}$ - диаметр заготовки днища; $D_{с.м.к.}$ - внутренний диаметр сменного кольца; $r_{с.м.к.}$ - радиус скругления сменного кольца; S - толщина заготовки днища.

Прижим должен развивать равномерную силу на заготовке, чтобы он не мог быть приподнят краем заготовки при вытяжке. Заготовка давит на прижим вследствие образования складок и действия изгибающего момента, возникающего от изгиба заготовки на скруглении сменного кольца.

С целью продления срока службы штамповой оснастки и обеспечения стабильности качества штампуемых на ней днищ, необходим регулярный уход, своевременный ремонт, обеспечение соответствующих условий хранения оснастки.

1.2.2 Расчет заготовки эллиптического днища

Существует три способа определения размеров плоской заготовки [34, 35]:

- аналитический, включающий следующие методы: равенства площадей поверхностей, равенства объемов, равенства весов;
- графический – методы графоаналитический и графический;
- практический, включающий методы практического моделирования и натурального опыта.

При этом ни одна из методик расчета не обеспечивает возможность учета всех факторов, влияющих на заготовку в процессе вытяжки. В связи с этим, расчетные данные, как правило, требуют опытной проверки и корректировки.

Формула для определения диаметра развертки эллиптических днищ с внутренними базовыми размерами и отношением $\frac{D_e}{h_e} = 4$ [36, 37] по равенству площадей поверхностей:

$$D_p = 2 \times \sqrt{(D_e + S) \times [h_1 + 0.345 \times \xi_e \times (D_e + S)]}, \quad (6)$$

где ξ_e - аналитический коэффициент, учитывающий погрешность за счет изменения отношения $\frac{a_1}{b_1}$ эллипса, его величина зависит от отношения $\frac{D_e}{S}$.

У штампованных заготовок днищ на кромке предусматривают припуск для удаления металла с торца, т.к. на данном участке концентрируются основные дефекты в виде глубоких неровностей (гофр), фестонов, ризок, и на случай возможного перекоса борта.

Величина технологического припуска под штамповку зависит от относительной толщины стенки днища, определяется из практики. Припуск для заготовки толстостенных днищ назначается меньшей величины относительно тонкостенных днищ.

Величина возможного перекоса заготовки при штамповке зависит от ряда причин - условий центрирования заготовки перед штамповкой, диаметра днища, неравномерного зазора между пуансоном и сменным кольцом, величины допуска на диаметр вырезанной заготовки, неравномерности нагрева заготовки в печи и неравномерного нанесения смазки на рабочей поверхности матрицы, неравномерного прижима [27].

1.2.3 Расчет количества переходов вытяжки

Основным фактором при выборе числа переходов является наибольшее использование пластических свойств материала, однако с таким расчетом, чтобы при штамповке напряжение в материале не превосходило его временного

сопротивления, не было больших утонений в готовом изделии, потери устойчивости заготовки во время деформации [20, 34].

В общем, явление потери устойчивости у днищ проявляется в виде вогнутостей, выпуклостей на эллиптической части, образования волнистости или складок на цилиндрической части.

Как правило, тонкостенные днища изготавливаются в два-три перехода. На первом переходе штамповки формируется центральная часть днища – вершина, на втором, третьем переходах формируется остальная часть днища.

При использовании оснастки с перетяжным порогом, возможно формирование тонкостенных днищ за один переход [38-40].

При штамповке днищ с повышенной точностью дополнительно вводится операция калибровки.

1.2.4 Расчет силовых параметров процесса штамповки

Основным силовым параметром штамповки является наибольшая сила вытяжки. В процессе штамповки сила вытяжки резко изменяется и достигает максимума при повороте кромок заготовки на 70° [2]. Эксперименты показали, что максимальная сила вытяжки наблюдается приблизительно в тот момент, когда линия перехода от цилиндрической к эллиптической части пуансона находится на уровне центра радиуса скругления рабочей кромки матрицы, т.е. когда наблюдается минимальный зазор между матрицей и пуансоном [36].

Формула для расчета требуемой силы вытяжки, предложенная Е.Н. Мошниным [2]:

$$P = C_1 \times (D_{заг} - C_2 \cdot D_{с.м.к.}) \times S \cdot \sigma_\epsilon, \quad (7)$$

где $D_{заг}$ - диаметр заготовки днища; $D_{с.м.к.}$ - внутренний диаметр сменного кольца; C_1 и C_2 - коэффициенты, при $\frac{D_{заг}}{D_{с.м.к.}} = 1,3 \div 1,6$ $C_1 = 1,5$, $C_2 = 0,6$; S - толщина заготовки днища; σ_ϵ - временное сопротивление материала днища при температуре штамповки.

Формула для расчета требуемой силы вытяжки, рекомендуемая СТО 00220256-001 [41], в зависимости от коэффициента вытяжки:

$$P = \pi \cdot \bar{D}_{\text{дн}} \cdot S \cdot \sigma_{\text{в}} \cdot n, \quad (8)$$

где $\bar{D}_{\text{дн}}$ - средний диаметр днища; S - толщина заготовки днища; $\sigma_{\text{в}}$ - временное сопротивление материала днища при температуре штамповки; n - поправочный коэффициент, который зависит от коэффициента вытяжки.

Формула для расчета требуемой силы вытяжки, рекомендуемая СТО 00220256-001 [41], в зависимости от наличия прижима и радиуса скругления рабочей кромки сменного кольца:

$$P = a \cdot \pi \cdot \bar{D}_{\text{дн}} \cdot S \cdot \sigma_{\text{в}} \cdot b, \quad (9)$$

где $\bar{D}_{\text{дн}}$ - средний диаметр днища; S - толщина заготовки днища; $\sigma_{\text{в}}$ - временное сопротивление материала днища при температуре штамповки; a - коэффициент, зависящий от способа вытяжки ($a = 0,4$ при вытяжке с прижимом, $a = 0,2$ - при вытяжке без прижима); b - коэффициент, учитывающий влияние радиуса скругления рабочей кромки сменного кольца $R_{\text{см.к.}}$.

По данным [1], которые примерно согласуются с данными ряда исследований, минимальное напряжение прижима:

$$q_{\text{пр}} = 0,01 \times \sigma_T, \quad (10)$$

где σ_T - предел текучести материала заготовки.

Соответственно, минимальная требуемая сила прижима заготовки:

$$P_{\text{пр}} = 0,01 \times \sigma_T \times F_{\text{заг.}}, \quad (11)$$

где $F_{\text{заг.}}$ - площадь поверхности заготовки, находящейся под прижимом.

Вытяжкой с прижимом с указанным значением можно получать днища из заготовок с соотношением $\frac{D_{\text{заг.}}}{S} = 220$, где $D_{\text{заг.}}$ - диаметр заготовки днища, S - толщина заготовки днища.

В соответствии с СТО 00220256-001 [41] силу прижима рекомендуется принимать примерно 30% от требуемой силы вытяжки.

Недостаточный прижим приводит к образованию гофров и вогнутостей, выпуклостей, завышенная сила прижима может привести к значительному утонению стенки днища и ее разрыву. Величина требуемой силы прижима зависит от многих факторов: радиуса скругления рабочей кромки сменного кольца, зазора между пуансоном и матрицей, вида применяемой смазки, механических свойств штампуемого материала, конструкции штампа [1, 16].

1.2.5 Режим нагрева заготовки под штамповку

С целью повышения пластичности металла и снижения его сопротивления деформированию, заготовку днища перед штамповкой нагревают.

Нагрев заготовки днища перед штамповкой является важным звеном технологического процесса изготовления штамповок, т.к. оказывает существенное влияние на их качество, себестоимость, на производительность деформирующего оборудования.

Режим нагрева металла под штамповку определяется температурой начала штамповки и временем выдержки заготовки в печи, которые зависят от химического состава стали и ее физических свойств (теплопроводность, теплоемкость и другие). Скорость нагрева заготовок не регламентируется и определяется мощностью нагревательной печи (согласно СТО 00220256-001 [41]). Для ряда специальных сталей регламентирована температура посадки заготовки в печь.

Нагревательные печи должны обеспечивать равномерность прогрева заготовок по сечению и площади поверхности в пределах заданного температурного интервала за регламентируемое время выдержки с наименьшей потерей металла на окалину.

Нагрев заготовок под штамповку осуществляют на стойках, устанавливаемых на подину нагревательной печи, что обеспечивает более равномерный нагрев заготовки по всей поверхности. Допускается нагревать

одновременно несколько заготовок – в стопе, при этом между заготовками должны быть уложены прокладки – для циркуляции горячего воздуха печи.

Количество заготовок в садке и их расположение определяют, исходя из габаритов печи, расположения горелок, толщины нагреваемых заготовок, исключения вероятности перегрева, пережога заготовок и экономической целесообразности.

Контроль температуры нагрева листовых заготовок в печи, как правило, производят пирометрами.

1.3 Основные этапы штамповки эллиптических днищ

Перед закреплением штампа на прессе, рабочие поверхности деталей штампа осматривают на предмет отсутствия дефектов поверхности, очищаются от грязи, старой смазки и окалины, все наплывы и задиры металла на оснастке должны быть зачищены.

После настройки штампа на прессе на рабочие поверхности пуансона, прижимного и сменного кольца наносят смазку. Смазка при горячей штамповке должна обеспечивать высокое качество поверхности штампованного изделия, уменьшать трение между заготовкой и рабочими поверхностями пуансона и матрицы, предотвращать налипание металла на инструмент, износ оснастки [42]. Смазка должна быть однородна по составу, не содержать твердых включений, быть бездымной, негорючей, жаростойкой – не терять смазочных свойств при высоких температурах, безопасной для рабочих и окружающей среды [43]. Немаловажными факторами при выборе смазки являются: метод ее приготовления, нанесения на оснастку, удаления с штампованной заготовки [44]. Для горячей штамповки эллиптических днищ для смазки оснастки на ПАО «Уралхиммаш» применяют смесь графита серебристого кристаллического ГЛ-2 (ГОСТ 5279 [45]) с маслом индустриальным, марка 45 (ГОСТ 1707 [46]).

Составы и результаты исследования жаростойких смазок, рекомендуемых для применения при горячей листовой штамповке, приведены в трудах [43, 47].

Загрузку заготовок в нагревательную печь производят по достижении температуры печи, соответствующей температуре начала штамповки, затем прогревают печь и заготовку до температуры начала штамповки и выдерживают заготовку при этой температуре в течение расчетного времени.

По окончании выдержки заготовку выгружают из печи, укладывают на матрицу, центрируют. После прижима заготовки, под действием главного цилиндра прессы опускают ползун с закрепленным на нем пуансоном, деформируют заготовку в эллиптическое днище.

Штампованное днище удаляют из штампа и транспортируют на отведенное место для остывания.

В процессе транспортировки заготовки от печи к прессу, центрирования заготовки на матрице, при деформации металл остывает. Важно завершить обработку при определенной температуре, т.к. это определяет структуру и механические свойства изделий [48].

На практике с целью обеспечения окончания штамповки при заданной температуре нагрев заготовки производят по верхнему пределу температурного режима. Также температуру окончания штамповки следует повышать путем сокращения времени передачи заготовки от печи к прессу, применением средств механизации труда, подогрева штамповой оснастки. Если данные мероприятия не являются эффективными, то, руководствуясь требованиями нормативной документации, может быть введен дополнительный переход штамповки. При окончании штамповки ниже температуры, регламентируемой нормативной документацией, днище после штамповки подвергают термической обработке.

Применение теплоизоляционных покрытий, наносимых на поверхность заготовки, имеет особо важное значение при штамповке тонкостенных заготовок и заготовок из нержавеющей и жаропрочных сталей.

На ряде заводов при горячей штамповке крупногабаритных днищ из специальных сталей успешно применяется покрытие, состоящее из талькового порошка и ряда других компонентов. Впервые это покрытие в производственных условиях при штамповке крупногабаритных листовых деталей было освоено на

заводе ПАО «Уралхиммаш». Покрытие наносят на заготовку перед загрузкой в печь, которое также служит смазкой [1].

При штамповке толстостенных днищ перед деформацией необходимо обязательно удалять окалину, образовавшуюся в процессе нагрева заготовки в печи. Наиболее простым, широко применяемым на заводах средством для удаления окалина является использование сжатого воздуха и скребков. Нагретую заготовку укладывают на матрицу, легким нажатием пуансона деформируют заготовку на небольшую величину $\approx 300\text{...}350$ мм. Окалина растрескивается и отстает от поверхности заготовки и скатывается к ее центру, ее извлекают скребками или сдувают сжатым воздухом [34].

Только после удаления окалина приступают к штамповке днища.

1.4 Контроль качества горячештампованных эллиптических днищ

Каждое штампованное днище подвергают визуально-измерительному контролю. Все применяемые средства измерения должны быть исправны и иметь действующую дату поверки (калибровки).

Предельные отклонения размеров и формы эллиптических днищ устанавливаются ГОСТ 34347 [14]. Отклонения размеров и формы днищ (рисунок 1.6) не должны превышать значений, указанных в таблицах 1.1, 1.2, 1.3.

Отклонения размеров и формы эллиптических днищ зависят от многих факторов: физико-механических свойств материала штампуемой заготовки; отклонения толщины заготовки; отклонения размеров пуансона и матрицы, величина их износа и состояние рабочих поверхностей; температурно-временных режимов технологической операции; степени отработки технологии выполнения штамповочных работ, а также состояния нагревательного и прессового оборудования [29, 49].

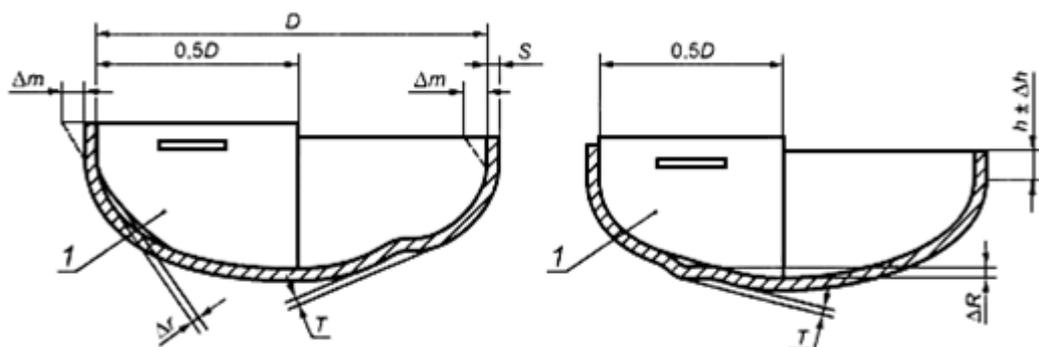


Рисунок 1.6 -Отклонения размеров и формы днищ

Таблица 1.1 – Допуски на высоту цилиндрической части и высоту выпуклости (вогнутости) на эллипсоидной части днища

Диаметр днища D , мм	Предельное отклонение высоты цилиндрической части Δh , мм	Предельная высота отдельной выпуклости или вогнутости на эллипсоидной части T , мм
До 720	± 5	2
От 800 до 1300		3
От 1320 и более		4

Таблица 1.2 – Допуски наклона цилиндрической части

Толщина днища S , мм	Допуски наклона Δm , мм
До 20	4
От 22 до 25	5
От 28 до 34	6
От 36 и более	8

Таблица 1.3 – Допуски формы эллипсоидной поверхности

Диаметр днищ D , мм	Зазор между шаблоном и эллипсоидной поверхностью, мм	
	Δr	ΔR
До 530	4	8
От 550 до 1400	6	13
От 1500 до 2200	10	21
От 2400 до 2800	12	31
От 3000 и более	16	41

Отклонение внутреннего (наружного) диаметра в цилиндрической части отбортованных днищ допускается не более $\pm 1\%$ номинального диаметра. Относительная овальность допускается не более 1%.

Относительная овальность рассчитывается по формуле:

$$a = \frac{2 \times (D_{\max} - D_{\min})}{D_{\max} + D_{\min}} \times 100, \quad (12)$$

где D_{\max} , D_{\min} - наибольший и наименьший внутренние диаметры днища, измеренные в одном поперечном сечении.

Контроль формы готового днища следует проводить шаблоном длиной не менее $l = 0,5 \times D_e$, где D_e - внутренний диаметр днища, зазор между шаблоном и поверхностью днища измеряется цилиндрическим или клиновым щупом. Высоту цилиндрической части следует измерять линейкой по ГОСТ 427 [50].

Внутренний диаметр эллиптического днища определяется путем косвенного измерения, т.е. на основании результатов прямого измерения других физических величин, функционально связанных с диаметром. Внутренний диаметр штампованного эллиптического днища рассчитывается по следующей формуле:

$$D_{\text{вн}} = \frac{C}{\pi} - 2 \cdot S_{\text{ср}}, \quad (13)$$

где C - длина окружности, расположенной на наружной поверхности днища на уровне высоты борта готового днища, измеренная рулеткой по ГОСТ 7502 [51]; $S_{\text{ср}}$ - усредненная фактическая толщина днища.

Фактическая толщина днища измеряется при помощи инструмента - толщиномера типа ТР по ГОСТ 11358 [52] или микрометра типа МК по ГОСТ 6507 [53], или методом ультразвуковой толщинометрии.

На цилиндрической части днища не допускаются гофры высотой более 2 мм. Высота гофры определяется с помощью радиусного шаблона с применением цилиндрического щупа.

На поверхностях днищ не допускаются поверхностные дефекты, если их глубина превышает минусовые предельные отклонения, предусмотренные соответствующими стандартами и техническими условиями.

Контроль качества поверхностей на отсутствие плен, закатов, расслоений, грубых рисок, трещин, снижающих качество и ухудшающих товарный вид, следует проводить путем визуального осмотра, с применением соответствующих средств измерений по необходимости.

Для днищ, изготавливаемых штамповкой, допускается утонение в зоне отбортовки до 15% от исходной толщины заготовки. Контроль толщины стенки днища выполняют методом ультразвуковой толщинометрии.

Сварные соединения заготовки после штамповки подвергаются неразрушающему контролю.

Механические свойства основного металла и сварных соединений горячештампованных днищ должны соответствовать требованиям ГОСТ 34347 [14] и проверяются на образцах разрушающими методами контроля. Заготовки образцов нагревают в печи совместно с заготовкой днища перед штамповкой.

1.5 Факторы, влияющие на изменение толщины стенки эллиптических днищ при горячей штамповке

Изменение толщины стенки горячештампованных днищ происходит как за счет действия совокупности напряжений и деформаций, возникающих в металле заготовки в процессе вытяжки, так и за счет потери части металла на окалину в результате нагрева заготовки в печи перед штамповкой.

1.6.1 Утонение металла днища вследствие деформации

Неравномерность изменения толщины стенки штампованного днища связана со схемой напряженно-деформированного состояния и неравномерностью температурного поля, возникающего из-за охлаждения заготовки на воздухе при переносе ее из печи, установке в штамп, а также вследствие теплообмена между заготовкой и пуансоном во время штамповки [3, 21].

Значительное утонение стенки днища в зоне перехода эллиптической части в борт объясняется тем, что переходная часть значительное время процесса деформирования заготовки при вытяжке не контактирует с поверхностью штампового инструмента. Это приводит к тому, что металл в данной зоне деформируется под действием растягивающих меридиональных напряжений, вызывая утонение стенки. Центральная зона большую часть времени находится в соприкосновении с пуансоном. Возникающие при этом контактные касательные напряжения препятствуют течению металла в меридиональном направлении, поэтому поперечные деформации в данной зоне незначительны. На конечной фазе деформирования на фланце заготовки образуется утолщение и гофры от действия сжимающих окружных напряжений. Суммарная толщина стенки заготовки на фланце превышает величину зазора между пуансоном и матрицей. Возникающие при прохождении торца заготовки через указанный зазор перерезывающие напряжения способствуют значительному возрастанию меридиональных напряжений в переходной части, которые в свою очередь вызывают большие меридиональные и поперечные деформации.

При этом необходимо учитывать, что при горячей вытяжке переходная зона имеет более высокую температуру по сравнению с центральной и фланцевой частями, которые при штамповке контактируют со штамповым инструментом и поэтому охлаждаются более интенсивно. По этой причине металл переходной зоны более податлив деформациям [3].

Утонению металла стенки горячештампованных эллиптических днищ способствуют все факторы, которые увеличивают силу вытяжки, а именно [1, 3, 36, 54-57]:

а) Радиус скругления рабочей кромки матрицы

С увеличением радиуса скругления рабочей кромки сменного кольца сила вытяжки уменьшается, но возможность увеличения радиуса скругления ограничивается тем, что возрастает вероятность образования вогнутостей, выпуклостей на эллиптической части днища, фланцевая часть заготовки в процессе штамповки может быстро выйти из-под прижимного кольца, после чего

начнется складкообразование. Слишком малый радиус скругления рабочей кромки сменного кольца приводит к повышению радиальных растягивающих напряжений вследствие изгиба металла на рабочей кромке.

б) Зазор между пуансоном и матрицей

Зазор между пуансоном и матрицей должен обеспечивать свободное, без принудительного утонения прохождение утолщенной кромки штампованной заготовки. Появление на борту днища складок вызывает увеличение утонения стенки днища, т.к. при прохождении в зазоре между пуансоном и матрицей складки правятся, вследствие чего сила вытяжки возрастает. При недостаточном зазоре сила вытяжки резко возрастает, в таком случае может произойти разрыв штампуемого изделия или изделие будет иметь местное утонение.

в) Трение между деформируемым металлом и оснасткой

Силы трения между рабочей поверхностью сменного кольца и деформируемым металлом, а также между поверхностью прижимного кольца и фланцем заготовки влияют на увеличение радиальных растягивающих напряжений. Для снижения контактного трения необходимо повышать чистоту обработки поверхности сменного кольца и прижима, а также тщательно смазывать оснастку перед штамповкой. Перед штамповкой смазку наносят на рабочую поверхность пуансона, сменного и прижимного кольца. У пуансона смазывают только цилиндрическую часть, чтобы штампованное днище легче снималось.

г) Сила прижима фланца заготовки

С уменьшением силы прижима заготовки деформирующая сила уменьшается, однако при этом появляются благоприятные условия для образования гофров и вогнутостей, выпуклостей. Слишком большая сила прижима вызывает увеличение сил контактного трения между заготовкой и прижимным кольцом и может привести к утонению металла на участке радиуса скругления сменного кольца и отрыву дна.

д) Размер заготовки

Плоские заготовки необходимо выполнять по возможности меньшего диаметра, т.е. устанавливать минимальный припуск на развертку - за счет ужесточения допуска на вырезку заготовки днища, большей точности центрирования заготовки в штампе. Вследствие увеличенной заготовки не только возрастает сила вытяжки, утонение заготовки, вероятность обрыва борта днища, но также возможно заклинивание штампа, из-за невыхода днища из сменного кольца, захват заготовкой борта пуансона.

е) Настройка положения матрицы относительно пуансона

При несоосности матрицы относительно пуансона возможно утонение металла с одной стороны днища, т.е. в том месте, где зазор меньше толщины металла.

1.5.2 Утонение металла днища вследствие потери на окалину

Нагрев заготовки под штамповку в печи и охлаждение штампованного днища на воздухе сопровождается окислением железа металла – поверхность покрывается окалиной.

Окислы, образующиеся во время нагрева заготовки в нагревательных печах, называют первичными или печными – печной окалиной. Окислы, образующиеся в процессе штамповки, а также во время остывания штампованной заготовки на воздухе, называют вторичными или воздушными – воздушной окалиной [43].

Как показывает практика [58], при нагреве заготовки перед штамповкой потери на окисление составляют 1,5-2,0%, а в процессе деформации и охлаждения – до 0,5-0,6% от массы нагреваемого металла.

На скорость окисления, структуру и количество образующейся окалины влияют следующие факторы [58-60]:

- а) длительность окисления;
- б) температура и скорость нагрева и охлаждения металла;
- в) состав атмосферы окисления;
- г) химический состав стали;
- д) состояние поверхности, формы заготовок, их расположение в печи.

1.6 Результаты ранее проведенных исследований изменения толщины стенки днищ при горячей штамповке

1.6.1 Исследования на Барнаульском котельном заводе

В 1960^х гг. в рамках освоения производственной штамповки в условиях Барнаульского котельного завода осуществлялось изучение изменения толщины стенки днищ в результате штамповки.

В публикациях [1, 2] Мошнин Е.Н. описывает результаты исследований на Барнаульском котельном заводе.

На основании результатов вытяжки толстостенных эллиптических днищ с наружным диаметром и толщиной стенки $\varnothing 1040 \times 70$ мм, $\varnothing 1480 \times 90$ мм, $\varnothing 1800 \times 90$ мм построена эпюра относительного утонения стенки эллиптического днища. Днища отштампованы без прижима, с предварительным нагревом заготовки. Толщину штампованных опытных днищ измеряли специальным кронциркулем, предварительно разрезав днища по диаметральной плоскостям.

На рисунке 1.7 представлена эпюра характерного изменения толщины стенки эллиптического днища в меридиональном сечении по сравнению с толщиной заготовки, построенная в результате исследований на Барнаульском котельном заводе.

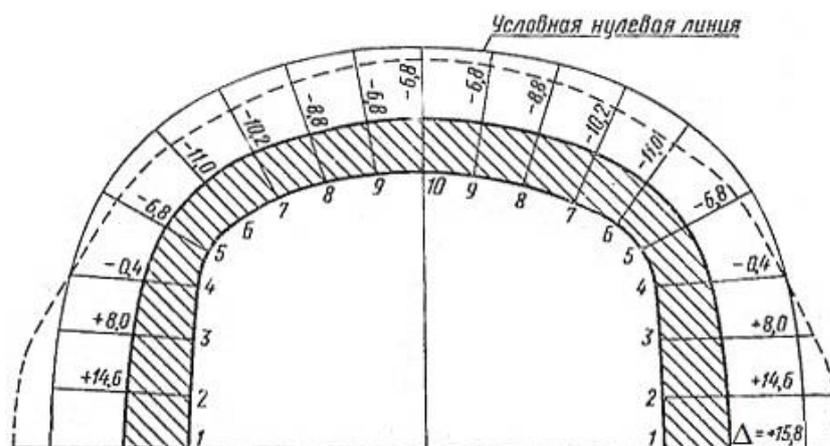


Рисунок 1.7 – Характерное относительное изменение толщины стенки днищ при горячей штамповке (значения изменения толщины указаны в процентах)

Наибольшее утонение эллиптических днищ происходит при повороте стенки на угол, равный примерно 45° , в этом месте утонение достигает 12-15%, в центре днища - 7-10%, при этом борт утолщается до 15% [2].

1.6.2 Исследования на Подольском машиностроительном заводе им. С. Орджоникидзе

Русанов Ю.Н. в статье [61] приводит результаты исследования разнотолщинности горячештампованных эллиптических днищ, штампуемых по технологии Подольского машиностроительного завода им. С. Орджоникидзе из сталей ВСтЗкп, ВСтЗпс, 09Г2С, 16ГС, 22К.

В статье [61] представлены данные и статистический анализ максимального уменьшения толщины штампуемых днищ для трех групп диапазонов внутренних диаметров: 1, 2, 3 - $D_e = 3400, 2110...2600, 1600...1800$ мм соответственно, без указания расположения точек с максимальным утонением стенки днищ.

Неравномерность распределения толщины горячештампованных эллиптических днищ оценивали на днищах из стали 22К с внутренними базовыми размерами $\varnothing 2110 \times 28$ мм, количество измеренных днищ – 2 штуки. Измерения толщины стенки штампованного днища выполнялись ультразвуковым толщиномером по восьми радиальным сечениям ρ_i в четырех горизонтальных сечениях R_i днища согласно рисунку 1.8. Результаты измерений приведены в таблице 1.4.

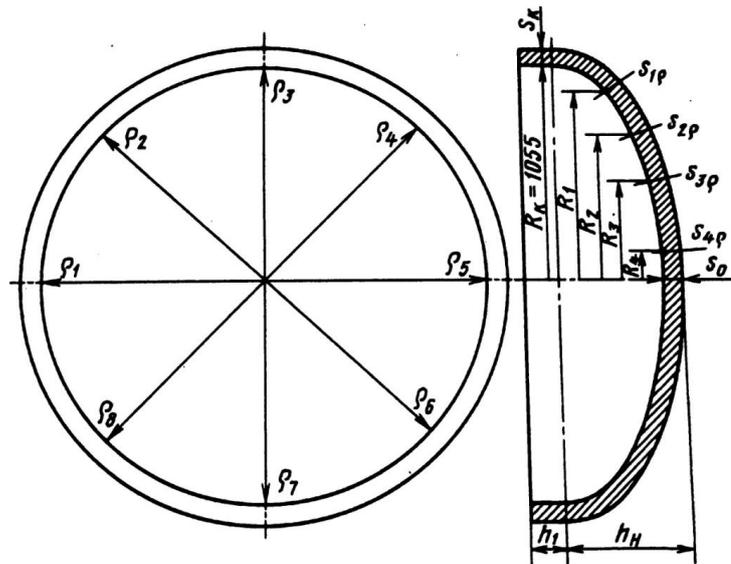


Рисунок 1.8 – Схема измерений толщины штампованного эллиптического днища с внутренними базовыми размерами $\text{Ø}2110 \times 28$ мм

Таблица 1.4 – Результаты измерений распределения толщины эллиптических днищ с размерами $\text{Ø}2110 \times 28$ мм из стали 22К

Номер днища	Радиус сечения R_i , мм	Толщина днища s_i , мм в радиальном сечении ρ_i							
		ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	ρ_6	ρ_7	ρ_8
1	$R_1 = 1900$	28,5	28,5	28,3	28	28	28,2	28,3	28,5
2		27,6	28	27,8	27,6	27,5	27,5	27,7	27,2
1	$R_2 = 1685$	27,9	28	27,9	27,9	27,6	27,8	27,9	27,9
2		27,2	27,7	27,5	27,6	27,5	27,5	27,7	27,7
1	$R_3 = 1265$	27,9	27,7	27,7	27,7	27,7	27,5	27,8	27,7
2		27,3	27,4	27,3	27,5	27,4	27,2	27,5	27,3
1	$R_4 = 190$	-	27,8	-	27,6	-	27,6	-	28
2		-	27,3	-	27,4	-	27,5	-	27,4

Средняя толщина днища по краю s_k и толщина днища по его оси s_o составляли $s_k = 30,4$ и $29,4$ мм, $s_o = 28,2$ и $27,5$ мм для 1-го и 2-го днища соответственно.

Как видно из рисунка 1.8 и данных таблицы 1.4, наибольшее утонение эллиптических днищ происходит на радиусе цилиндрического сечения $R_3 = 1265$ мм - в этом месте максимальное утонение составляет 2,5%, в центре первого

днища наблюдается утолщение 0,7%, в центре второго днища утонение 1,8%, борт утолщается до 8,5% (расчет от номинальной толщины стенки).

1.6.3 Исследования на ОАО «САЛАВАТНЕФТЕМАШ»

В диссертации Ризванова Р.Г. [3] представлены результаты измерений толщины стенок среднестенных эллиптических днищ с внутренними базовыми размерами $\varnothing 1100 \times 20$ мм из стали 16ГС, штампованных на ОАО «Салаватнефтемаш». Количество измеренных днищ – 6 штук. Измерения толщины стенки штампованного днища выполнялись ультразвуковым толщиномером, в центральной части с шагом 50 мм, в переходной части днища – с шагом 10 мм.

На рисунке 1.9 представлено распределение толщины вдоль образующей днищ, построенное в результате исследований на ОАО «Салаватнефтемаш».

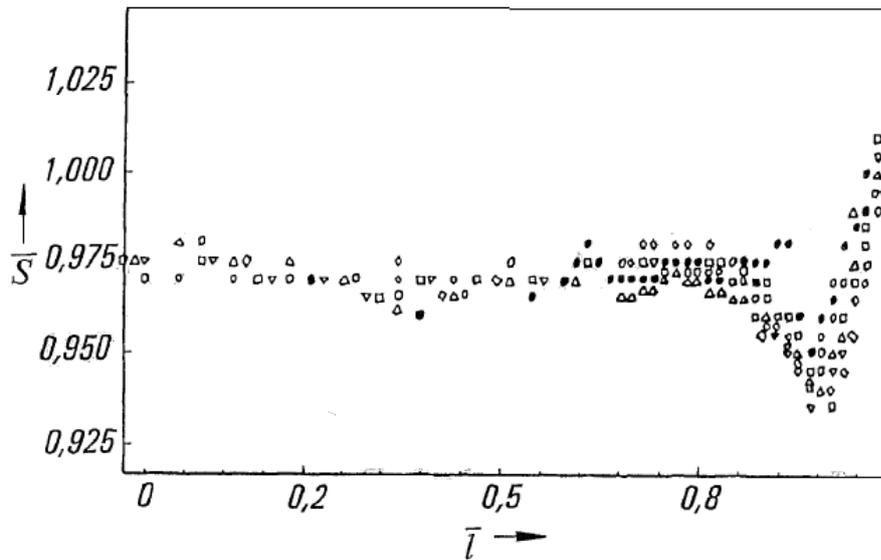


Рисунок 1.9 – Распределение толщины вдоль образующей днищ

Рисунок 1.9 построен в относительных координатах (\bar{l}, \bar{s}) :

$$\bar{l} = \frac{l}{l_0}, \quad \bar{s} = \frac{s}{s_0}, \quad (14)$$

где l - расстояние вдоль образующей от полюса днища до точки замера толщины стенки; l_3 - четверть периметра эллипса; s - измеренная толщина стенки днища; s_0 - номинальная толщина стенки днища.

Как видно из рисунка 1.9, в центральной части днища $\bar{l} < 0.8$, наблюдается незначительное равномерное утонение стенки, равное приблизительно 3%. Переходная часть днища $0.8 < \bar{l} < 1$ характеризуется наличием более значительного локального утонения, достигающего 6%. Ближе к краю днища $\bar{l} > 1$ имеет место утолщение стенки.

С учетом рисунка 1.9 определена и представлена на рисунке 1.10 модель, определяющая распределение толщины по образующей штампованного эллиптического днища. Данная модель состоит из четырех участков. Первый участок характеризует распределение толщины в центральной части днища, второй и третий – в зоне локального утонения, четвертый – в зоне утолщения на кромке днища. На первом и четвертом участках соответственно утонение и утолщение принимаются постоянными, на втором и третьем участках утонение описывается в виде полуволны синусоиды. Ниже приведены выражения для распределения толщины на каждом из участков:

$$s = \begin{cases} s_0 \times (1 - \delta_c), 0 \leq l \leq l_m - a_n \\ s_0 \times \left[1 - \delta_c - 0,5 \times (\delta_m - \delta_c) \times \left\{ 1 + \sin \left[\left(\frac{l_m - l}{a_n} + 0,5 \right) \times \pi \right] \right\} \right], l_m - a_n < l \leq l_m \\ s_0 \times \left[1 + \delta_e - 0,5 \times (\delta_m + \delta_e) \times \left\{ 1 + \sin \left[\left(\frac{l_m - l}{a_n} + 0,5 \right) \times \pi \right] \right\} \right], l_m < l \leq l_m + a_n \\ s_0 \times (1 + \delta_e), l_m + a_n < l \leq l_c \end{cases}, \quad (15)$$

где $\delta_c = \frac{\Delta_c}{s_0}$ - относительное утонение в центральной части; $\delta_m = \frac{\Delta_m}{s_0}$ -

относительное максимальное локальное утонение; $\delta_e = \frac{\Delta_e}{s_0}$ - относительное

утолщение на кромке днища [3].

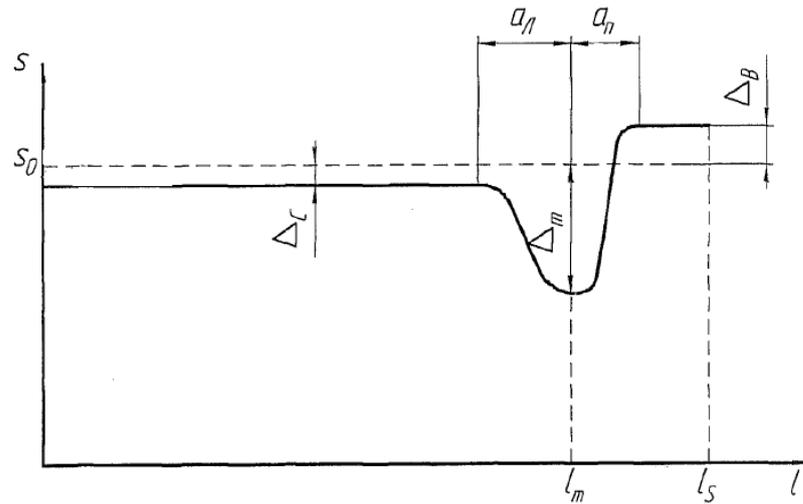


Рисунок 1.10 – Схема разнотолщинности днища по образующей: s - толщина стенки днища; s_0 - номинальная толщина стенки днища; Δ_c - утонение в центральной части днища; Δ_m - максимальное локальное утонение; Δ_ϵ - утолщение на кромке днища; l - расстояние вдоль образующей, отмеряемое от полюса днища; l_m - расстояние до точки максимального локального утонения; l_s - суммарная длина дуги по образующей днища; a_n - ширина зоны локального утонения слева; a_n - то же справа

1.7 Возможности компьютерного моделирования процессов обработки металлов давлением

Необходимость повышения качества поковок и штамповок ответственного значения, экономии металла и энергии, расходуемой на формоизменение, вызвала необходимость развития методов моделирования технологических процессов обработки металлов давлением.

Математическое моделирование является наиболее совершенным и эффективным методом моделирования, открывая путь для применения современных мощных методов математического анализа, вычислительной математики и программирования при исследовании и оптимизации технологических процессов.

Развитие методов математического моделирования и оптимизации процессов обработки металлов давлением в сочетании с широким внедрением персональных компьютеров позволяют создавать уникальные программы, позволяющие в автоматизированном режиме моделировать процессы пластического формоизменения, исследовать напряженно-деформированное состояние, температурные поля при обработке металлов давлением [62].

Большой вклад в развитие методов математического моделирования процессов обработки металлов давлением внесли отечественные и зарубежные учёные - Джонсон В., Томсен Э., Хилл Р., Целиков А.И., Полухин П.И., Тарновский И.Я., Колмогоров В.Л., Гун Г.Я., Поздеев А.А., Полухин В.П., Чекмарев А.П., Северденко В.П., Смирнов-Аляев Г.А., Смирнов С.В., Перлин И.Л., Томленов А.Д., Кучеряев Б.В., и др. Анализу современных подходов к моделированию процессов обработки металлов давлением посвящены работы Гуна Г.Я., Грудева А.П., Залазинского А.Г., Кучеряева Б.В., Логинова Ю.Н., Готлиба Б.М., Белевитина В.А., Рокотяна С.Е., Рыбина Ю.И., Рудского А.И., Золотова А.М. и др.

Моделирование позволяет выявить основные закономерности течения металла, обнаружить наиболее опасные с точки зрения разрушения зоны деформации, определить напряженное состояние деформируемого тела, а, следовательно, найти силу и работу формоизменения [63].

Компьютерное моделирование позволяет получить большой объем информации, провести всестороннее исследование, рассмотреть и сопоставить большее количество альтернативных вариантов. Натурный эксперимент, в свою очередь, позволяет компенсировать недостаточное знание природы явления, условий выполнения технологического процесса, недостоверность тех или иных технологических свойств материала. Сопоставление альтернативных вариантов в натурном эксперименте является менее надежным, поскольку не всегда возможно зафиксировать те параметры, которые предполагаются одинаковыми в рассматриваемых вариантах [64].

Совершенствование и развитие методов математического моделирования приводит к расширению области их успешного использования. Если на начальной стадии развития компьютерное моделирование было средством решения отдельных инженерных задач обработки давлением, то в настоящее время это - средство конструкторско-технологического проектирования [65-87].

Для поддержки математического моделирования разработаны различные компьютерные программы: LS-DYNA, MATLAB, ANSYS, CosmosM, DEFORM, QForm. Существует ряд программ, направленных на решение задач листоштамповочного производства, например, DYNAFORM, AUTOFORM, PAM-STAMP [88-90].

В настоящее время системы для компьютерного моделирования технологических процессов штамповки являются надежным помощником конструктора и технолога при проектировании рабочих поверхностей штампов, разработке технологических процессов, позволяя предотвратить вероятные дефекты, спрогнозировать качество изделия до того, как будет изготовлен инструмент.

1.8 Выводы, постановка целей и задач исследования

Результаты выполненного анализа технической литературы показали, что опубликованные исследования разнотолщинности днищ охватывают только углеродистые и низколегированные стали, не рассмотрены особенности формоизменения днищ из аустенитных сталей и из двухслойного стального листа. В трудах отсутствуют вычислительные и компьютерные модели процесса штамповки днищ с использованием современных численных методов решения краевых задач, таких, как метод конечных элементов.

Анализ научно-технической литературы за последние 45 лет, опыта работы ряда машиностроительных предприятий страны, в том числе ПАО «Уралхиммаш», выявил необходимость проведения экспериментальных исследований разнотолщинности эллиптических днищ из углеродистых,

низколегированных, аустенитных сталей, из двухслойного стального листа, нагреваемых до различных температур, штампуемых как за один, так и за два перехода.

Целью работы является снижение металлоемкости эллиптических горячештампованных днищ за счет уменьшения технологической прибавки на расчетную толщину заготовки, компенсирующей утонение металла в процессе изготовления, соответствующей современному состоянию технологического процесса.

Для достижения поставленной цели сформулированы **следующие задачи:**

1. Провести экспериментальное исследование фактической разнотолщинности эллиптических горячештампованных днищ различного сортамента, изготавливаемых на предприятии ПАО «Уралхиммаш».
2. Получить закономерности изменения толщины стенки для различных групп сталей и режимов обработки.
3. Разработать трехмерную компьютерную модель процесса горячей штамповки эллиптического днища с использованием метода конечных элементов и провести моделирование в программном комплексе DEFORM-3D.
4. Разработать рекомендации, направленные на совершенствование существующего технологического процесса изготовления горячештампованных днищ с целью снижения их металлоемкости, энергоемкости и трудоемкости процесса изготовления.

2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ЭЛЛИПТИЧЕСКИХ ДНИЩ ПРИ ГОРЯЧЕЙ ШТАМПОВКЕ

2.1 Методика проведения эксперимента

В рамках данной диссертационной работы исследована разнотолщинность 60-ти эллиптических днищ с размерами (рисунок 1.2), указанными в таблице 2.1.

Профиль днищ соответствует требованиям ГОСТ 6533 [8], отклонения размеров и формы днищ - требованиям ГОСТ 34347 [14]. Заготовки изготовлены из проката листового горячекатаного, материал заготовок прошел входной контроль в соответствии с порядком, установленным на предприятии.

Таблица 2.1 – Типоразмеры эллиптических днищ, отобранных для исследования

Внутренний диаметр D_g , мм	Толщина стенки S , мм
900	10
900	14
1000	12
1200	8
1200	45
1300	8
1600	10
1600	28
2000	10
2000	14
2000	55
2200	10
2200	18
2400	80

Продолжение таблицы 2.1

Внутренний диаметр D_e , мм	Толщина стенки S , мм
2800	12
2800	14
2800	22
2800	55
3000	22
3000	45
3000	90
3000	100
3200	22
3400	100

Материал днищ:

– углеродистые стали марок Ст3 (ГОСТ 14637 [91]), 20ЮЧ (ТУ 14-1-4853 [92]), низколегированная марганцово-кремнистая сталь марки 09Г2С (ГОСТ 5520 [93]);

– аустенитные стали марок 12Х18Н10Т (ГОСТ 7350 [94]), SA-240 Type 304L Spec. SA-240M (ASME 2013 Sec. II [95]) (в соответствии с СТП 26.260.486 [96] является аналогом стали 03Х18Н11);

– листовой двухслойный прокат: сталь марки 12ХМ с плакирующим слоем из стали марки 08Х18Н10Т (ГОСТ 10885 [97]), сталь марки 22К с плакирующим слоем из стали марки 08Х18Н10Т (ТУ 0900-005-05764417 [98]).

Основанием к отбору днищ вышеперечисленного сортамента послужило следующее:

1) Значительное практическое использование перечисленных сталей при изготовлении аппаратов, применяемых в химической, нефтехимической, нефтеперерабатывающей, атомной и других отраслях промышленности, а также

необходимость в настоящее время все большего применения листового проката, изготовленного по зарубежным стандартам, и листового двухслойного проката.

2) Различная относительная толщина стенки, которая влияет на количество переходов штамповки днища.

3) Различия в температурном режиме обработки.

Заготовки днищ из сталей марок Ст3, 09Г2С, 20ЮЧ нагревались под штамповку до температуры нормализации, из сталей марок 12Х18Н10Т, SA-240 Type 304L – до температуры аустенизации. Режим нагрева заготовок днищ из двухслойного стального листа – стали марки 12ХМ с плакирующим слоем из стали марки 08Х18Н10Т, сталь марки 22К с плакирующим слоем из стали марки 08Х18Н10Т был принят по основному слою, то есть нагрев до температуры нормализации.

Днища отштампованы как на прессе простого действия, так и на прессе двойного действия.

Все днища отштампованы в оснастке с одинаковым зазором между пуансоном и сменным кольцом, линейные размеры пуансона рассчитаны с учетом температурной усадки днищ, характерной для группы углеродистых и низколегированных сталей, то есть равной 1%, без применения подкладного кольца при штамповке.

Для определения изменения толщины днища при горячей штамповке ультразвуковым толщиномером А1209 (изготовитель НПП «АНАЛИТПРОМПРИБОР») измерены толщина плоской заготовки днища в предварительно размеченных на поверхности точках, затем после штамповки повторно измерена толщина штампованного днища в этих же точках.

Метод ультразвуковой толщинометрии обеспечивает высокую точность измерений и не требует разделения изделия.

Основная погрешность измерений толщины S , мм используемого толщиномера:

- при толщинах от 0,7 до 3,0 мм - не более $\pm(0,01 \times S + 0,1)$ мм;

- при толщинах от 3,01 до 99,99 мм - не более $\pm(0,01 \times S + 0,05)$ мм;
- при толщинах от 100,0 до 300,0 мм - не более $\pm(0,01 \times S + 0,1)$ мм.

Ультразвуковой толщиномер предварительно настраивали с использованием СОП (стандартных образцов предприятия), выполненных из тех же материалов, что и контролируемые изделия - днища. Используемый для работы ультразвуковой толщиномер и СОП аттестованы и поверены метрологической службой в соответствии с порядком, установленным на предприятии.

Точки размечали на двух центральных взаимно перпендикулярных осях с шагом 100 мм. С целью повышения точности измерений – с двух сторон от каждой точки для измерения толщины размечали кернением по две точки, расстояние между размеченными точками 30 мм. Глубина кернения – не более 0,2-0,3 мм. Оси идентифицировали путем маркирования ударным способом на припуске под штамповку. Для днищ диаметром Ø900 мм, Ø1000 мм, Ø1200 мм, Ø1300 мм, Ø1600 мм размечались дополнительные промежуточные точки для более точного построения эпюр.

Поверхность заготовки и штампованного днища в местах измерений очищали от загрязнений и отслаивающейся окалины, зачищали шлифовальной машинкой для исключения погрешности от нестабильности акустического контакта до металлического блеска со съемом минимального слоя металла. Шероховатость поверхности изделия со стороны ввода УЗ-колебаний - $\leq R_a = 6,3$ мкм по ГОСТ 2789 [99]. Места измерений смазывали контактной жидкостью (карбоксиметилцеллюлозой).

Эскиз и фото подготовленной заготовки, днища к измерениям толщины представлены на рисунках 2.1, 2.2, 2.3.

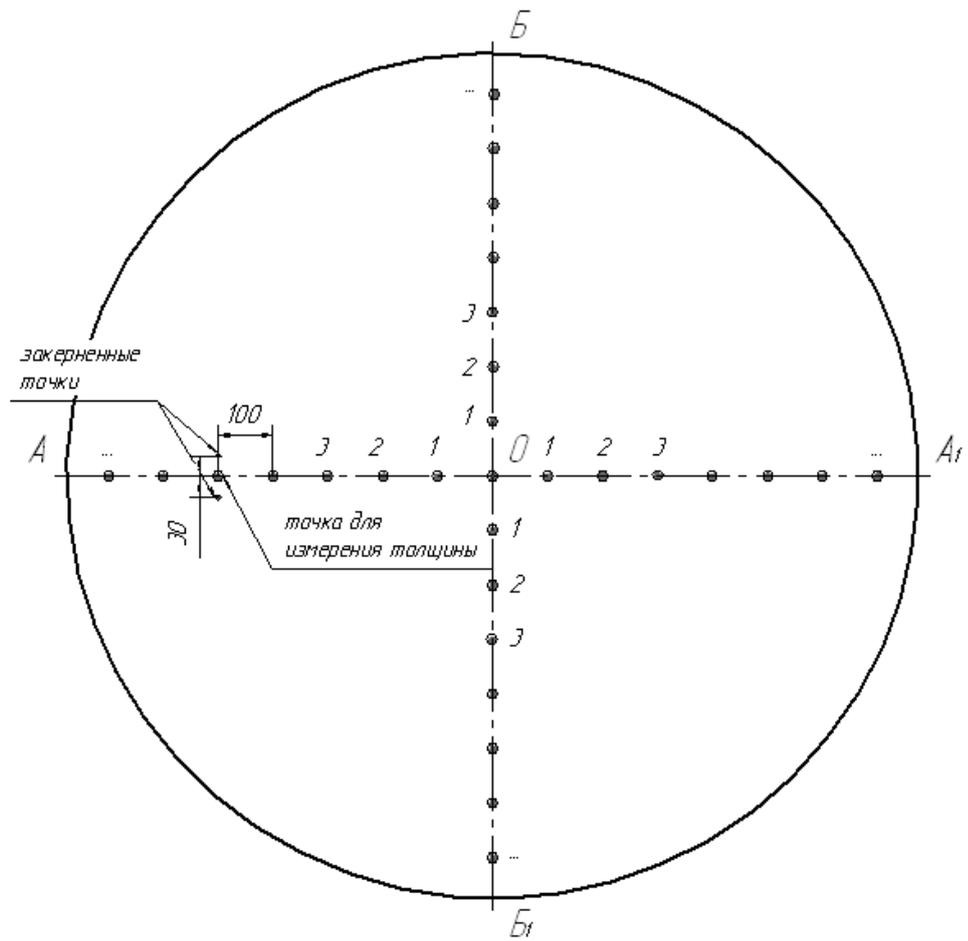


Рисунок 2.1 – Подготовка заготовки днища для измерения толщины



Рисунок 2.2 - Подготовка заготовки днища для измерения толщины



Рисунок 2.3 - Подготовка штампованного днища для измерения толщины

2.2 Результаты экспериментального исследования

По результатам измерений для всех точек днищ рассчитана величина относительного изменения толщины по формуле

$$\Delta = \frac{S_1 - S_0}{S_0} \times 100\% , \quad (16)$$

где S_0 - толщина исходной плоской заготовки; мм, S_1 - толщина стенки штампованного днища в этой же точке, мм.

На основании произведенных измерений и расчетов для каждого типоразмера днища построены кривые, характеризующие разнотолщинность стенки в меридиональном сечении. Кривые эпюр аппроксимированы посредством NURBS-кривой (неоднородный рациональный B-сплайн) 5^{го} порядка в CAD-системе (рисунки 2.4, 2.5, 2.6, 2.7, 2.10, 2.12, 2.13).

На всех построенных эпюрах расположение характерных зон изменения толщины соответствует ранее проведенным исследованиям (см. раздел 1.6):

утонение наблюдается в донной части днища, в зоне перехода эллиптической части в цилиндрическую, а на борту днища – утолщение.

Результаты измерений и расчетов систематизированы в шесть эпюр относительного изменения толщины стенки днищ.

В таблице 2.2 представлены сведения об относительной толщине стенки измеренных днищ. Формула для определения относительной толщины стенки и признак соответствующей классификации представлены в разделе 1.1.1.

Таблица 2.2 - Относительная толщина стенки измеренных днищ

Группа сталей	Количество переходов штамповки	Относительная толщина стенки	Группа днищ	Номер рисунка с эпюрой распределения изменения толщины
Углеродистые и низколегированные марганцово-кремнистые стали	1	0,67...3,75	Тонкостенные, Среднестенные	2.5, 2.7
	2	0,43...0,63	Тонкостенные	2.6
Аустенитные стали	2	0,62...1,11	Тонкостенные	2.10
Двухслойные стальные листы	1	1,96...3,0	Среднестенные	2.12, 2.13

На основании данных эпюр в Microsoft Excel построены регрессионные зависимости распределения изменения толщины стенки горячештампованных днищ по их образующим (рисунки 2.8, 2.9, 2.11, 2.14, 2.15). Данные зависимости позволяют определить изменение толщины стенки в сечении образующей в зависимости от его расположения относительно центральной оси днища. На рисунках 2.8, 2.9, 2.11, 2.14, 2.15 приведены коэффициенты достоверности аппроксимации R^2 построенных регрессионных зависимостей. Коэффициент достоверности аппроксимации R^2 показывает степень соответствия трендовой

модели исходным данным. Чем ближе R^2 к 1, тем точнее модель описывает имеющиеся данные. Для построенных регрессионных зависимостей коэффициент R^2 лежит в диапазоне от 0,9873 до 0,9973, что соответствует высокой степени соответствия.

1) Днища из углеродистых и низколегированных марганцово-кремнистых сталей.

На рисунках 2.4, 2.5, 2.6 представлены эпюры, характеризующие распределение изменение толщины стенки днищ из углеродистых и низколегированных марганцово-кремнистых сталей по их образующим.

Утонение и соответственно утолщение днищ из углеродистых и низколегированных марганцово-кремнистых сталей, штампованных в один и два перехода, различается в среднем на 1% (рисунки 2.4, 2.5, 2.6). Максимальное утонение днищ, штампованных в один переход, достигает 3,4% (рисунок 2.5), а штампованных в два перехода, - 4,3% (рисунок 2.6). Зона с максимальным утонением для всех днищ расположена на эллиптической части на пересечении образующей с осью, отклоненной на угол $\alpha \sim 43^\circ$ относительно центральной оси днища. Утолщение борта днищ, штампованных в один переход, составляет 7,4%; штампованных в 2 перехода - 8%.

Увеличение утонения днищ, штампованных в два перехода, связано с увеличением количества образованной окалины из-за повторного нагрева днищ под второй переход штамповки.

Днища из стали 09Г2С с размерами $\varnothing 1200 \times 45$ мм, $\varnothing 1600 \times 28$ мм, $\varnothing 3000 \times 45$ мм, из-за отсутствия сменных колец с номинальным размером по толщине, были отштампованы в имеющихся кольцах, предназначенных для днищ $\varnothing 1200 \times 50$ мм, $\varnothing 1600 \times 30$ мм, $\varnothing 3000 \times 50$ мм соответственно, увеличение зазора не повлияло на величину утонения и утолщения.

Днище с размерами $\varnothing 2400 \times 80$ мм из углеродистой стали 20ЮЧ отштамповано в один переход. Исходя из результатов исследований в части систематизации результатов в зависимости от группы сталей, днище с размерами

Ø2400×80 мм из стали 20ЮЧ должно было иметь разнотолщинность в соответствии с рисунком 2.5. При этом максимальное утонение днища с размерами Ø2400×80 мм достигло 4,3% (рисунок 2.7). Зона с максимальным утонением расположена на эллиптической части на пересечении образующей с осью, отклоненной на угол $\alpha \sim 43^\circ$ относительно центральной оси днища - аналогично днищам из углеродистых и низколегированных марганцово-кремнистых сталей. Утолщение составило 8,2%. Днище штамповали в кольце, предназначенном для днища с размерами Ø2400×90 мм, при этом измерения пуансона выявили износ рабочей поверхности. Перед штамповкой с поверхности нагретой заготовки удалили окалину сжатым воздухом. Для обеспечения плотного прилегания заготовки к пуансону - для предотвращения искажения формы днища, штамповка произведена с увеличенной силой прижима, что и оказало влияние на увеличения утонения стенки днища.

На рисунках 2.8, 2.9 показаны регрессионные зависимости изменения толщины стенки днищ из углеродистых и низколегированных марганцово-кремнистых сталей по их образующим.

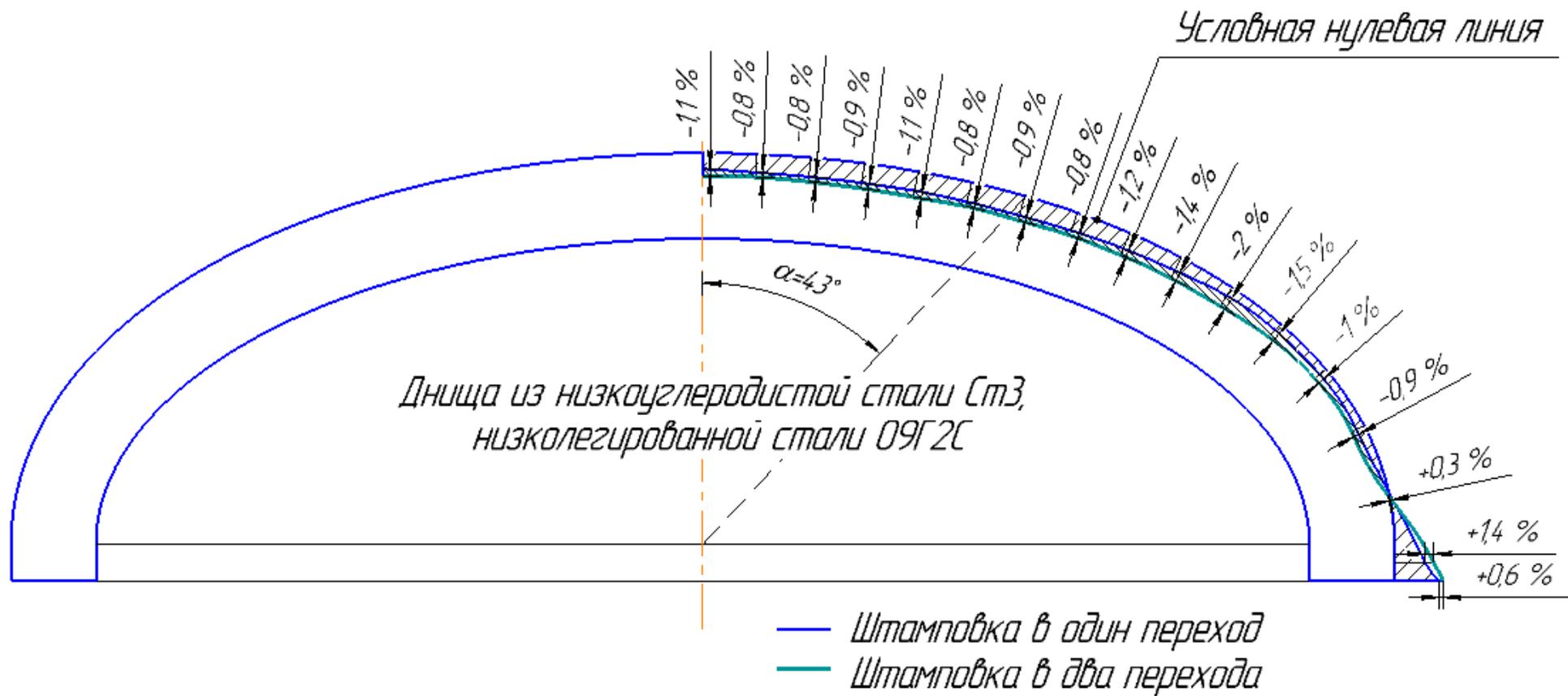


Рисунок 2.4 - Относительное изменение толщины стенки днищ из сталей Ст3, 09Г2С, штампованных за один и два перехода

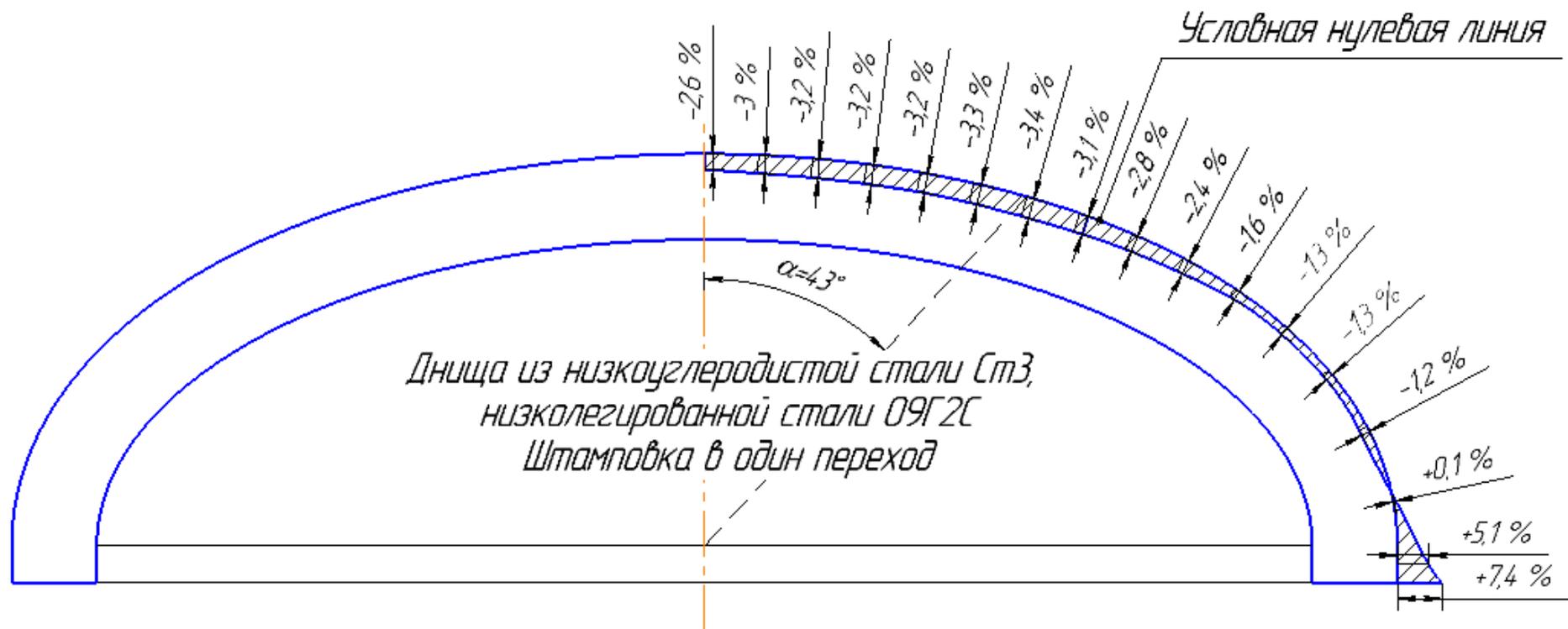


Рисунок 2.5 - Относительное изменение толщины стенки днищ из сталей Ст3, 09Г2С, штампованных за один переход

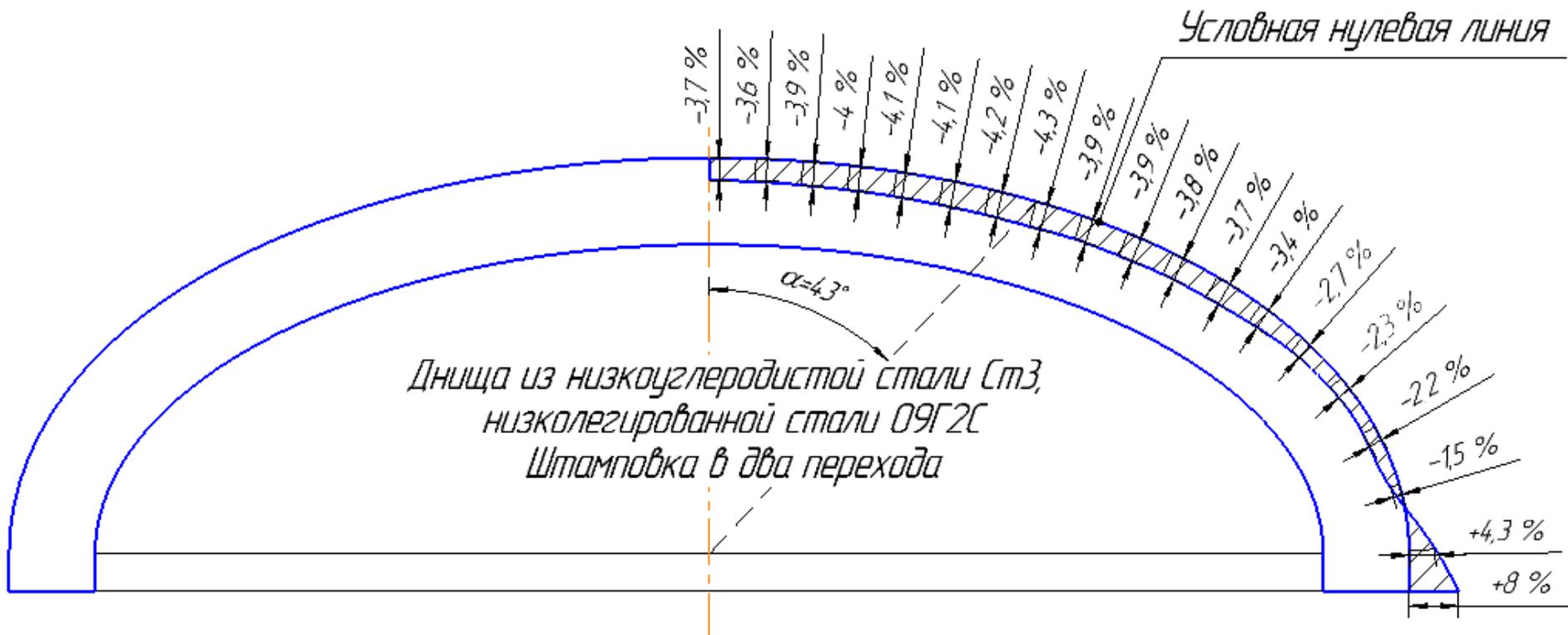


Рисунок 2.6 - Относительное изменение толщины стенки днищ из сталей Ст3, 09Г2С, штампованных за два перехода

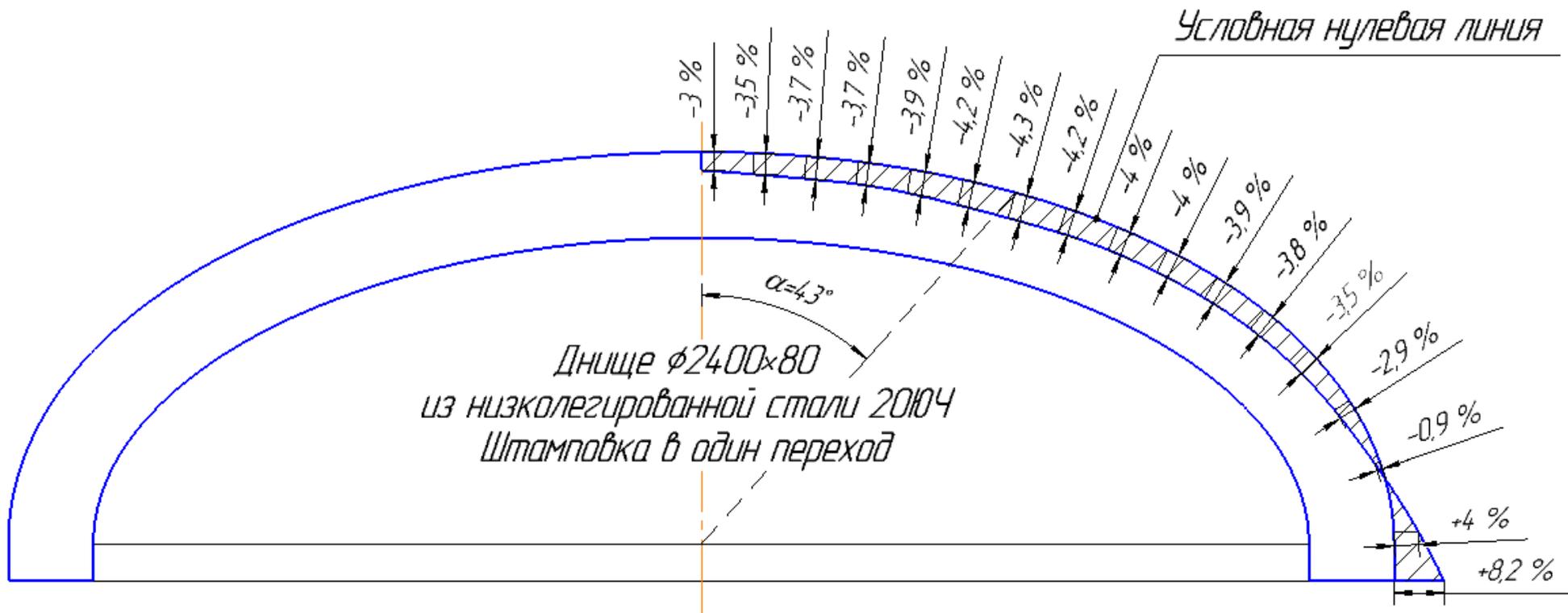


Рисунок 2.7 - Относительное изменение толщины стенки днищ из стали 20ЮЧ, штампованных за один переход

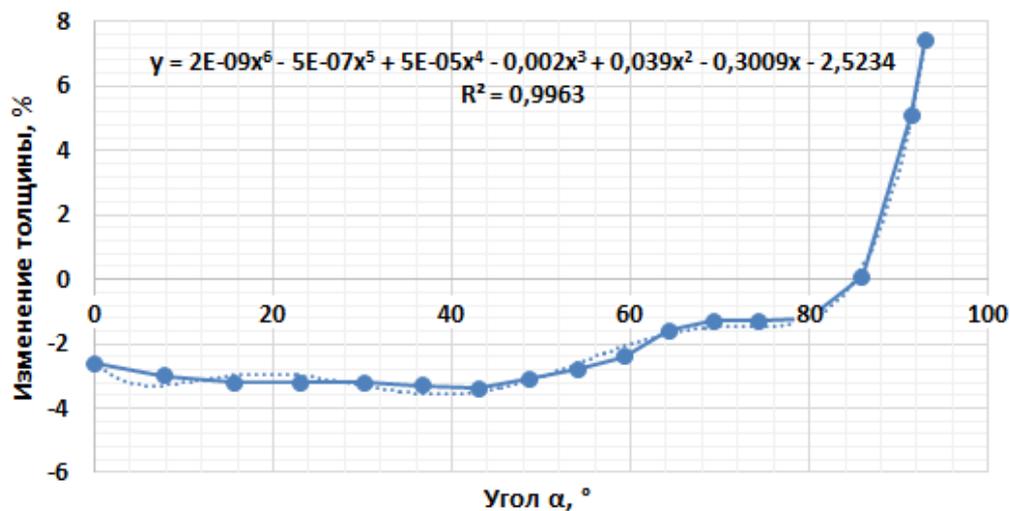


Рисунок 2.8 – Изменение толщины вдоль образующей днищ из сталей Ст3, 09Г2С, штампованных за один переход

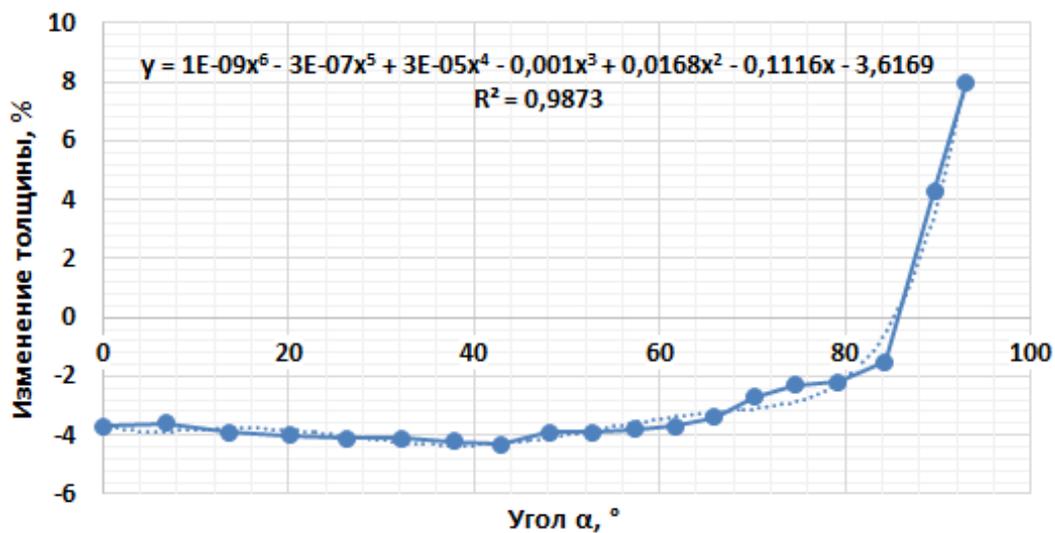


Рисунок 2.9 – Изменение толщины вдоль образующей днищ из сталей Ст3, 09Г2С, штампованных за два перехода

2) Днища из аустенитных сталей

На рисунке 2.10 представлена эпюра, характеризующая распределение изменения толщины стенки днищ из аустенитных сталей по их образующим.

Для проведения исследования измерены днища из аустенитных сталей, штампованные в два перехода.

Днища из аустенитных сталей имеют меньшее утонение (рисунок 2.10), чем днища из углеродистых и низколегированных марганцово-кремнистых сталей. Зона с максимальным утонением в 1,5% расположена на эллиптической части на пересечении образующей с осью, отклоненной на угол $\alpha \sim 50^\circ$ относительно центральной оси днища. Утолщение борта составляет 8%.

На рисунке 2.11 показана регрессионная зависимость изменения толщины стенки днищ из аустенитных сталей по их образующим, штампованных за два перехода.

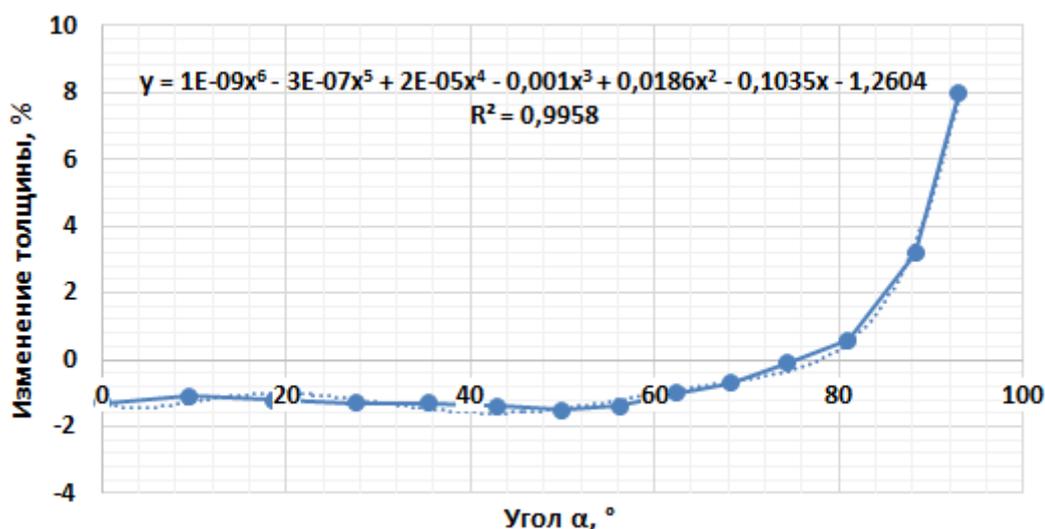


Рисунок 2.11 - Распределение толщины вдоль образующей днищ из сталей 03X18H11, 12X18H10T, штампованных за два перехода

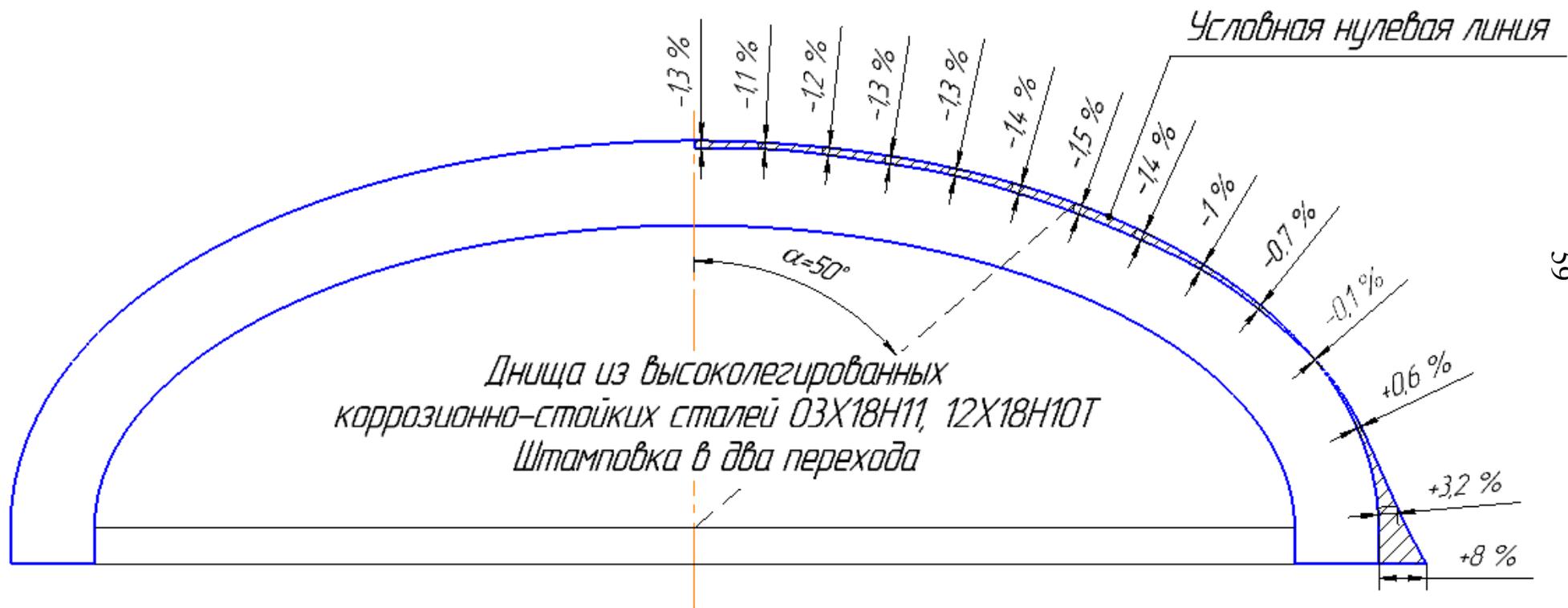


Рисунок 2.10 - Относительное изменение толщины стенки днищ из сталей 03X18H11, 12X18H10T, штампованных за два перехода

3) Днища из двухслойного стального листа

На рисунках 2.12, 2.13 представлены эпюры, характеризующие распределение изменения толщины стенки днищ из двухслойного стального листа по их образующим.

Нагрев днищ из двухслойного листа из сталей марок 12ХМ+12Х18Н10Т, 22К+12Х18Н10Т, штампованных за один переход, осуществлялся по режиму основного слоя, то есть до температуры нормализации. Величина и характер распределения утонения днищ (рисунки 2.12, 2.13) соответствует днищам из углеродистых и низколегированных марганцово-кремнистых сталей (рисунок 2.5), штампованных за 1 переход.

Зона с максимальным утонением в 3,4% для днища с размерами $\text{Ø}2800 \times 55$ мм из 12ХМ+12Х18Н10Т расположена на эллиптической части на пересечении образующей с осью, отклоненной на угол $\alpha \sim 38^\circ$ относительно центральной оси днища. Для днища с размерами $\text{Ø}3000 \times 90$ мм из 22К+12Х18Н10Т зона с максимальным утонением в 3,4% расположена на эллиптической части на пересечении образующей с осью, отклоненной на угол $\alpha \sim 45^\circ$ относительно центральной оси днища.

Утолщение борта днища с размерами $\text{Ø}2800 \times 55$ мм до 9,2% связано с увеличенным зазором в оснастке. Для штамповки днища с размерами $\text{Ø}2800 \times 55$ мм применялось сменное кольцо, рассчитанное на толщину 60 мм в связи с отсутствием кольца, рассчитанного на толщину 55 мм, по результатам измерений оснастки – пуансон изношен. Утолщение борта днища с размерами $\text{Ø}3000 \times 90$ мм составило 7,7%.

На рисунках 2.14, 2.15 показаны регрессионные зависимости изменения толщины стенки днищ из двухслойного стального листа по их образующим.

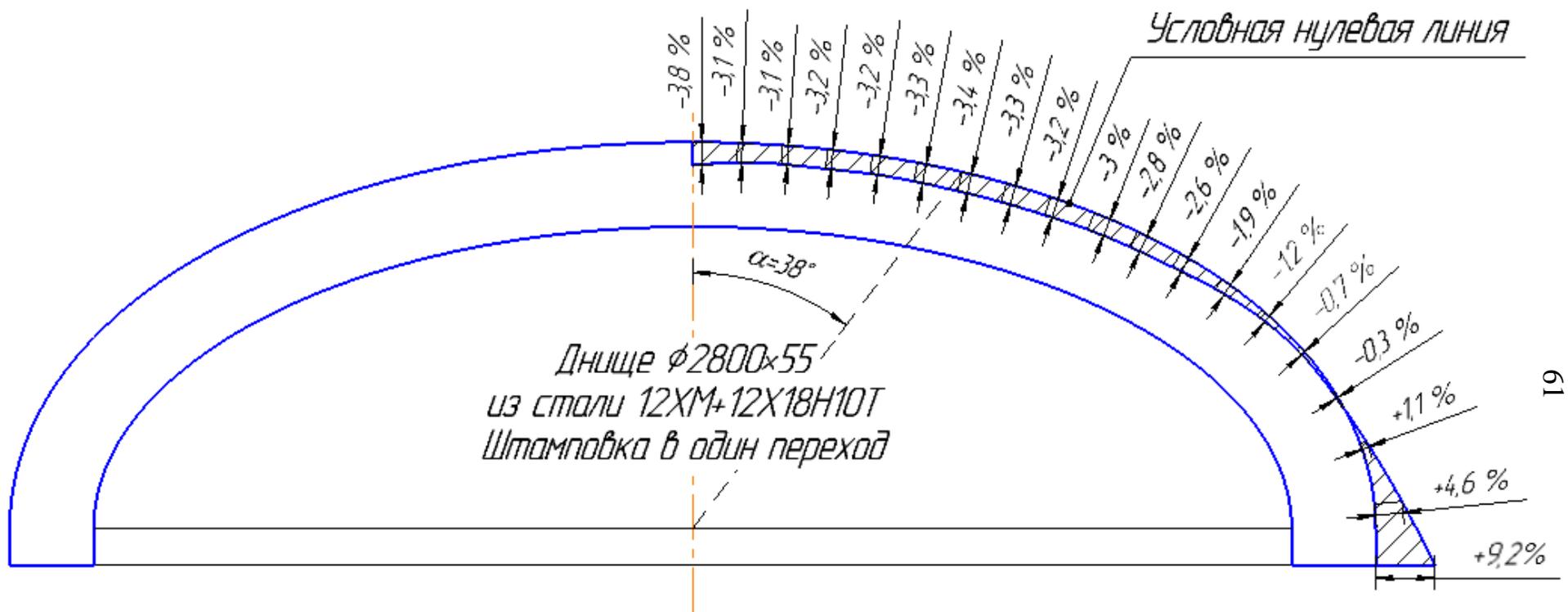


Рисунок 2.12 - Относительное изменение толщины стенки днища с размерами $\phi 2800 \times 55$ мм из двухслойного стального листа 12ХМ+12Х18Н10Т, штампованного за один переход

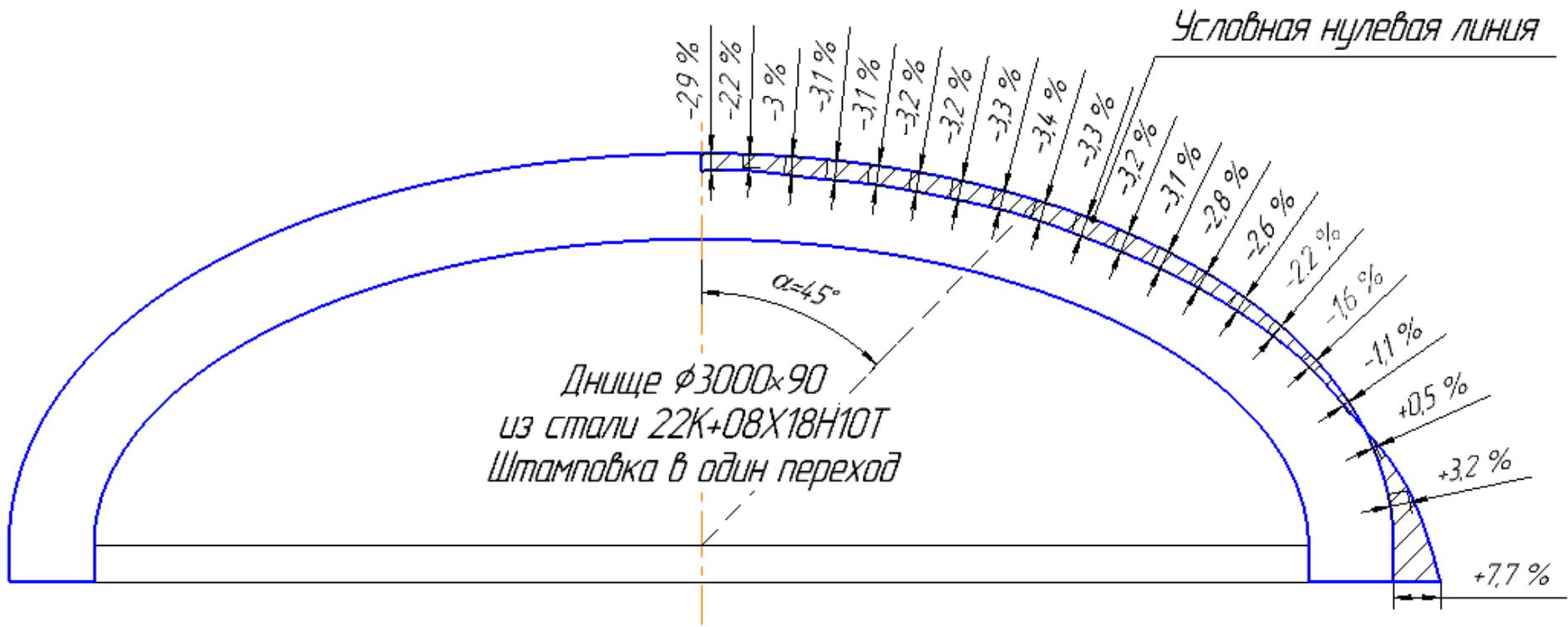


Рисунок 2.13 - Относительное изменение толщины стенки днища с размерами $\phi 3000 \times 90$ мм из двухслойного стального листа 22К+12Х18Н10Т, штампованного за один переход

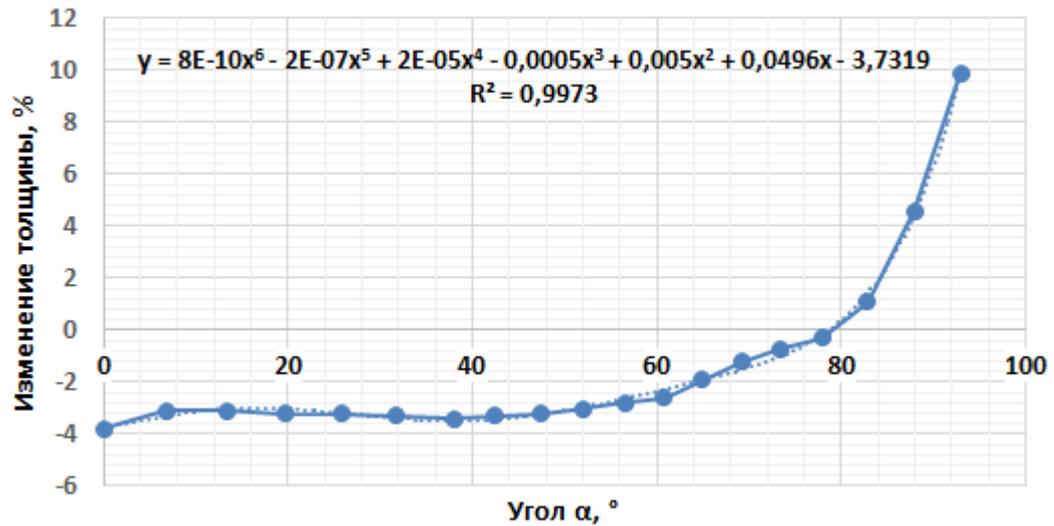


Рисунок 2.14 - Распределение толщины вдоль образующей днища с размерами Ø2800×55 мм из двухслойного стального листа 12ХМ+12Х18Н10Т, штампованного за один переход

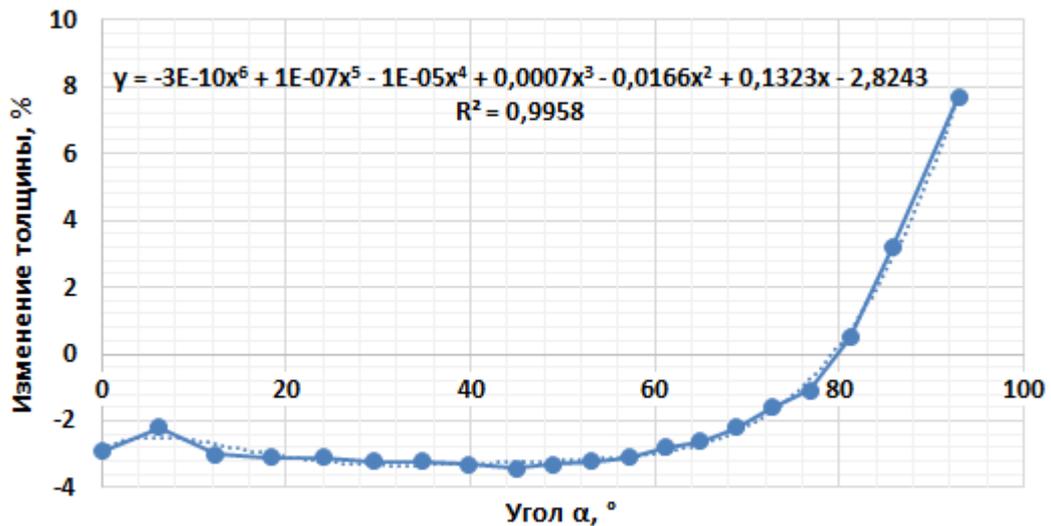


Рисунок 2.15 - Распределение толщины вдоль образующей днища с размерами Ø3000×90 мм из двухслойного стального листа 22К+12Х18Н10Т, штампованного за один переход

2.3 Анализ результатов экспериментального исследования

Выявленное различие величины утонения днищ из аустенитных сталей по сравнению с днищами из углеродистых и низколегированных марганцово-кремнистых сталей связано с комплексным влиянием ряда факторов.

На основании с СТО 00220256-001 [41] для углеродистых и низколегированных марганцово-кремнистых сталей предусмотрен нагрев до температуры 920°...950°С и выдержка при этой температуре, равная 1,5 мин. на 1 мм толщины заготовки. Аустенитные стали нагревают до температуры 1050°...1100°С с выдержкой, равной 1 мин. на 1 мм толщины заготовки.

Известно, что с повышением температуры и длительности нагрева процессы окисления инициируются, однако не менее важным фактором процесса окалинообразования является химический состав стали.

С повышением содержания углерода в углеродистых и низколегированных сталях, начиная с 0,5%, скорость окисления замедляется, количество образованной окарины уменьшается. Содержание никеля и марганца не оказывают значительного влияния на процесс окисления, содержание в стали титана заметно уменьшает окисление, а содержание хрома и кремния замедляют его особенно сильно. Сопротивление окалинообразованию аустенитных сталей выше, чем сталей других классов [58, 60].

Различия в величинах утонения днищ из аустенитных и углеродистых, низколегированных сталей можно объяснить различной интенсивностью упрочнения при данных деформационно-скоростных параметрах штамповки. Согласно справочнику [100], при температуре 1100°С, степени деформации $\varepsilon = 0,2$, скорости деформации $\dot{\varepsilon} = 0,025$ 1/с сопротивление деформации стали 12Х18Н10Т $\sigma_s = 80$ МПа, а стали 09Г2С $\sigma_s = 55$ МПа, то есть в 1,45 раза меньше. Поэтому углеродистые и низколегированные стали деформируются легче, чем аустенитные.

Величина и характер распределения утонения днищ из двухслойного стального листа – марки 12ХМ с плакирующим слоем из стали марки 08Х18Н10Т, марки 22К с плакирующим слоем из стали марки 08Х18Н10Т соответствуют днищам из углеродистых и низколегированных марганцово-кремнистых сталей.

2.4 Влияние зазора между сменным кольцом и пуансоном на форму эллиптических днищ

Известно, что завышенный зазор между сменным кольцом и пуансоном влияет на появление гофров на цилиндрической части, вогнутостей, выпуклостей на эллиптической части, превышение отклонения внутреннего диаметра днища, наклона борта.

При проведении эксперимента систематизированы результаты визуально-измерительного контроля днищ и исследовано влияние величины зазора на качество днищ.

На рисунке 2.16 представлено распределение допустимого дополнительного одностороннего зазора между сменным кольцом и пуансоном.

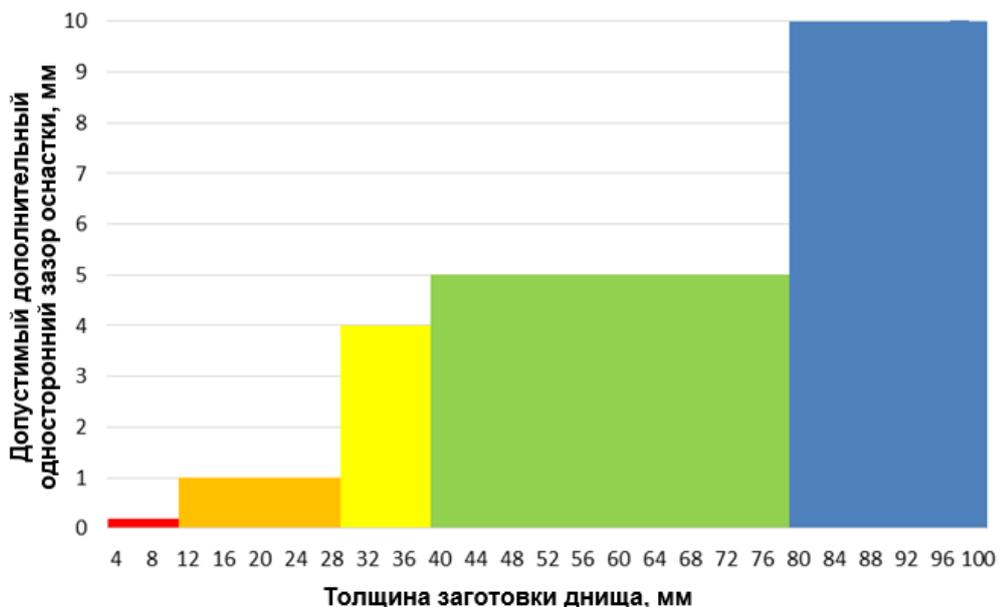


Рисунок 2.16 – распределение допустимого дополнительного одностороннего зазора между сменным кольцом и пуансоном в зависимости от толщины заготовки днища

Исходя из данных, представленных на рисунке 2.16, для днищ с толщиной стенки от 30 до 38 мм не допускается дополнительный односторонний зазор свыше 4 мм, для днищ от 40 до 78 мм не допускается дополнительный односторонний зазор свыше 5 мм.

Как отмечалось ранее, днища из стали 09Г2С с размерами $\text{Ø}1200 \times 45$ мм, $\text{Ø}1600 \times 28$ мм, $\text{Ø}3000 \times 45$ мм и днище из стали 20ЮЧ с размерами $\text{Ø}2400 \times 80$ мм из-за отсутствия сменных колец с номинальным размером по толщине, были отштампованы в имеющихся кольцах, рассчитанных на другую толщину, то есть предназначенных для днищ с размерами $\text{Ø}1200 \times 50$ мм, $\text{Ø}1600 \times 30$ мм, $\text{Ø}3000 \times 50$ мм, $\text{Ø}2400 \times 90$ мм. По результатам измерительного контроля форма днищ соответствовала требованиям ГОСТ 34347 [14]. Допуск наклона Δt для днищ с размерами $\text{Ø}1600 \times 28$ мм имел значение от 5 до 5,4 мм (согласно ГОСТ 34347 [14], наклон цилиндрической части для данной толщины не должен превышать 6 мм), отклонение внутреннего диаметра в цилиндрической части составило до 0,6% номинального диаметра (допустимое отклонение – не более 1%). Допуск наклона Δt для днищ с размерами $\text{Ø}1200 \times 45$ мм, $\text{Ø}2400 \times 80$ мм, $\text{Ø}3000 \times 45$ мм имел значение от 7 до 7,3 мм согласно ГОСТ 34347 [14], наклон цилиндрической части для данной толщины не должен превышать 8 мм), отклонение внутреннего диаметра в цилиндрической части составило до 0,5% номинального диаметра (допустимое отклонение – не более 1%). Высота гофров на цилиндрической части всех днищ не превышала 0,5 мм. Пуансоны для штамповки вышеперечисленных днищ не были изношены.

Днище из 09Г2С с размерами $\text{Ø}2600 \times 45$ мм, штампованное в сменном кольце, предназначенном для днищ с размерами $\text{Ø}2600 \times 50$ мм имел недопустимый наклон борта, равный 8,2 мм (согласно ГОСТ 34347 [14], наклон цилиндрической части для данной толщины не должен превышать 8 мм), отклонение внутреннего диаметра в цилиндрической части соответственно составило до 0,6% номинального диаметра (допустимое отклонение – не более 1%). Максимальная высота гофр на цилиндрической части днища составила 0,6

мм. При определении причин отклонений, выяснилось, что пуансон для штамповки данного днища был изношен, диаметр был меньше на 3,6 мм относительно номинального.

Таким образом, с целью предупреждения возможного снижения точности размеров и формы горячештампованных эллиптических днищ, исключения появления дефектов на изделии, брака, требуется периодический визуально-измерительный контроль диаметров рабочих поверхностей сменных колец, пуансонов, подвергаемых наибольшему износу.

2.5 Статистическая оценка экспериментальных данных

2.5.1 Исходные данные для анализа

Для исследования рассмотрели эллиптические днища (рисунок 1.2) с размерами, указанными в таблице 2.3, из стали 09Г2С.

Таблица 2.3 - Типоразмеры исследуемых эллиптических днищ

Внутренний диаметр D_e , мм	Толщина стенки S , мм	Количество днищ, шт.	Максимальное утонение стенки, %
900	14	2	2,75; 2,36
1000	12	2	3,04; 2,88
1200	8	2	2,95; 2,71
1200	45	2	2,78; 2,73
1600	28	1	2,98
2000	55	2	2,22; 2,32
2200	18	2	2,55; 2,73
3000	22	2	2,36; 2,60
3000	45	2	2,36; 2,42
3200	22	2	3,13; 2,45
3400	100	1	2,41

Исследуемая случайная величина – максимальное утонение стенки в соответствующем меридиональном сечении (%), рассчитанное по формуле (16).

2.5.2 Функция распределения и плотность вероятности для точек с максимальным утонением стенки

Для исследуемой случайной величины, значения которой приведены в таблице 2.3, для днищ выбранных типоразмеров, по общеизвестным формулам [101] построены функция распределения и плотность вероятности для данных, полученных в ходе эксперимента, представленных в разделе 2.2.

Для этого на первом этапе проверили гипотезу о нормальном распределении рассматриваемой случайной величины по критерию Пирсона χ^2 (17):

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k C_i (P_i - P_i^*)^2, \quad (17)$$

где k – количество анализируемых интервалов; P_i и P_i^* – оценка и теоретическая вероятность случайной величины для i -го интервала; C_i – весовые коэффициенты.

Гипотеза о нормальном распределении случайной величины принимается с доверительной вероятностью $P = 1 - \alpha$ (где α – уровень значимости), если выполняется неравенство:

$$\chi^2 < \chi_{\alpha, m}^2, \quad (18)$$

где $\chi_{\alpha, m}^2$ – квантиль распределения Пирсона при уровне значимости α и числе степеней свободы m , определяемый по справочным данным.

В рассматриваемом случае при $\alpha = 0,05$ и $m=18$ расчетный критерий Пирсона $\chi^2 = 6,81$, а квантиль распределения $\chi_{\alpha, m}^2 = 28,87$. Таким образом, неравенство (18) выполняется, и закон распределения рассматриваемой случайной величины можно принять нормальным с доверительной вероятностью 0,95.

Для построения функции нормального распределения и плотности вероятности рассчитали параметры распределения:

1) Математическое ожидание как среднее арифметическое выборки: $\mu = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n X_i = 2,64 \%$, где X_i - максимальное утонение стенки днища (%),

$n = 20$ - количество исследуемых днищ – измерений.

2) Среднее квадратическое отклонение: $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} = 0,27 \%$, где \bar{X} -среднее арифметическое выборочных значений (%).

На рисунках 2.17, 2.18 приведены экспериментальные и теоретические статистические функции. Теоретические функции построены с помощью стандартных статистических функций в электронных таблицах Microsoft Excel. Функция нормального распределения (рисунок 2.17):

$$F(x; \mu; \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \sigma} \int_{-\infty}^x e^{-\left(\frac{(x-\mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}\right)} dx \quad (19)$$

и плотность распределения (рисунок 2.18):

$$f(x; \mu; \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \sigma} e^{-\left(\frac{(x-\mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}\right)} \quad (20)$$

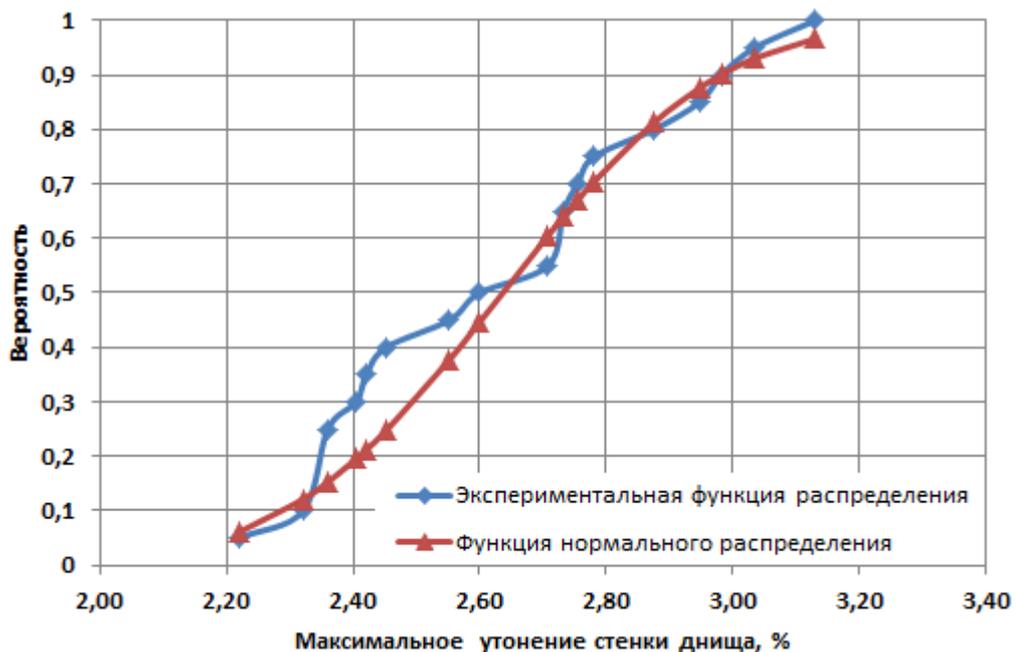


Рисунок 2.17 – Экспериментальная и теоретическая функция нормального распределения

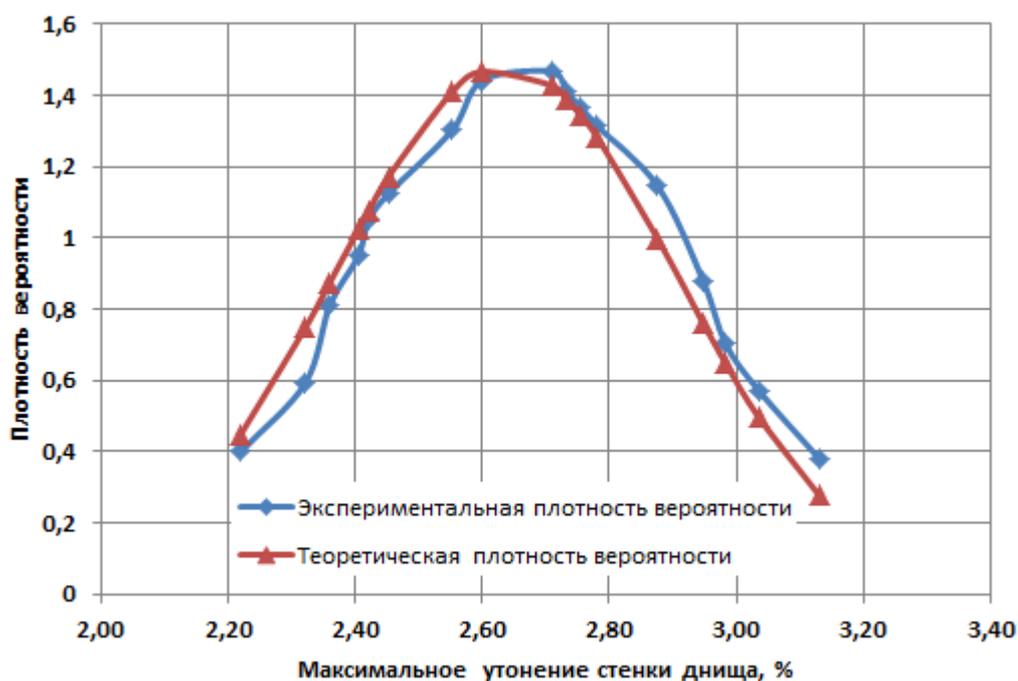


Рисунок 2.18 – Экспериментальная и теоретическая функция плотности вероятности

2.5.3 Контрольные карты Шухарта

Для оценки стабильности процесса штамповки в целях исключения воздействия особых причин изменчивости на изменение толщины стенки штампованных днищ применен статистический метод - контрольные карты Шухарта: \bar{X} -карта - карта средних, R -карта - карта размахов.

Для построения контрольных карт в соответствии с методикой, регламентируемой ГОСТ Р 50779.42 [102], рассчитаны следующие параметры:

- средние подгрупп $\bar{X} = \frac{1}{n} \cdot \sum_1^n X_i$, где $n = 4$ - количество наблюдений в подгруппе – количество осей днища (рисунок 2.1), X_i - измеряемая характеристика качества – величина утонения на оси днища;
- размах подгрупп $R = X_{\max} - X_{\min}$, где X_{\max} и X_{\min} - максимальное и соответственно минимальное значение утонения в исследуемой точке на осях;

- общее среднее подгрупп $\bar{X}_{cp} = \frac{1}{n} \cdot \sum_1^n \bar{X}_i$, где $n = 20$ - количество подгрупп – исследуемых днищ, \bar{X}_i - среднее подгруппы;

- общий средний размах подгрупп $R_{cp} = \frac{1}{n} \cdot \sum_1^n R_i$, где $n = 20$ - количество подгрупп – исследуемых днищ, R_i - размах подгруппы;

- верхняя контрольная граница для карты средних \bar{X} : $UCL = \bar{X}_{cp} + A_2 \cdot R_{cp}$, где $A_2 = 0,729$ для данного числа наблюдений в подгруппе, равного 4 (количество осей днища), - коэффициент для вычисления контрольных границ.

- нижняя контрольная граница для карты средних \bar{X} : $LCL = \bar{X}_{cp} - A_2 \cdot R_{cp}$,
 $UCL = \bar{X}_{cp} + A_2 \cdot R_{cp}$;

- верхняя контрольная граница для карты размахов R : $UCL = D_4 \cdot R_{cp}$, где $D_4 = 2,282$ - коэффициент для вычисления контрольных границ;

- нижняя контрольная граница для карты размахов R : $LCL = D_3 \cdot R_{cp}$, где $D_3 = 0$ - коэффициент для вычисления контрольных границ;

- центральные линии CL для карт соответственно равны \bar{X}_{cp} и R_{cp} .

Исходные расчетные данные представлены в таблице 2.4.

Построенные карты Шухарта представлены на рисунке 2.19.

Нижнюю контрольную границу LCL на R -карту не наносят, если число наблюдений в подгруппе меньше 7, так как соответствующее значение коэффициента D_3 принимают равным нулю согласно методике ГОСТ Р 50779.42 [102].

На \bar{X} -карте верхняя UCL и нижняя LCL контрольные границы установлены на расстоянии 3σ над и под центральной линией CL . Для интерпретации хода процесса по картам Шухарта существует набор дополнительных критериев для выявления особых причин. Для применения этих критериев \bar{X} -карта делится на 6 равных зон шириной σ . Эти зоны обозначаются A, B, C .

Таблица 2.4 – Выборка для статистической обработки экспериментальных данных

№ днща	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
Утонение X, %																					
Ось днща	ОА	2,94	2,92	3,51	2,30	3,90	2,32	2,53	2,19	3,11	2,31	2,67	2,39	2,87	2,40	2,90	2,10	2,90	2,01	2,65	2,68
	ОБ	3,65	2,20	2,30	2,31	2,63	2,30	2,91	2,30	3,20	2,30	2,80	2,80	2,87	2,30	2,90	2,22	2,90	3,20	2,65	2,23
	ОА1	2,21	2,21	2,63	2,73	2,63	2,20	2,54	2,19	3,10	3,30	2,70	1,90	2,30	2,40	2,44	3,12	2,46	2,67	2,65	2,67
	ОБ1	2,22	2,10	3,70	2,10	2,63	2,80	3,96	2,20	3,11	2,30	2,67	2,20	2,87	3,30	2,88	2,00	2,67	1,80	3,54	2,23
Max		3,65	2,92	3,70	2,73	3,90	2,80	3,96	2,30	3,20	3,30	2,80	2,80	2,87	3,30	2,90	3,12	2,90	3,20	3,54	2,68
Min		2,21	2,10	2,30	2,10	2,63	2,20	2,53	2,19	3,10	2,30	2,67	1,90	2,30	2,30	2,44	2,00	2,46	1,80	2,65	2,23
Среднее подгруппы \bar{X}		2,75	2,36	3,04	2,36	2,95	2,41	2,98	2,22	3,13	2,55	2,71	2,32	2,73	2,60	2,78	2,36	2,73	2,42	2,88	2,45
Размах подгруппы R		1,44	0,82	1,40	0,63	1,26	0,60	1,43	0,11	0,10	1,00	0,13	0,90	0,57	1,00	0,46	1,12	0,44	1,40	0,88	0,45
Общее среднее подгрупп \bar{X}_{cp}		2,64																			
Общий средний размах подгрупп R_{cp}		0,81																			
\bar{X} -карта	CL	2,64																			
	UCL	3,23																			
	LCL	2,00																			
R -карта	CL	0,81																			
	UCL	1,84																			
	LCL	0,0																			

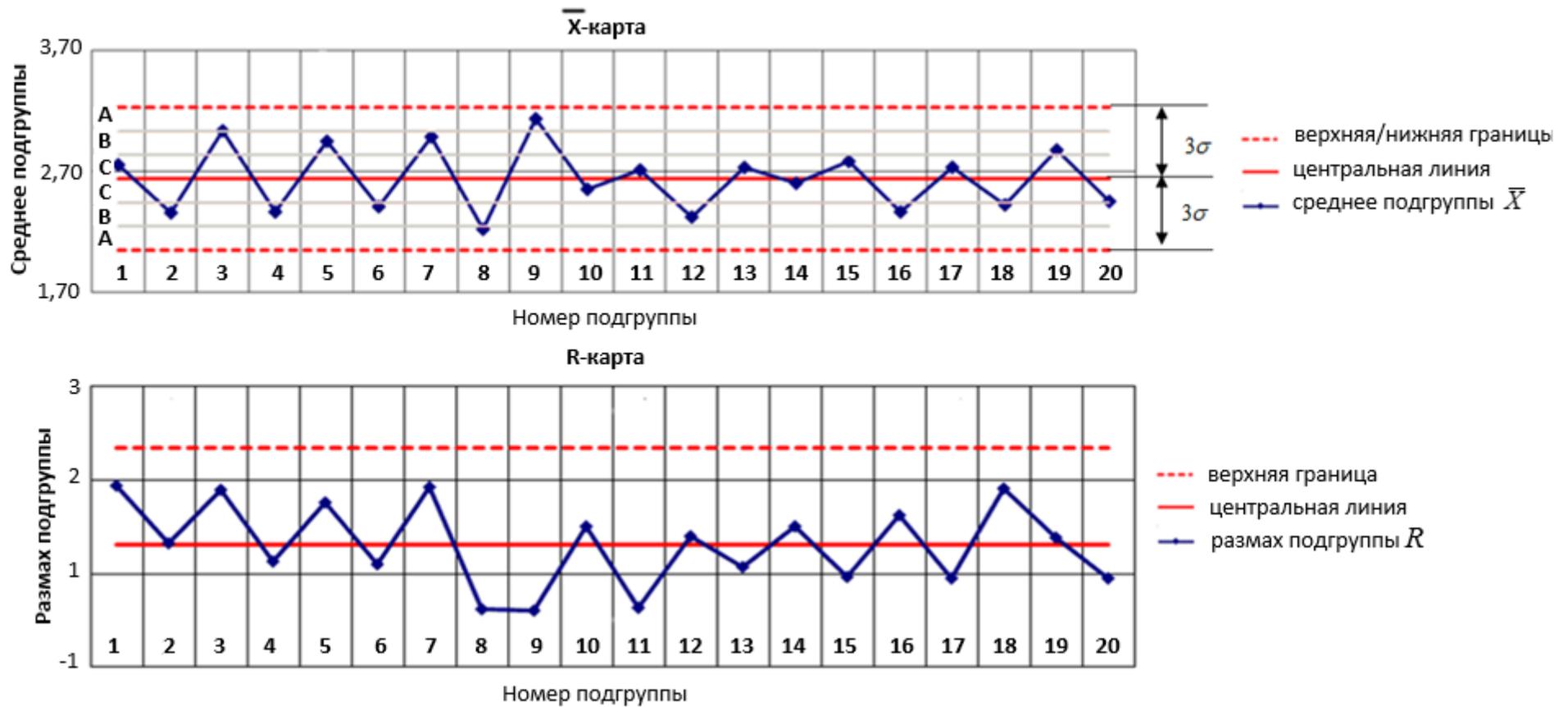


Рисунок 2.19 – Контрольные карты Шухарта

Оценка статистически управляемого состояния процесса производится по ряду критериев, рекомендованных ГОСТ Р 50779.42 [102] и ГОСТ Р 51814.3 [103]:

Критерии для выявления особых причин, воздействующих на процесс:

- нахождение точек за контрольными границами;
- неслучайное поведение или тренды внутри контрольных границ;
- необычное расположение серии точек, свидетельствующие о начале сдвига или тренда процесса (например, 7 точек подряд последовательно возрастают);
- неслучайное поведение точек процесса (например, точки слишком близки к центральной линии CL);

Дополнительные критерии для \bar{X} -карты:

- одна точка вне зоны А;
- 9 точек подряд в зоне С или по одну сторону от центральной линии CL ;
- 6 возрастающих или убывающих точек подряд;
- 14 попеременно возрастающих и убывающих точек;
- 2 из 3 последовательных точек в зоне А или вне ее;
- 4 из 5 последовательных точек в зоне В или вне ее;
- 15 последовательных точек в зоне С выше и ниже центральной линии CL ;
- 8 последовательных точек по обеим сторонам центральной линии CL и ни одной в зоне С.

На построенных контрольных картах Шухарта все точки находятся внутри контрольных пределов, не наблюдается систематических смещений (трендов), признаков выхода процесса из стабильного состояния – точки обеих карт равномерно колеблются относительно центральных линий в интервале 3σ .

Таким образом, процесс штамповки исследуемых днищ является стабильным, функционирующим под воздействием не изменяющейся во времени системы обычных причин, характеризующих собственную изменчивость процесса. Особые причины, влияющие на процесс, отсутствуют. Процесс находится в состоянии статистической управляемости.

2.6 Выводы

Полученные в результате эксперимента данные, результаты исследования свидетельствуют о том, что:

1. Наименьшее утонение имеют днища из аустенитных сталей. Так, днища, штампованные в два перехода, то есть прошедшие два нагрева под штамповку, имеют максимальное утонение в 1,5%. Зона с максимальным утонением расположена на эллиптической части на пересечении образующей с осью, отклоненной на угол $\alpha \sim 50^\circ$ центральной оси днища.

2. Максимальное утонение днищ из углеродистых и низколегированных марганцово-кремнистых сталей, штампованных в один переход, достигает 3,4%, штампованных в два перехода, - 4,3%. Зона с максимальным утонением расположена на эллиптической части на пересечении образующей с осью, отклоненной на угол $\alpha \sim 43^\circ$ относительно центральной оси днища.

3. Величина и характер распределения утонения днищ из двухслойного стального листа – сталь марки 12ХМ с плакирующим слоем из стали марки 08Х18Н10Т, сталь марки 22К с плакирующим слоем из стали марки 08Х18Н10Т соответствуют днищам из углеродистых и низколегированных марганцово-кремнистых сталей.

4. Максимальное утолщение борта исследованных днищ $\sim 9,2\%$. Данная величина влияет на выбор зазора между сменным кольцом и пуансоном.

Показано влияние величины зазора между сменным кольцом и пуансоном на форму эллиптических днищ. Определен допустимый дополнительный односторонний зазор между сменным кольцом и пуансоном.

5. Для получения минимальной толщины стенки днища, необходимой для прочности сосуда или аппарата, при расчете исполнительной толщины днищ из аустенитных сталей технологическую прибавку для компенсации утонения стенки при штамповке допускается снизить с 15% до 7%, для днищ из углеродистых и низколегированных сталей – до 10%. Уточненные величины технологической прибавки учитывают также вероятные повторные штамповки, связанные с

ошибками выполнения технологического процесса, поломкой оборудования, износа оснастки.

6. Статистическая оценка экспериментальных данных показала, что распределение случайной величины - максимального утонения стенки днища - соответствует нормальному закону распределения. Статистическая обработка экспериментальных данных с помощью карт Шухарта показала, что процесс штамповки исследуемых днищ является стабильным, статистически управляемым.

3 КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЯЧЕЙ ШТАМПОВКИ ЭЛЛИПТИЧЕСКОГО ДНИЩА

3.1 Постановка задачи

В данной диссертационной работе поставлена и решена задача по моделированию горячей штамповки эллиптического днища с внутренними базовыми размерами $\varnothing 1600 \times 28$ мм по ГОСТ 6533 [8] из аустенитной стали 12X18H10T в программном комплексе DEFORM-3D.

Начальные и граничные условия задачи:

1) Температурные параметры:

- процесс изотермический;
- температура инструмента 20°C ;
- температура окружающей среды 20°C ;
- температура заготовки 1100°C (на основании требований СТО 00220256-001 [41]).

2) Заготовка.

- модель деформируемой среды – жесткопластическая с деформационно-скоростным упрочнением;
- материал сталь 12X18H10T;
- показатель трения в законе Зибеля $\psi = 0,3$ (графито-масляная смазка), контактные поверхности созданы с матрицей, пуансоном, прижимным кольцом;
- размеры развертки определены по формуле (6), технологический припуск под штамповку $\Delta = 3 \times S$;
- количество конечных элементов в сетке - 120 500, по толщине располагалось 4-5 элементов (рисунок 3.1);

Step -1



Рисунок 3.1 – Расположение элементов сетки по толщине заготовки

3) Инструмент

- модель инструмента – жесткий;
- скорость движения пуансона – 9,5 мм/сек;
- величина шага перемещения главного деформирующего инструмента – пуансона – 4 мм;
- прижим неподвижен.

На рисунке 3.2 представлена модель штампа, в котором выполнялось формирование днища.

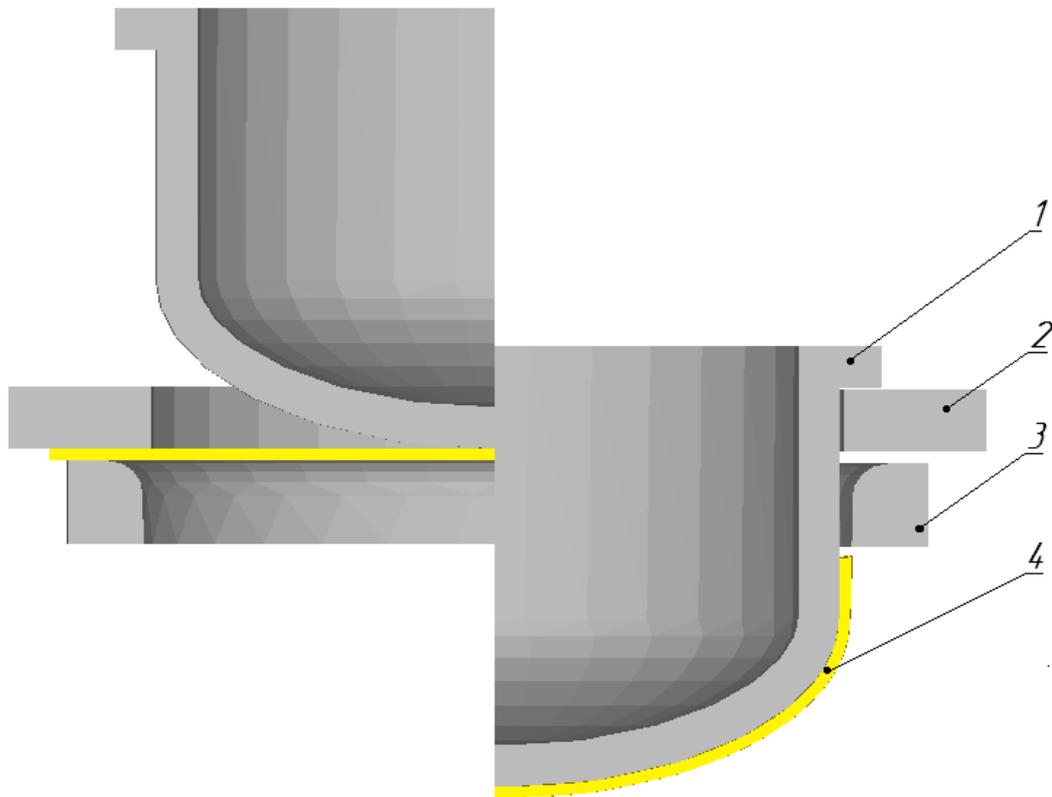


Рисунок 3.2 – Схема штамповки эллиптического днища: 1 – пуансон, 2 – прижим, 3 – матрица, 4 – заготовка днища

Модели оснастки и заготовки выполнены в натуральном масштабе.

Расчет останавливается при выходе борта заготовки из сменного кольца.

3.2 Результаты компьютерного моделирования. Сопоставление результатов теоретического и экспериментального исследований

Рассмотрим результаты моделирования горячей штамповки эллиптического дна $\varnothing 1600 \times 28$ мм в программном комплексе DEFORM-3D.

На рисунке 3.3 представлены основные этапы деформации дна:

- а) шаг задачи 2 (step 2) – начало штамповки, касание пуансоном заготовки;
- б) шаг задачи 66 (step 66) – формирование эллиптической части дна;
- в) шаг задачи 130 (step 130) – формирование цилиндрической части дна (борта);
- г) шаг задачи 200 (step 200) – выход борта дна из сменного кольца - окончание деформации.

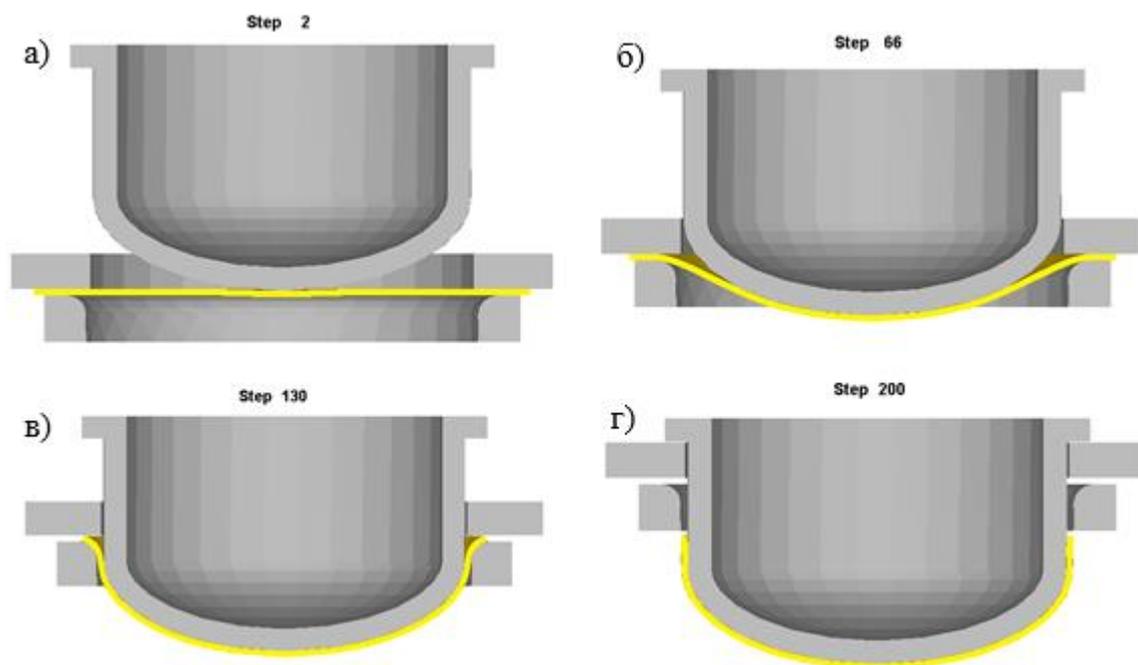


Рисунок 3.3 – Основные этапы деформации эллиптического дна

Модель штампованного дна, полученного в результате расчетов в DEFORM-3D, представлена на рисунке 3.4.

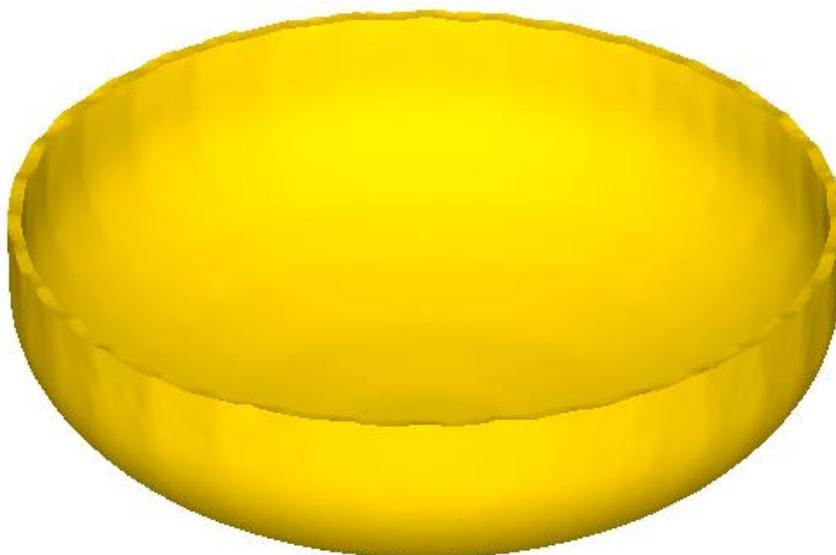


Рисунок 3.4 – Модель штампованного днища

Остывание днища до температуры измерений, равной не более 40°C , обеспечивающее усадку днища, не моделировалось, поэтому конечные размеры днища соответствуют номинальным размерам пуансона.

Для оценки отклонений формы днища и величины изменения толщины в результате штамповки на последнем шаге задачи в объекты была введена модель шаблона, которая позволила измерить необходимые параметры.

3.2.1 Форма модели штампованного днища

Форма модели штампованного днища соответствует требованиям ГОСТ 34347 [14]: отдельные вогнутости или выпуклости на эллипсоидной части T , наклон борта Δm , зазоры между шаблоном и эллипсоидной поверхностью Δr и ΔR отсутствуют (таблицы 1.1, 1.2, 1.3). При штамповке днища образовались гофры высотой до 0,83 мм (в пределах допуска согласно ГОСТ 34347 [14]), которые не выправились в результате прохождения через матрицу.

3.2.2 Силовые параметры рассчитанного процесса штамповки

На рисунке 3.5 представлены графики силовых параметров рассчитанного процесса из пост-процессора DEFORM-3D. Согласно данным графикам требуемые силы штамповки и прижима заготовки – переменные, что согласуется с данными источников [15, 16, 106]. Точки экстремумов на графиках наблюдаются на 116 шаге расчета, когда ход пуансона составил 464 мм.

В процессе штамповки сила деформирования изменяется и достигает своего максимума при повороте кромок заготовки на угол $\sim 70^\circ$ (см. рисунки 3.6, 3.7), что согласуется с данными источника [2]. В этот момент линия перехода от цилиндрической к эллиптической части пуансона находится приблизительно на уровне центра радиуса скругления рабочей кромки матрицы, что согласуется с данными источника [36]. На данном этапе гофры, образовавшиеся в процессе штамповки, выпрямились в зазоре между сменным кольцом и пуансоном, формируется утолщенный борт.

Как видно из графика, представленного на рисунке 3.5, сила вытяжки днища $\varnothing 1600 \times 28$ мм из стали 12X18H10T, рассчитанная при моделировании технологического процесса в DEFORM-3D, составляет 7,14 МН (рисунок 3.5). По опыту ПАО «Уралхиммаш» для штамповки указанного днища требуется сила вытяжки, равная 6,22 МН (определено при подаче давления рабочей жидкости в главном цилиндре прессы). Соответственно, сила вытяжки днища, рассчитанная в DEFORM-3D больше на 15% производственных данных предприятия, что свидетельствует о достаточной сходимости результатов расчетов в программе DEFORM-3D относительно производственного опыта ПАО «Уралхиммаш».

Сила прижима $P_{np\ DEFORM}$, рассчитанная при моделировании технологического процесса в DEFORM-3D, является переменной, максимальное значение - 3,88 МН (рисунок 3.5).

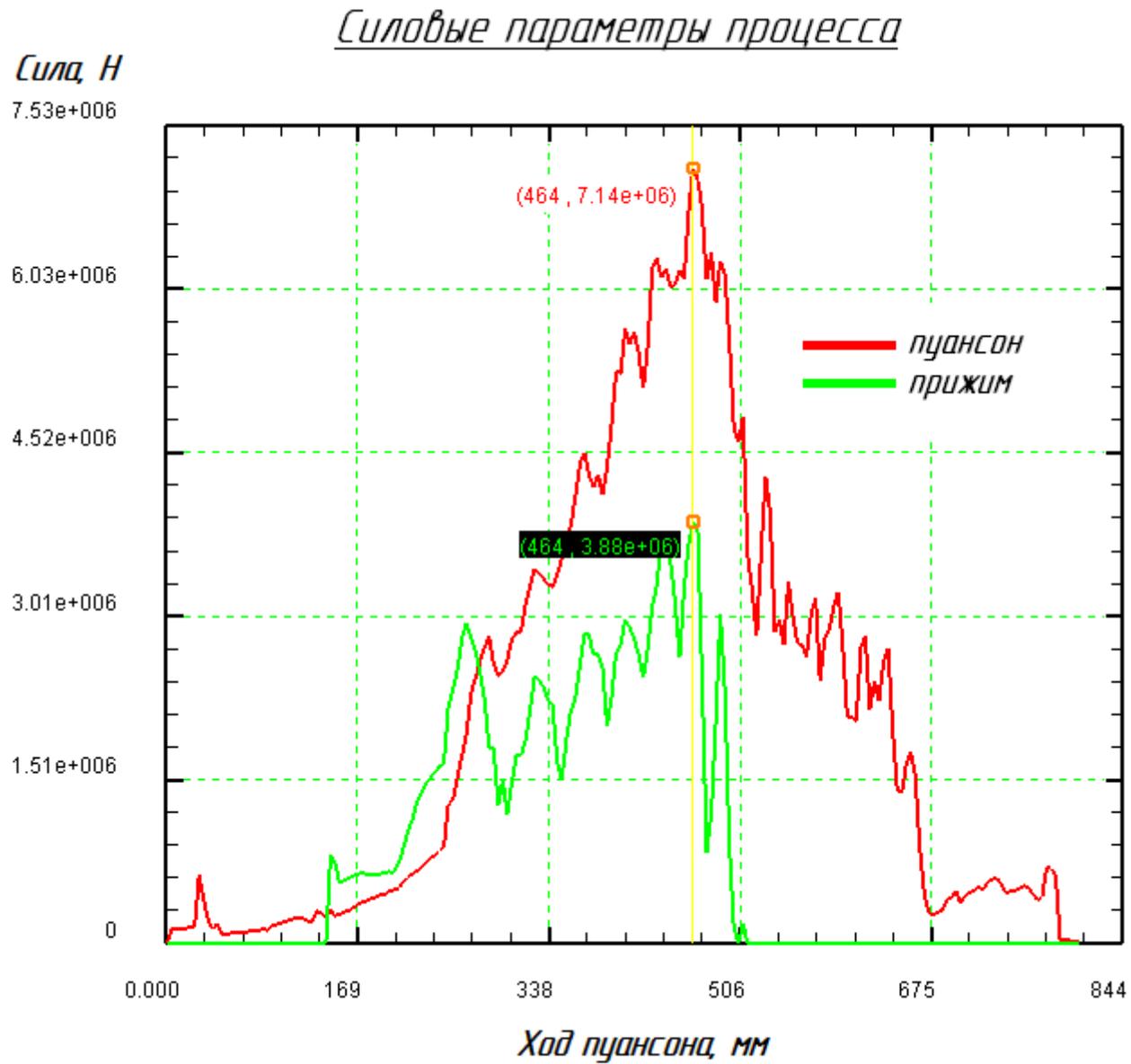


Рисунок 3.5 -Силловые параметры процесса штамповки, рассчитаного в DEFORM-3D

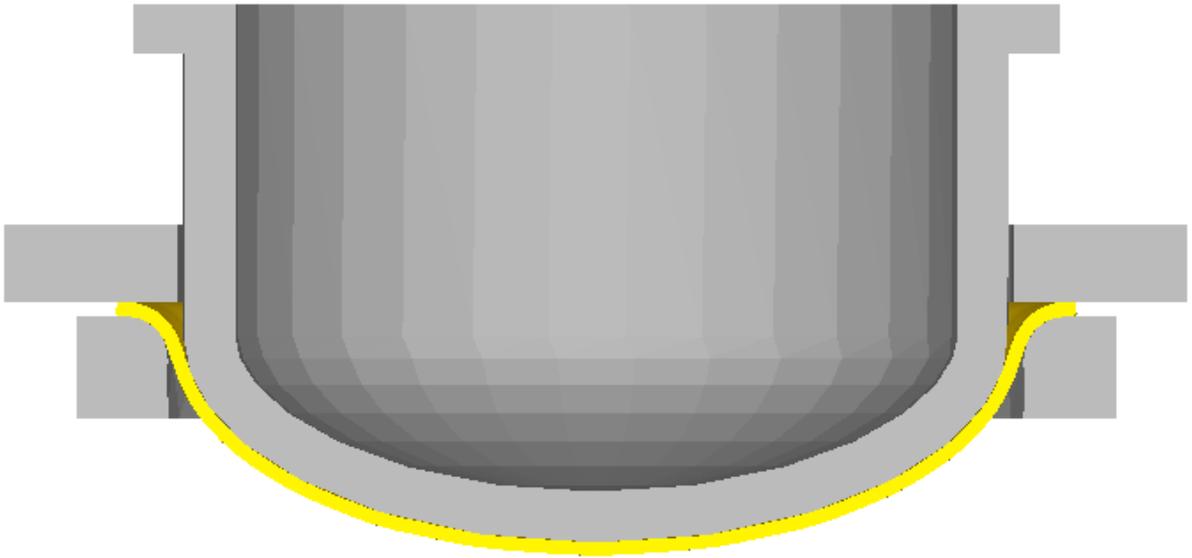
Step 116

Рисунок 3.6 – Модель штампа и заготовки на 116 шаге расчета

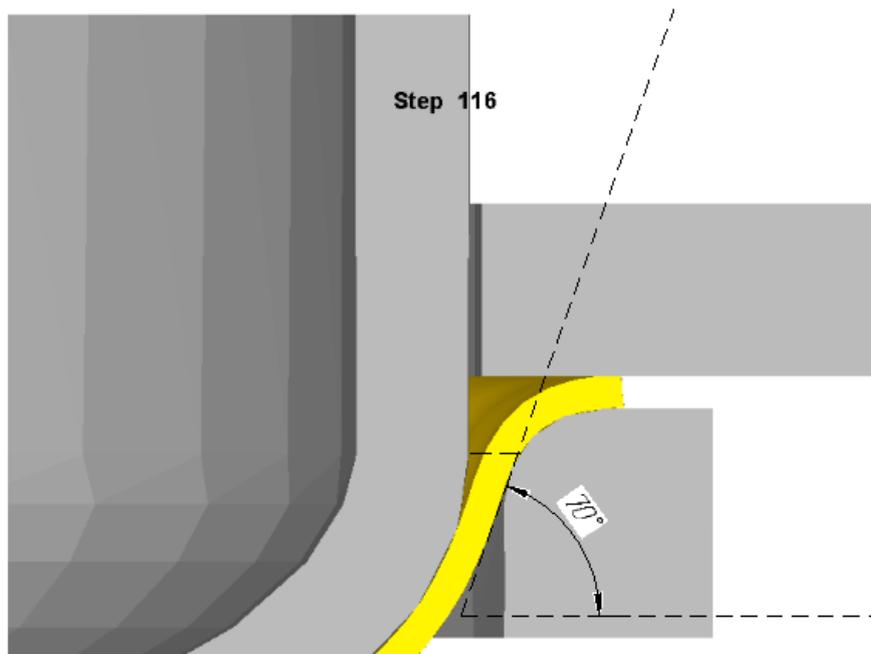


Рисунок 3.7 – Очаг деформации заготовки на 116 шаге расчета

3.2.3 Изменение толщины модели штампованного днища

По результатам измерений в пост-процессоре DEFORM-3D модели штампованного днища построена кривая, характеризующая разнотолщинность стенки в меридиональном сечении, и представлена на рисунке 3.8.

Из представленного рисунка 3.8 можно сделать вывод, что расположение характерных зон изменения толщины соответствует ранее проведенным исследованиям – утонение наблюдается в донной части днища, в зоне перехода эллиптической части в цилиндрическую, а на борту днища – утолщение.

Зона с максимальным утонением в 1,4% расположена на эллиптической части на пересечении образующей с осью, отклоненной на угол $\alpha \sim 43^\circ$ относительно центральной оси днища. Утолщение борта составляет 4,4%. Утолщение борта измерено на максимальной высоте. Высота борта по результатам моделирования составляет 148 мм – величина сопоставима с реальными производственными данными, с учетом назначаемого припуска под штамповку и величину утонения стенки.

При сравнении кривых, характеризующих разнотолщинность стенки в меридиональном сечении, полученных в результате производственного опыта и в результате моделирования наблюдаются следующее: расчетное утонение меньше экспериментального не более чем на 0,4%, расчетное утолщение меньше экспериментального в среднем на 4,4% (рисунок 3.9).

Тем самым подтверждаются данные источников [15, 16, 106], о том, что использование переменного в процессе штамповки прижима позволяет снизить утонение стенки днища.

В экспериментальных исследованиях также было отмечено, что для днищ из аустенитных сталей зона с максимальным утонением расположена на эллиптической части на пересечении образующей с осью, отклоненной на угол $\alpha \sim 50^\circ$ относительно центральной оси днища (рисунок 2.10), а на модели днища в DEFORM-3D – на угол $\alpha \sim 43^\circ$.

Таким образом, сравнение расчетных и экспериментальных данных показало достаточную для практики точность результатов моделирования.

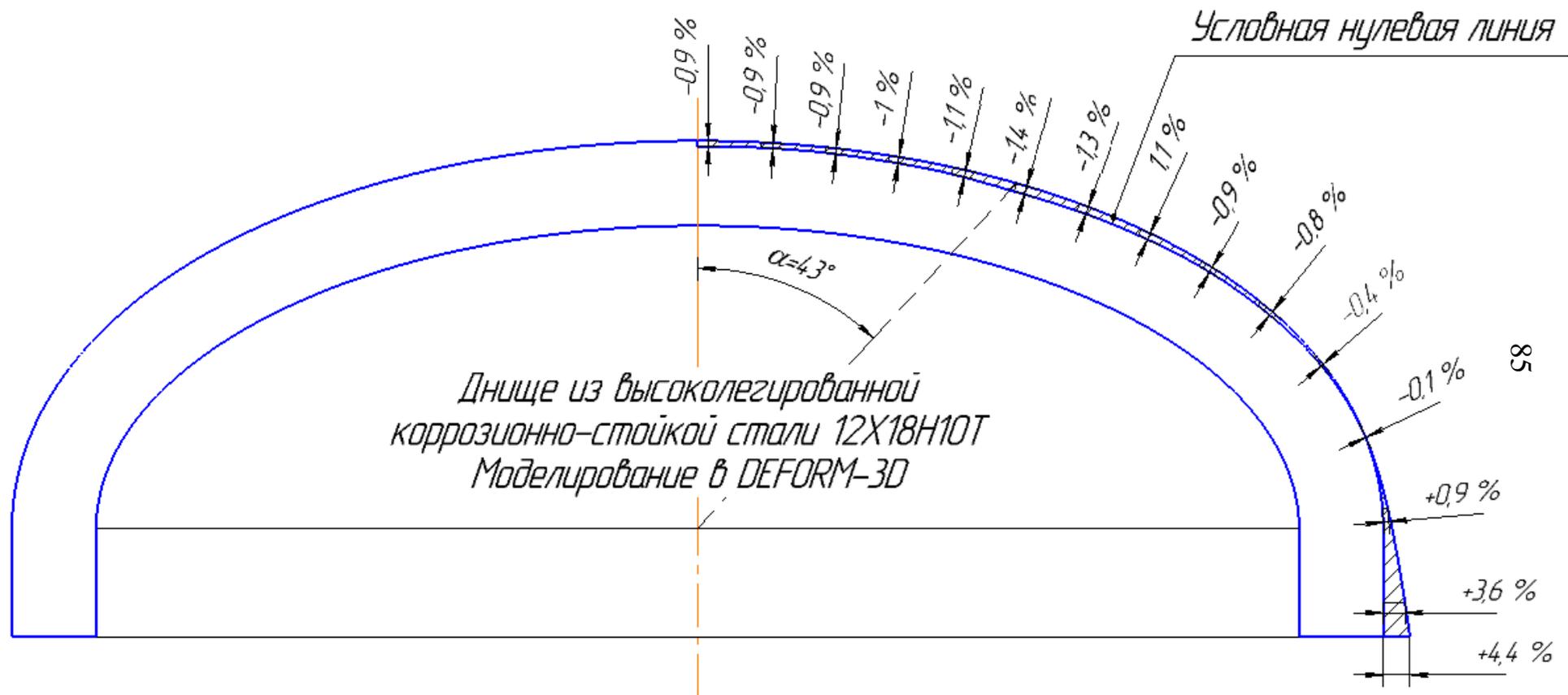
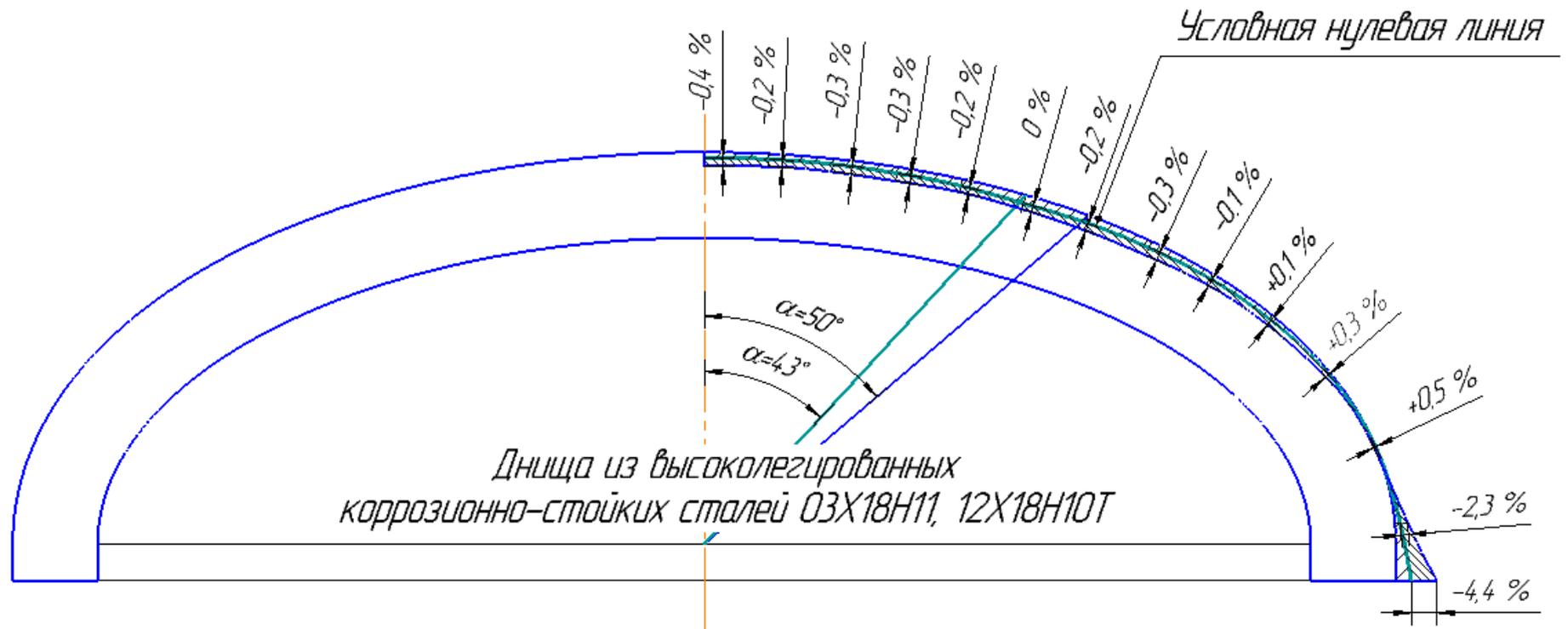


Рисунок 3.8 - Относительное изменение толщины стенки модели днища из стали 12X18H10T



- Моделирование штамповки днища в один переход в DEFORM-3D
- Штамповка днища в два перехода на производстве ПАО "Уралхиммаш"

Рисунок 3.9 – Относительное изменение толщины стенки модели днища и днищ, штампованных на производстве

3.2.4 Анализ распределения показателей напряженно-деформированного состояния по объему днища

В настоящем разделе рассмотрено распределение по объему днища следующих показателей: поврежденности, интенсивности деформации, компонентов тензора напряжений.

На рисунке 3.10 представлен график, полученный из пост-процессора рассчитанной задачи «Поврежденность («Damage»»). В DEFORM-3D критерием разрушения по умолчанию является критерий Кокрофта-Латама.

Анализ распределения, приведенного на рисунке 3.10, показывает, что наиболее опасные зоны с точки зрения разрушения располагаются на борту днища, в местах гофр, которые при прохождении через зазор между пуансоном и матрицей расправились. Имеются участки с максимальным показателем поврежденности, равным 0,585.

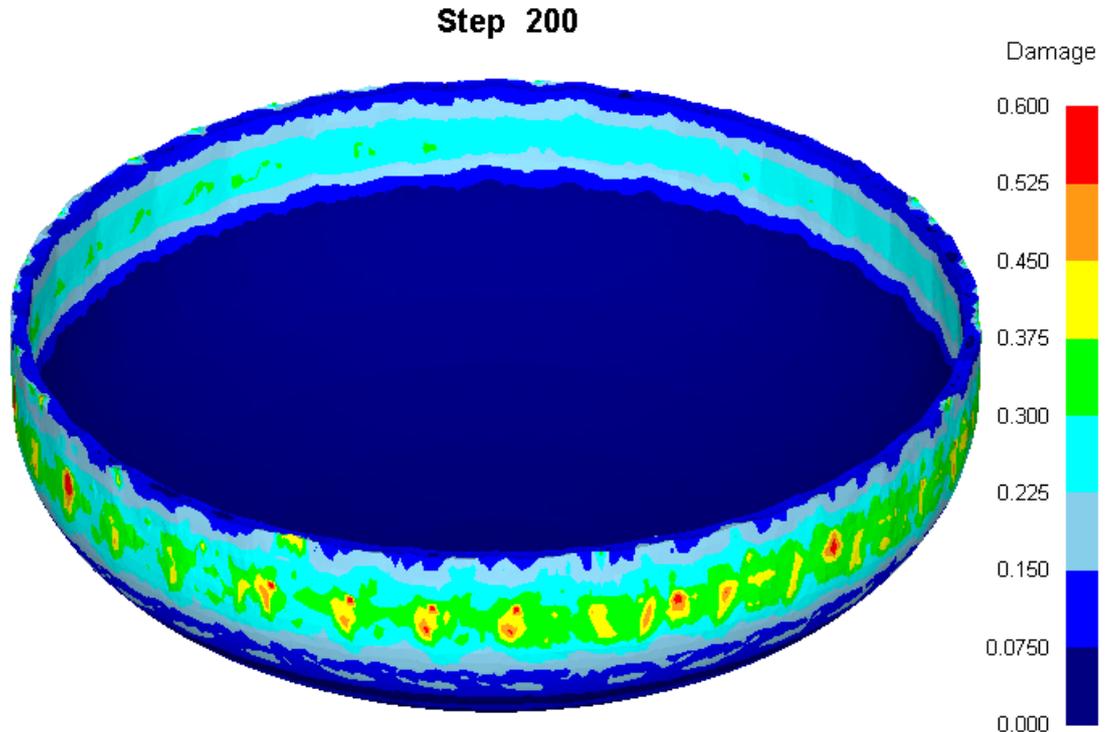


Рисунок 3.10 – Распределение поврежденности модели штампованного днища

На рисунке 3.11 представлен график пост-процессора рассчитанной задачи «Интенсивность деформации» («Strain Effective»). Данные графика свидетельствуют о том, что зоны с максимальной интенсивностью деформации, равной 0,885, располагаются на участках образования гофр на цилиндрическом борту днища.

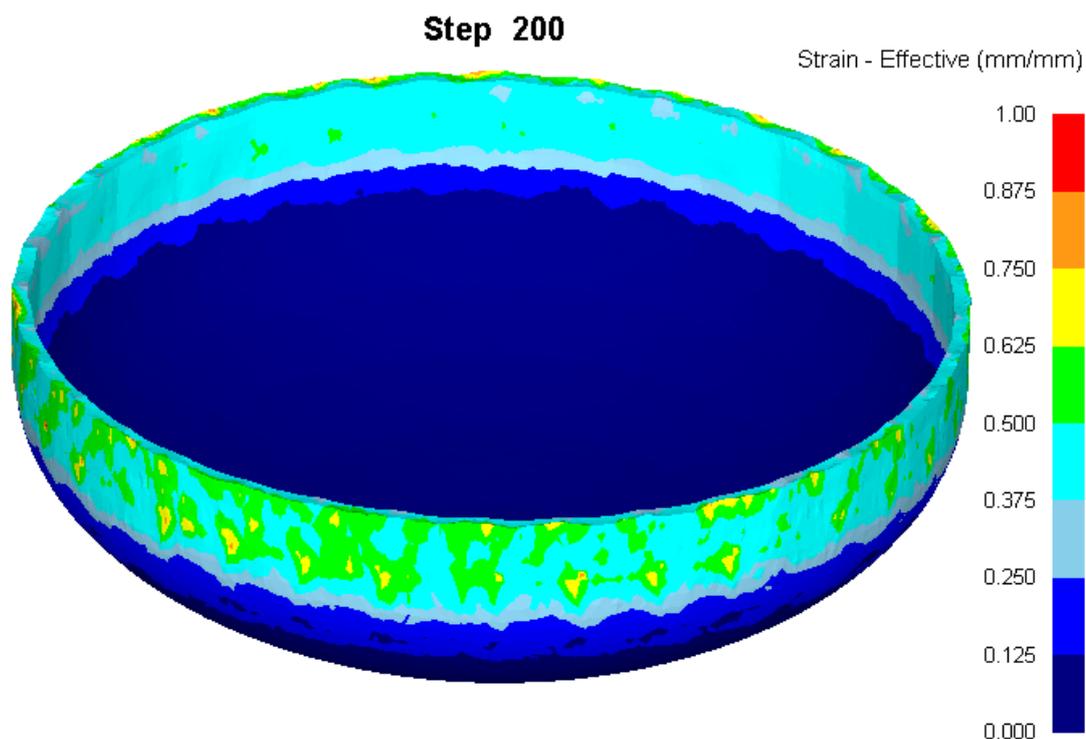


Рисунок 3.11 – Распределение интенсивности деформации модели штампованного днища

На рисунках 3.12, 3.13, 3.14 представлены графики пост-процессора рассчитанной задачи «Напряжение» («Stress»). Рассмотрим распределение компонентов тензора напряжений σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} , возникающих в днище при его штамповке на 116 шаге задачи, когда силы штамповки и прижима достигают своего максимума, и начинается формирование борта.

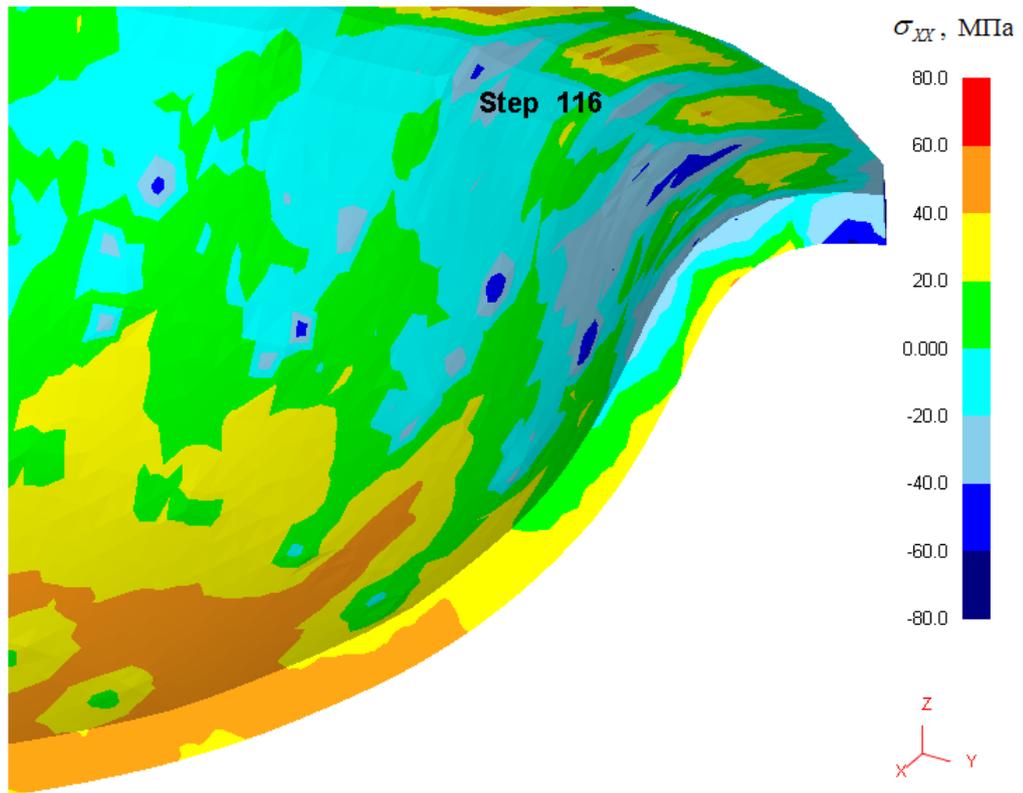


Рисунок 3.12 - Распределение напряжений σ_{xx} по объему днища

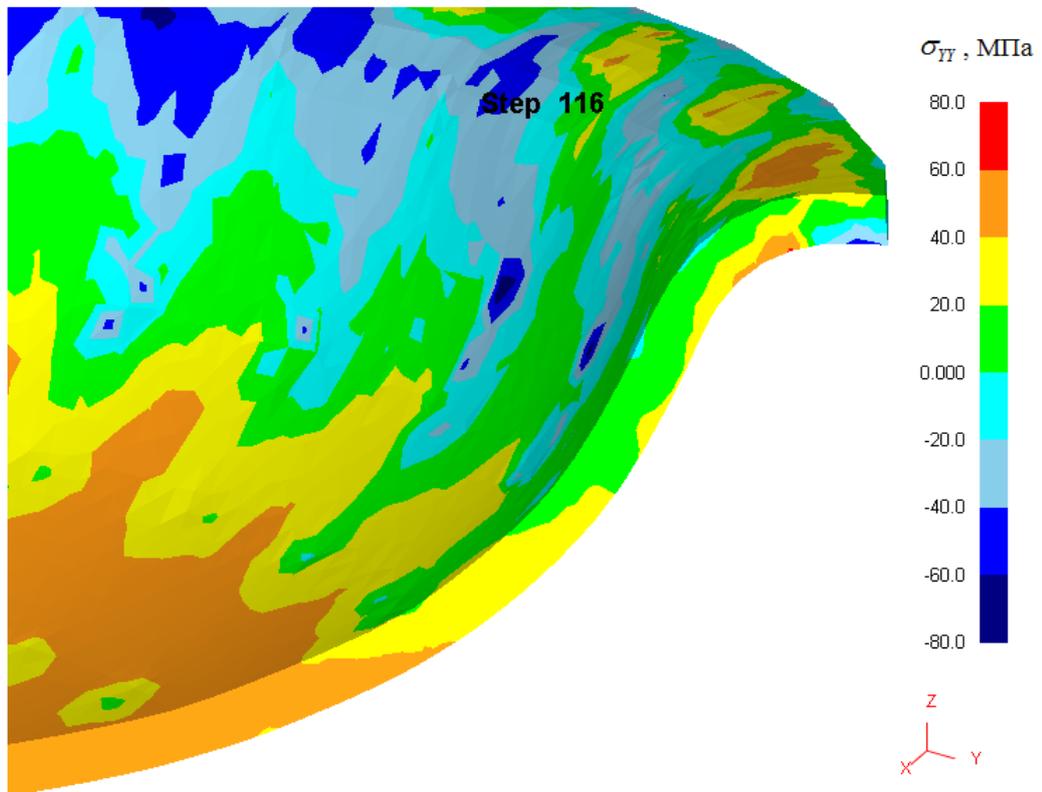


Рисунок 3.13 - Распределение напряжений σ_{yy} по объему днища

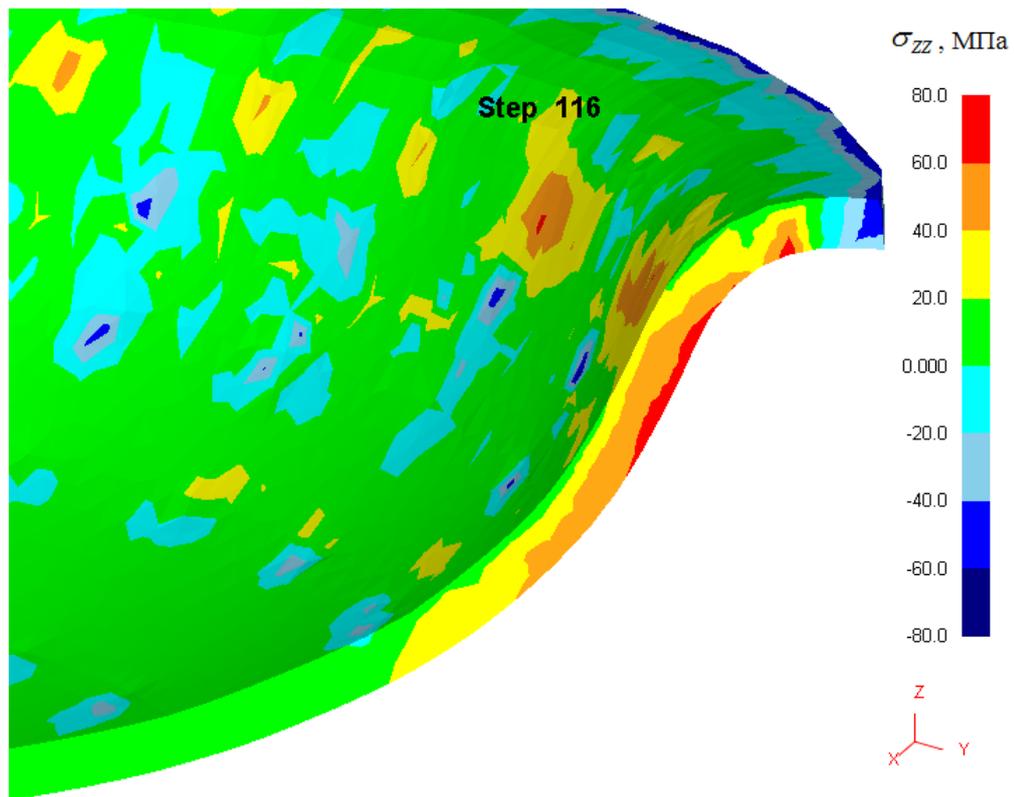


Рисунок 3.14 - Распределение напряжений σ_{ZZ} по объему днища

В зоне перехода от эллиптической к цилиндрической части днища по всему объему преобладают растягивающие напряжения: $\sigma_{XX} = 50,1$ МПа, $\sigma_{YY} = 44,7$ МПа, $\sigma_{ZZ} = 17,1$ МПа. В зоне, где металл огибает радиус скругления на сменном кольце, по осям X , Y преобладают сжимающие напряжения: $\sigma_{XX} = -17,4$ МПа, $\sigma_{YY} = -36,4$ МПа, а по оси Z растягивающие - $\sigma_{ZZ} = 10,7$ МПа. На краю борта днища преобладают сжимающие напряжения: $\sigma_{XX} = -76,1$ МПа, $\sigma_{YY} = -69,3$ МПа, $\sigma_{ZZ} = -64,8$ МПа.

Данное распределение напряжений объясняет расположение зоны с максимальным утонением на переходной части днища, зоны с утолщением на борту днища.

3.3 Выводы

В данной главе выполнено моделирование горячей штамповки эллиптического днища с внутренними базовыми размерами $\varnothing 1600 \times 28$ мм по ГОСТ 6533 [8] из аустенитной стали 12X18H10T в программном комплексе DEFORM-3D.

Полученные в результате моделирования данные свидетельствуют о том, что:

1. Расчетное расположение характерных зон изменения толщины стенки днища соответствует ранее проведенным экспериментальным исследованиям.

При сравнении кривых, характеризующих разнотолщинность стенки в меридиональном сечении, полученных в результате производственного опыта и в результате моделирования, наблюдается высокая сопоставимость результатов: расчетное утонение меньше экспериментального не более чем на 0,4%, расчетное утолщение меньше экспериментального в среднем на 4,4%.

2. Требуемые силы вытяжки и прижима заготовки, рассчитанные в DEFORM-3D, изменяются в процессе штамповки днища и достигают максимального значения, когда ход пуансона составил 464 мм, при повороте кромок заготовки на угол $\sim 70^\circ$.

Требуемая сила вытяжки днища, рассчитанная в DEFORM-3D, составляет 7,14 МН, что на 15% больше величины силы вытяжки, полученной в результате производственной практики ПАО «Уралхиммаш», что свидетельствует о достаточной сходимости результатов расчетов.

Сила прижима, рассчитанная при моделировании технологического процесса в DEFORM-3D, является переменной, максимальное значение - 3,88 МН.

3. Результаты моделирования показывают, что штамповка днищ с переменным усилием прижима заготовки способствует получению днища с меньшим утонением, без вогнутостей, выпуклостей, высота гофр - в пределах допуска.

4. Анализ распределения поврежденности и интенсивности деформации по объему днища показывает, что наиболее опасные зоны с точки зрения разрушения

располагаются на борту днища на участках гофр, разглаженных при прохождении через зазор между пуансоном и матрицей. Анализ распределения компонентов тензора напряжений σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} в момент, когда силы штамповки и прижима достигают своего максимума, объясняет расположение зоны с максимальным утонением на переходной части днища, утолщение борта.

4 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА

В результате проведения экспериментальных исследований главы 2 показана возможность снижения исполнительной толщины заготовок горячештампованных эллиптических днищ [104, 105]. Для разработки рекомендаций, направленных на улучшение существующего технологического процесса изготовления горячештампованных днищ, выполнены дополнительные исследования:

- проведены производственные опытные работы в части защиты поверхности заготовок при помощи покрытий для снижения окалинообразования;
- проанализирован опыт изготовления многослойных заготовок при штамповке тонкостенных днищ, позволяющих снизить риск местных утонений и разрыва металла;
- освоен и опробован современный подход к оценке качества продукции с использованием комплексных показателей применительно к горячештампованным эллиптическим днищам.

4.1 Защита поверхности заготовок при помощи покрытий

В представленных результатах исследований [58, 107-114] выделяют две группы методов в направлении защиты металла от окалинообразования в процессе нагрева заготовок перед штамповкой:

- методы малоокислительного нагрева – улучшение конструкций и условий эксплуатации нагревательного оборудования, применение скоростных и ускоренных режимов нагрева;
- методы безокислительного нагрева – нагрев в среде защитных газов, продуктов неполного сгорания топлива, применение защитных покрытий, обмазок.

Применяемое защитное покрытие должно отвечать следующим требованиям:

- стабильность состава и свойств,
- жаростойкость,
- простота приготовления,
- легкостью нанесения на заготовку,
- простота удаления со штампованных деталей,
- отсутствие вредного воздействия на персонал, металл, оснастку и пресловое оборудование,
- экономичность.

При этом покрытие не должно уменьшать эффективный коэффициент теплопередачи.

В рамках данной диссертационной работы в ПАО «Уралхиммаш» проводились работы по снижению окисления и образованию окалины при нагреве заготовок под штамповку за счет защиты поверхности заготовок при помощи покрытий.

Достаточно высокую эффективность в части снижения окисления металла нагреваемых в печи заготовок, а также для облегчения съема окалины с поверхности заготовки (снижения сцепления окалины с поверхностью заготовки) - показал вязкий водно-меловой раствор сметанообразной густоты.

Опытные работы проводились с днищем Ø3000×110 мм из стали 22К. Покрытие перед штамповкой наносили валиками на заготовку с обеих сторон и на торец, выжидали в течение ~5...7 минут до полного испарения воды с поверхности. Далее заготовку нагревали в печи до температуры 950...1050°С с выдержкой из расчета 2 мин на 1 мм толщины заготовки (220 мин), и штамповали по технологии за один переход. По результатам работ отмечено снижение толщины образованной окалины с 1,2 мм по глубине до 0,6 мм, то есть на 50%.

Аналогичные результаты получены при опытных работах с днищем Ø2800×55 мм из стали 12ХМ. Заготовку с нанесенным покрытием нагревали в печи до температуры 1000...1050°С с выдержкой из расчета 1,5 мин на 1 мм толщины заготовки (82,5 мин), и штамповали по технологии за один переход. По

результатам работ отмечено снижение толщины образованной окалины с 0,8 мм по глубине до 0,4 мм, то есть на 50%.

Компоненты мелового раствора не дороги, не требуется специальной подготовки поверхности заготовки, отсутствуют дополнительные затраты по удалению покрытия со штампованной детали – меловой раствор не внедряется в поверхность заготовки, удаляется при деформации вместе с окалиной и далее при дробеструйной очистке поверхности.

В связи с этим в работе предлагается внедрение меловых растворов для снижения окалинообразования заготовок днищ при нагреве в печи перед штамповкой.

Высокую эффективность также показали теплоизоляционные покрытия. Теплоизоляционные покрытия используются с целью уменьшения интенсивности остывания заготовок тонкостенных днищ из аустенитных сталей. Применяется покрытие следующего состава: тальк порошок – 82%, бентонит – 4,5%, жидкое стекло сульфатное – 10%, измельченная древесина – 3,5%, добавляется также вода для разжижения компонентов. Покрытие перед штамповкой наносили кистью на заготовку с обеих сторон и на торец, выжидали в течение ~5...7 минут до полного высыхания покрытия. Далее заготовку нагревают по режиму и штампуют. Покрытие наносят перед всеми переходами штамповки.

В рамках данной диссертационной работы проведены измерения изменения толщины 3-х днищ с размерами $\varnothing 2000 \times 10$ мм из стали 12X18H10T. В результате было отмечено полное отсутствие окалины на заготовке.

Компоненты указанного теплоизоляционного покрытия не дороги, не требуется специальной подготовки поверхности заготовки, удаляется при дробеструйной очистке.

В связи с этим в работе предлагается применение данного термоизоляционного покрытия для нанесения на заготовки толстостенных днищ перед нагревом в печи для защиты от окисления металла.

4.2 Изготовление многослойной заготовки

При предъявлении особых требований к утонению стенки днища при горячей штамповке, а также при штамповке тонкостенных днищ, когда высока вероятность образования местных утонений или разрывов металла, изготовление многослойной заготовки обеспечивает получение штампованного изделия с минимальным утонением.

На ПАО «Уралхиммаш» этот метод применяется при изготовлении тонкостенных днищ. Изготовление тонкостенных эллиптических горячештампованных днищ представляет собой сложную технологическую задачу, требующую особого подхода.

Нагретая заготовка тонкостенного днища быстро остывает при переносе от печи к прессу, во время центрирования заготовки на матрице и при дальнейшей деформации, что при штамповке может привести к несоответствию формы – вогнутостей, выпуклостей на эллиптической части днища, гофры на борту, окончанию штамповки при температуре, ниже регламентируемой нормативной документацией, местным утонениям или даже к разрывам металла стенки днища из-за передавливания заготовки прижимом. В работе [23] представлены результаты исследования температурных полей в заготовке днища при ее переносе от печи к прессу.

На ПАО «Уралхиммаш» успешно решена задача по изготовлению тонкостенных эллиптических горячештампованных днищ с внутренними базовыми размерами $\text{Ø}1600 \times 8$ мм по ГОСТ 6533 [8] из стали 38ХНМ [115].

Для штамповки указанных днищ на ПАО «Уралхиммаш» применили технологию, внедренную еще в 60^х гг. на ПАО «Ижорские заводы» - штамповка сварной «слоеной» заготовки с технологическими днищами. Данная технология применялась на Ижорском заводе с целью экономии сроков выполнения заказов и затрат на изготовление оснастки для штамповки днищ нестандартных размеров или при отсутствии необходимой оснастки [34, 116].

На рисунке 4.1 представлен эскиз «слоистой» заготовки.

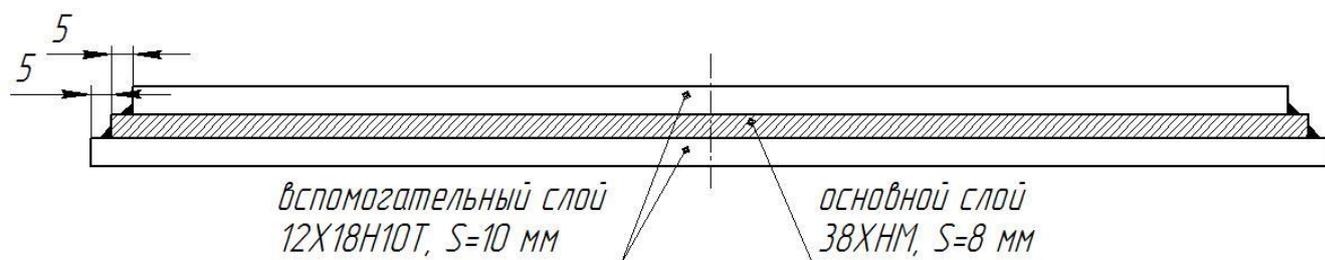


Рисунок 4.1 - «Слоистая» заготовка днища

По результатам технического контроля профиль днищ соответствовал требованиям ГОСТ 6533 [8], отклонения размеров и формы днищ не превышали значений, регламентированных ГОСТ 34347 [14].

При этом максимальное утонение на эллипсоидной части составило не более 0,9%.

4.3 Оценка качества горячештампованных эллиптических днищ с использованием комплексных показателей

Интегрированная система менеджмента ПАО «Уралхиммаш» функционирует в соответствии с требованиями международных, национальных и отраслевых стандартов на системы менеджмента. Система менеджмента предприятия соответствует требованиям стандартов на системы менеджмента качества – ISO 9001 [117], ГОСТ Р ИСО 9001 [118], СТО Газпром 9001 [119], ГОСТ РВ 0015-002 [120]. Указанные стандарты рекомендуют применять статистические методы для поддержки деятельности предприятия.

На предприятии реализован статистический анализ технологических процессов (операций), продукции. Статистические методы позволяют оценить возможности технологических процессов (например, статистическую управляемость, стабильность, воспроизводимость), тенденции изменения и улучшения процессов, характеристик выпускаемой продукции. Основная цель такого анализа - выявить резервы повышения качества продукции за счет совершенствования технологических процессов на всех стадиях обработки.

Применяемые на предприятии методы: контрольный листок, диаграмма Парето, схема Исикавы, гистограмма, график корреляции, круговая диаграмма, диаграмма разброса (рассеивания), метод стратификации (расслоения), контрольные карты Шухарта.

В последние годы качество продукции все чаще оценивается комплексными показателями с применением принципов квалиметрии [121]. Их использование позволяет более объективно оценивать и сравнивать качество продукции по совокупности показателей для различных вариантов технологических процессов по единой шкале. Комплексная оценка качества металлопроката проведена, например, в работах [122-126] и многих других. Комплексная оценка качества продукции по средневзвешенным показателям особо эффективна в тех случаях, когда затруднительно или невозможно определить определяющий показатель качества (по ГОСТ 15467 [127]) и его функциональную зависимость от исходных показателей качества.

Автором освоен и опробован вышеописанный подход к оценке качества продукции с использованием комплексных показателей применительно к горячештампованным эллиптическим днищам.

В качестве объекта исследования выбрали горячештампованное эллиптическое днище с внутренними базовыми размерами $\text{Ø}4000 \times 22$ мм (рисунок 4.2), выпускаемое по ГОСТ 6533 [8], марка стали 20К, категории 18, с определением предела текучести при температуре 200°C [128-130]. Днище изготовлено из проката листового ПН-0-22 по ГОСТ 19903 [131], назначение – применяется в сосудах и аппаратах стальных сварных, изготавливаемых по ГОСТ 34347 [14]. Днище сварное, вариант раскроя - «в» по ГОСТ 34347 [14].

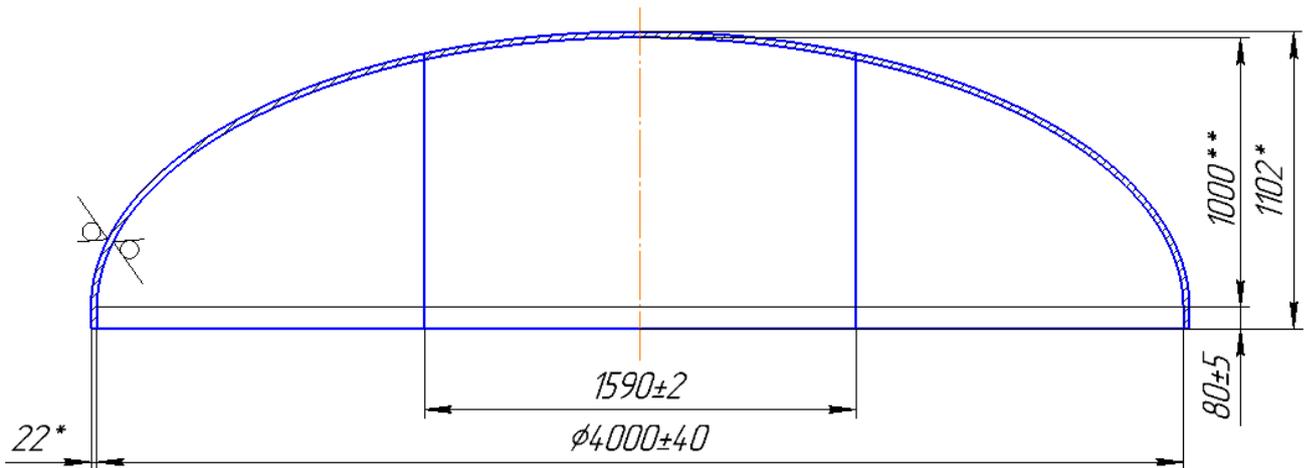


Рисунок 4.2 – Эллиптическое днище с размерами $\text{Ø}4000 \times 22$ мм

Методика комплексной оценки качества продукции [121] предусматривает на первом этапе выбор номенклатуры показателей качества в соответствии с ГОСТ 22851 [132] для данного типа промышленной продукции, определенного по Общероссийскому классификатору промышленной продукции ОКПД-2 (код 28.99.39.190). Далее – на втором этапе построили иерархическую структуру показателей качества и определили 17 единичных показателей качества, расположенных на третьем уровне, рассмотренных в данной работе (рисунок 4.3).

Далее с целью оценки единичных свойств по единой шкале провели нормирование показателей качества в интервале $(0 \dots 1)$ относительно разброса допусковых ГОСТ значений свойств [122]. Для этого по известным минимальным x_{\min} и максимальным x_{\max} допусковым значениям определили эталонные x_e и браковочные $x_{\text{бр}}$ значения свойств в натуральном выражении – таблица 4.1.

		<i>Ярусы иерархической структуры</i>				
		<i>нулевой</i>	<i>1-ый</i>	<i>2-ой</i>	<i>3-ий</i>	
<i>комплексный показатель k_0</i>	<i>показатели назначения</i>				<i>диаметр</i>	k_1
					<i>относительная овальность</i>	k_2
					<i>высота борта</i>	k_3
					<i>высота гофры на борту</i>	k_4
					<i>высота отдельной выпуклости/вогнутости на эллипсоидной части</i>	k_5
					<i>точность</i>	
					<i>наклон цилиндрической части</i>	k_6
					<i>зазоры между шаблоном и эллипсоидной частью</i>	k_7, k_8
					<i>утонение в зоне отбортовки</i>	k_9
					<i>предел текучести при +20°С</i>	k_{10}
					<i>временное сопротивление при +20°С</i>	k_{11}
					<i>механические свойства</i>	
					<i>относительное удлинение</i>	k_{12}
					<i>ударная вязкость КСЧ при +20°С</i>	k_{13}
					<i>ударная вязкость КСЧ после механического старения при +20°С</i>	k_{14}
					<i>предел текучести при +200°С</i>	k_{15}
					<i>качество поверхности</i>	
			<i>глубина поверхностных дефектов</i>	k_{16}		
			<i>технологичность</i>			
			<i>коэффициент использования металла</i>	k_{17}		

Рисунок 4.3 – Иерархическая структура показателей качества горячештампованных эллиптических днищ с размерами $\text{Ø}4000 \times 22$ мм

Таблица 4.1 – Перечень единичных свойств для оценки качества горячештампованного эллиптического днища с размерами $\text{Ø}4000 \times 22$ мм

N	Свойство	x_{\min}	x_{\max}	x_9	$x_{\text{ор}}$	Формула для расчета k_i
1	Отклонение внутреннего диаметра ΔD_g , мм	0	40	0	41	$k_1 = 1 - \frac{x_{\text{факт}}}{41}$
2	Относительная овальность, %	0	1	0	1,1	$k_2 = 1 - \frac{x_{\text{факт}}}{1,1}$
3	Отклонение высоты борта Δh , мм	0	5	0	6	$k_3 = 1 - \frac{x_{\text{факт}}}{6}$
4	Высота гофры на цилиндрической части, мм	0	2	0	3	$k_4 = 1 - \frac{x_{\text{факт}}}{3}$
5	Высота отдельной вогнутости или выпуклости на эллипсоидной части T , мм	0	4	0	5	$k_5 = 1 - \frac{x_{\text{факт}}}{5}$
6	Наклон цилиндрической части Δm , мм	0	5	0	6	$k_6 = 1 - \frac{x_{\text{факт}}}{6}$
7	Зазор между шаблоном и эллипсоидной частью Δr , мм	0	16	0	17	$k_7 = 1 - \frac{x_{\text{факт}}}{17}$
8	Зазор между шаблоном и эллипсоидной частью ΔR , мм	0	41	0	42	$k_8 = 1 - \frac{x_{\text{факт}}}{42}$
9	Утонение в зоне отбортовки, % от исходной толщины заготовки	0	15	0	15,1	$k_9 = 1 - \frac{x_{\text{факт}}}{15,1}$
10	Предел текучести σ_T при температуре $+20^\circ\text{C}$, Н/мм ²	235	-	-	230	Если $x_{\text{факт}} \leq x_{\text{ор}}$, то $k_{10} = 0$; Если $x_{\text{факт}} > x_{\text{ор}}$, то $k_{10} = 1$
11	Временное сопротивление σ_s при температуре $+20^\circ\text{C}$, Н/мм ²	400	510	-	$x_{\text{ор1}} = 395$ $x_{\text{ор2}} = 515$	Если $x_{\text{факт}} \leq x_{\text{ор1}}$ или $x_{\text{факт}} \geq x_{\text{ор2}}$, то $k_{11} = 0$; если $x_{\text{факт}} > x_{\text{ор1}}$ или $x_{\text{факт}} < x_{\text{ор2}}$, то $k_{11} = 1$

Продолжение таблицы 4.1

N	Свойство	x_{\min}	x_{\max}	x_3	$x_{\text{бр}}$	Формула для расчета k_i
12	Относительное удлинение δ_5 , при температуре +20°C, %	24	-	-	23,5	Если $x_{\text{факт}} \leq x_{\text{бр}}$, то $k_{12} = 0$; Если $x_{\text{факт}} > x_{\text{бр}}$, то $k_{12} = 1$
13	Ударная вязкость KCU при температуре +20°C, Дж/см ²	54	-	-	53	Если $x_{\text{факт}} \leq x_{\text{бр}}$, то $k_{13} = 0$; Если $x_{\text{факт}} > x_{\text{бр}}$, то $k_{13} = 1$
14	Ударная вязкость KCU после механического старения при температуре +20°C, Дж/см ²	24	-	-	23	Если $x_{\text{факт}} \leq x_{\text{бр}}$, то $k_{14} = 0$; Если $x_{\text{факт}} > x_{\text{бр}}$, то $k_{14} = 1$
15	Предел текучести σ_T при температуре +200°C, Н/мм ²	216	-	-	211	Если $x_{\text{факт}} \leq x_{\text{бр}}$, то $k_{15} = 0$; Если $x_{\text{факт}} > x_{\text{бр}}$, то $k_{15} = 1$
16	Глубина поверхностных дефектов, мм	0,8	0	0	0,9	$k_{16} = 1 - \frac{x_{\text{факт}}}{0,9}$
17	Коэффициент использования металла	-	0,81	0,81	0,5	$k_{17} = \frac{x_{\text{факт}} - 0,5}{0,31}$

Нормирование показателей качества провели по следующим формулам.

Если увеличение значения свойства приводит к повышению качества (например, коэффициент использования металла), $x_3 > x_{\text{бр}}$:

$$k = \frac{x_{\text{факт}} - x_{\text{бр}}}{x_3 - x_{\text{бр}}}. \quad (21)$$

При расчете по формуле (21) выполняются предельные условия: при $x_{\text{факт}} = x_{\text{бр}}$ $k = 0$ (брак); при $x_{\text{факт}} = x_3$ $k = 1$ (отличное качество).

При расчете показателей точности по величине допускаемых отклонений (например, точность диаметра днища, высота цилиндрической части днища - борта) можно принять $x_3 = 0$, и формулу (21) использовать в виде:

$$k = 1 - \frac{x_{\text{факт}}}{x_{\text{доп}}} \quad (22)$$

Если увеличение значения свойства приводит к понижению качества (например, глубина поверхностных дефектов, все показатели точности кроме диаметра днища, утонение стенки днища), $x_3 < x_{\text{доп}}$:

$$k = \frac{x_{\text{доп}} - x_{\text{факт}}}{x_{\text{доп}} - x_3} \quad (23)$$

Формула (23) дает те же предельные условия, что и формула (21).

Далее для вычисления комплексного показателя качества определили коэффициенты значимости (важности) единичных свойств экспертным методом по опросу 12 экспертов – специалистов в данной области по 10-балльной оценке важности выбранных свойств.

Коэффициент значимости i -го свойства определили по формуле [121]:

$$a_i = \frac{B_i}{\sum B_i}, \quad (24)$$

где B_i – средний балл для значимости i -го свойства; $\sum B_i$ – сумма средних баллов всех экспертов.

Фактические и нормированные значения рассматриваемых единичных свойств, а также коэффициенты значимости приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Фактические значения и характеристики единичных свойств горячештампованных эллиптических днищ с размерами $\text{Ø}4000 \times 22$ мм

N	Свойство	a_i	Днище №1		Днище №2	
			$x_{\text{факт}}$	k_i	$x_{\text{факт}}$	k_i
1	Отклонение внутреннего диаметра ΔD_e , мм	0,074	2*1	0,951	2*1	0,951
2	Относительная овальность, %	0,067	0,25	0,773	0,25	0,773

Продолжение таблицы 4.2

N	Свойство	a_i	Днище №1		Днище №2	
			$x_{факт}$	k_i	$x_{факт}$	k_i
3	Отклонение высоты борта Δh , мм	0,059	2*2	0,667	2*2	0,667
4	Высота гофры на цилиндрической части, мм	0,044	1	0,667	0,9	0,700
5	Высота отдельной вогнутости или выпуклости на эллипсоидной части T , мм	0,052	0	1	0	1
6	Наклон цилиндрической части Δm , мм	0,052	1	0,833	1	0,833
7	Зазор между шаблоном и эллипсоидной частью Δr , мм	0,052	1	0,941	0,8	0,953
8	Зазор между шаблоном и эллипсоидной частью ΔR , мм	0,052	3	0,929	2,5	0,940
9	Утонение в зоне отбортовки, % от исходной толщины заготовки	0,074	4,8	0,682	4,4	0,709
10	Предел текучести σ_T при температуре +20°C, Н/мм ²	0,059	299	1	284	1
11	Временное сопротивление σ_e при температуре +20°C, Н/мм ²	0,059	451	1	454	1
12	Относительное удлинение δ_5 , при температуре +20°C, %	0,059	31	1	29	1
13	Ударная вязкость KCU при температуре +20°C, Дж/см ²	0,059	158	1	174	1
14	Ударная вязкость KCU после механического старения при температуре +20°C, Дж/см ²	0,059	136	1	125	1
15	Предел текучести σ_T при температуре +200°C, Н/мм ²	0,059	250	1	251	1
16	Глубина поверхностных дефектов, мм	0,067	0,2	0,778	0,1	0,889
17	Коэффициент использования металла	0,052	0,81	1	0,81	1

На заключительном этапе оценку качества двух отобранных днищ сделали с помощью комплексного показателя качества продукции k_0 , рассчитанного по двум вариантам: как средневзвешенное арифметическое и средневзвешенное геометрическое значений 17 единичных свойств [121].

Эти показатели рассчитывались по общепринятым формулам.

Средневзвешенный арифметический комплексный показатель качества:

$$k_0 = \sum_{i=1}^{17} k_i \times a_i \quad (25)$$

Средневзвешенный геометрический комплексный показатель:

$$k_0 = \prod_{i=1}^{17} k_i^{a_i} \quad (26)$$

Средневзвешенный арифметический комплексный показатель качества днища №1 составляет $k_0 = 0,893$, днища №2 - $k_0 = 0,905$. Средневзвешенный геометрический комплексный показатель качества днища №1 составляет $k_0 = 0,883$, днища №2 - $k_0 = 0,896$.

Оба подхода дали примерно одинаковые результаты, что говорит об их работоспособности и взаимозаменяемости. Рассчитанные комплексные показатели k_0 оценены по шкале желательности Харрингтона [133]: значение показателя более 0,8 соответствует высокому качеству, даже несколько превосходящему требования стандартов.

Разработанная методика позволила оценить качество горячештампованных эллиптических днищ производства ПАО «Уралхиммаш».

Квалиметрия – это межотраслевая научная дисциплина. Таким образом, применение принципов квалиметрии в сочетании со статистическими методами при оценке качества продукции создает достаточно мощный инструмент в области управления качеством продукции и технологическими процессами, позволяет выявить резервы его повышения.

4.4 Выводы

Предложены мероприятия, реализация которых на производстве позволит повысить качество, уменьшить утонение стенки эллиптических днищ при горячей штамповке и снизить их металлоемкость.

1) Защита поверхности заготовок при помощи покрытий позволит снизить окисление металла днищ и, соответственно, образование окалины при нагреве заготовок под штамповку в печи.

Исследования показали, что применение меловых растворов позволяет снизить толщину образованной окалины на 50%, при применении термоизоляционного покрытия отмечено полное отсутствие окалины на заготовке.

2) Использование многослойной заготовки при штамповке тонкостенных эллиптических днищ позволяет снизить интенсивность остывания днища при деформации, получить днища без дефектов формы, без местных утонений и разрывов металла стенки.

3) Использование принципов квалиметрии и комплексных показателей качества позволяет более объективно оценивать качество продукции по совокупности показателей для различных вариантов технологических процессов по единой шкале.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам выполненного исследования можно заключить, что поставленные цели и задачи выполнены в полном объеме.

1. Проведено широкое экспериментальное исследование фактической разнотолщинности крупногабаритных эллиптических горячештампованных днищ для различных групп сталей, при различных режимах обработки. В рамках эксперимента исследовано 60 днищ, изменение толщины стенки при штамповке определено в 3500 точках, рассмотрены следующие марки сталей: Ст3, 20ЮЧ, 09Г2С, 12Х18Н10Т, SA-240 Type 304L, сталь марки 12ХМ с плакирующим слоем из стали марки 08Х18Н10Т, сталь марки 22К с плакирующим слоем из стали марки 08Х18Н10Т.

2. Выявлена зависимость параметров формоизменения днищ от группы марки стали, из которой изготовлено днище. Также исследованы закономерности формоизменения днищ из двухслойного стального листа.

3. В результате экспериментального исследования получены следующие новые закономерности, оформленные в виде регрессионных зависимостей:

- наименьшее относительное утонение 1,5% имеют днища из аустенитных сталей марок 12Х18Н10Т, SA-240 Type 304L, штампованные в два перехода. Зона с максимальным утонением расположена в эллиптической части (угол ориентировки $\sim 50^\circ$ от центральной оси днища);

- максимальное утонение днищ из углеродистых и низколегированных марганцово-кремнистых сталей марок Ст3, 09Г2С, штампованных в один переход, достигает 3,4%, штампованных в два перехода, - 4,3%. Угол ориентировки зоны с максимальным утонением составляет $\sim 43^\circ$ относительно центральной оси днища;

- величина и характер распределения утонения днищ из двухслойного стального листа (сталь марки 12ХМ с плакирующим слоем из стали марки 08Х18Н10Т, сталь марки 22К с плакирующим слоем из стали марки 08Х18Н10Т) соответствуют днищам из углеродистых и низколегированных марганцово-кремнистых сталей.

4. Для получения минимальной толщины стенки днища, обеспечивающей необходимую прочность сосуда или аппарата, при расчете исполнительной толщины днищ из аустенитных сталей технологическую прибавку для компенсации утонения стенки при штамповке допускается снизить с 15% до 7%, для днищ из углеродистых и низколегированных сталей – до 10%. Что обеспечивает значительное снижение металлоемкости.

5. Разработана трехмерная компьютерная модель процесса горячей штамповки эллиптического днища с размерами $\varnothing 1600 \times 28$ мм из стали 12X18H10T с использованием программного комплекса DEFORM-3D. Сопоставление результатов компьютерного моделирования с результатами экспериментального исследования показало достаточную сходимость по силовым параметрам и по разнотолщинности днищ.

6. Разработана методика комплексной оценки качества горячештамповочных эллиптических днищ с использованием принципов квалиметрии.

7. Разработаны мероприятия, направленные на совершенствование существующего технологического процесса изготовления горячештампованных днищ, в том числе на уменьшение утонения стенки днищ.

8. Внедрение результатов работы в производство обеспечит снижение расходов на производство эллиптических горячештампованных днищ из углеродистых и низколегированных сталей на 3 121 460 руб. в год, из аустенитных сталей – на 16 683 108 руб. в год, что подтверждено актом внедрения результатов диссертационной работы.

Перспективой дальнейшей разработки темы является исследование особенностей и закономерностей деформирования при горячей штамповке крупногабаритных деталей другой формы, например, полусферических днищ, применяемых в химической и нефтяной аппаратуре.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мошнин Е.Н. Технология штамповки крупногабаритных деталей. - М.: Машиностроение, 1973. - 240 с.
2. Мошнин Е.Н. Штамповка толстостенных днищ. М.: ВИНТИ ТОКР. - 1959. – С.18.
3. Ризванов Р.Г. Обеспечение качества оболочковых конструкций повышением точности изготовления и сборки базовых деталей: Дисс. док. техн. наук: 05.02.13 / Ризванов Риф Гарифович; Уфимский государственный нефтяной технический университет. – Уфа, 2002. - 354 с.
4. Ризванов Р.Г. Обеспечение точности изготовления горячештампованных днищ нефтехимической аппаратуры из легированных сталей: Дисс. канд. техн. наук: 05.04.09 Ризванов Риф Гарифович, Уфимский нефтяной институт. – Уфа, 1991. - 201 с.
5. Вихман Г.Л. Основы конструирования аппаратов и машин нефтеперерабатывающих заводов / Г.Л. Вихман, С.А. Круглов. -. М.: Государственное научно-техническое издательство нефтяной и горно-топливной литературы, 1978. – 328 с.
6. Канторович З.Б. Основы расчета химических машин и аппаратов. - М.: МАШГИЗ, 1960. – 744 с.
7. Лацинский А.А. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры / А.А. Лацинский, А.Р. Толчинский. - Л.: Машиностроение, 1970. – 752 с.
8. ГОСТ 6533-78. Днища эллиптические отбортованные стальные для сосудов, аппаратов и котлов. Основные размеры. – Взамен ГОСТ 6533-68; введ. 1980-01-01. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1978. – 38 с.
9. Мельников Э.Л. Справочник по холодной штамповке оболочковых деталей. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 2003. – 288 с.

10. ГОСТ 34233.2-2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет цилиндрических и конических обечаек, выпуклых и плоских днищ и крышек. – Введ. 2018-01-08. – М.: Стандартиформ, 2018. – 54 с.

11. РД 10-249-98. Нормы расчёта на прочность стационарных котлов и трубопроводов пара и горячей воды. – Введ. 1998-25-08.-М.: ФГУП «НТЦ «Промышленная безопасность», 2006. – 344 с.

12. ГОСТ 34233.1 – 2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования. – Введ. 2018-01-08. – М.: Стандартиформ, 2018. – 30 с.

13. Немец Я. Расчеты прочности сосудов, работающих под давлением. - М.: Машиностроение, 1964. - 311 с.

14. ГОСТ 34347-2017. Сосуды и аппараты стальные сварные. Общие технические условия. – Введ. 2018-01-08. – М.: Стандартиформ, 2018. – 104 с.

15. Штамповка эллиптических днищ с переменным усилием прижима / [В.П. Лукьянов и др.] // Химическое и нефтяное машиностроение. - 1976. - №4. - С. 28-29.

16. Лукьянов В.П. Исследование процесса штамповки эллиптических днищ / В.П. Лукьянов, Е.Д. Горохов // Кузнечно-штамповочное производство. - 1970. - №3. - С. 17-20.

17. Степанов В.Г. Выбор методов штамповки крупногабаритных днищ при мелкосерийном производстве / В.Г. Степанов // Кузнечно-штамповочное производство. - 1976. - №3. - С. 39-40.

18. Опарин В.И. Механизация производства химической и нефтяной аппаратуры / В.И. Опарин, Г.П. Ткаченко, В.П. Лукьянов. – М.: Машиностроение, 1973. - 224 с.

19. Влияние утонения при штамповке на несущую способность эллиптических днищ / [В.В. Васильев и др.] //Химическое и нефтяное машиностроение. - 1983 - №10. - С. 10-13.

20. Любченко А.А. Горячая штамповка толстолистовых полых изделий. - Л.: Лениздат, 1967. – 303 с.

21. Демин В.А. Горячая листовая штамповка днищ / В.А. Демин // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. - 2002.- №8. - С. 16-19.
22. Опыт изготовления толстолистовых горячештампованных заготовок из титановых псевдо- α -сплавов / [Кудрявцев А.С. и др.] // Титан. – 2014. - №3. – С. 86-92.
23. Каргин Б.С. Исследование температурных полей в заготовке для детали «Днище» при ее переносе от печи к прессу / Б.С. Каргин, А.А. Липчанский // Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2013. – №. 27. - С. 52-56.
24. Шевелкин Б.Н. Усовершенствование технологии изготовления и методов контроля днищ аппаратов / Б.Н. Шевелкин // Химическое и нефтяное машиностроение. - 1967, - №5. – С. 46-47.
25. А.с. 182667 СССР, МПК В 21d. Способ формовки сферических, эллиптических и других куполообразных днищ / Хачикян К.Г., Мошнин Е.Н., Потулов В.М. (СССР). – 924072/25-27; заявлено 03.10.1964; опубл. 09.06.1966, Бюл. 12 – с. 2.
26. Штамповка эллиптических днищ из нержавеющей сталей / [В.П. Лукьянов и др.] // Химическое и нефтяное машиностроение. - 1970. - №1. - С. 21-22.
27. Лукьянов В.П. Использование имеющейся на заводах штамповой оснастки для штамповки различных сталей и сплавов / В.П. Лукьянов, Б.Н. Шевелкин, И.В. Березин // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1968. - №10. - С. 29-31.
28. Шевелкин Б.Н. О допусках при штамповке дни / Б.Н. Шевелкин, В.Г. Тюгин, Р.И. Ликанов // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1971. - №6. – С. 30-31
29. Изготовление днищ аппаратов повышенной точности / [Б.Н. Шевелкин и др.] // Химическое и нефтяное машиностроение. - 1972. - №1. – С. 23-24.

30. Оснастка для холодной штамповки днищ на прессах простого действия / [В.П. Лукьянов и др.] // Химическое и нефтяное машиностроение. -1984. - №7. – С. 38-39.
31. Лукьянов В.П. Эффективность некоторых способов штамповки тонкостенных и особотонкостенных днищ / В.П. Лукьянов, Е.Д. Горохов, Г.С. Бронфман // Химическое и нефтяное машиностроение. - 1975. - №12. – С. 24-26.
32. Устройство для прижима фланцевой части заготовки при горячей вытяжке днищ / [А.В. Бакиев и др.] // Химическое и нефтяное машиностроение. - 1987. - №10. – С. 30 -31.
33. Голованова А.П. Штамповка тонкостенных днищ из коррозионно-стойких сталей и титановых сплавов //Кузнечно-штамповочное производство. - 1965 - №3. – С. 11-13
34. Любченко А.А. Конструирование штампов и горячая листовая штамповка. – Л.: Машиностроение, 1974. - 480 с.
35. Ромашко Н.И. Технология изготовления крупногабаритных толстых плит и вытяжка бесшовных днищ большого диаметра / Н.И. Ромашко Н.И., А.Г. Токарев, О.А. Кобелев // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. - 2008 - №7. – С. 22-26.
36. Штамповка элементов корпусных конструкций/ [В.Г. Степанов и др.]. - Ленинград: Судостроение, 1972. - 279 с.
37. Лукьянов В.П. Расчет основных параметров эллиптических, сферических и полушаровых днищ. – М.: Центр. ин-т науч.-техн. информации и техн.-экон. исследований по хим. и нефт. машиностроению, - 1968. - 26 с.
38. Hui Wang. Forming of ellipse heads of large-scale austenitic stainless steel pressure vessel / [Wang Hui et al.] // Procedia Engineering. - 2014 - №81. P. 837 - 842
39. Липчанский А. А. Анализ напряжённо деформированного состояния при горячей листовой штамповке днищ / А.А. Липчанский, Б.С. Каргин //Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні. – 2014. – №. 1. – С. 69-74.

40. Каргин Б. С. Исследование напряженно-деформированного состояния в зоне прижимного кольца при штамповке детали «Днище» / Б.С. Каргин, А.А. Липчанский // *Обработка материалов давлением*. – 2014. – №. 2. – С. 129-133.
41. СТО 00220256-001-2005. Горячая штамповка и термообработка эллиптических днищ сосудов и аппаратов. – Введ. 2006-01-01. – М.: ОАО «НИИХИММАШ», 2005. – 21 с.
42. Altan T. Sheet metal forming: processes and applications / Т. Altan, Е. Tekkaya. – Materials Park: ASM International, 2012. - 450 p.
43. Грудев А.П. Трение и смазки при обработке давлением. Справочное издание / А.П. Грудев, Ю.В. Зильберг, В.Г. Тилик В.Т. – М.: Металлургия, 1982. – 312 с.
44. Altan T. Sheet metal forming: fundamentals / Т. Altan, Е. Tekkaya. – Materials Park: ASM International, 2012. - 350 p.
45. ГОСТ 5279-74. Графит кристаллический литейный. Технические условия. - Взамен ГОСТ 5279-61; введ. 1976-01-01. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. – 38 с.
46. ГОСТ 1707-51. Масла промышленные (веретенные и машинные). Технические условия. – Взамен ГОСТ 1707-42 и ГОСТ 1837-42; введ. 1951-01-07. – М. Управление по стандартизации при Совете Министров Союза ССР, 1951. – 3 с.
47. Давыдов Ю.П. Листовая штамповка легированных сталей и сплавов / Ю.П. Давыдов, Г.В. Покровский. – М.: Оборонгиз, 1962. – 162 с.
48. Орлов Г.А. Технологические процессы обработки металлов давлением: учебное пособие. - Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2013. – 198 с.
49. Бакиев А.В. Повышение точности изготовления днищ / А.В. Бакиев, А.Г. Савватеев, А.Х. Мингажева А.Х. // *Химическое и нефтяное машиностроение*. 1984. - №9. – С. 38.

50. ГОСТ 427-75. Линейки измерительные металлические. Технические условия. - Взамен ГОСТ 427-56; введ. 1977-01-01. – М.: Стандартинформ, 2007. – 6 с.
51. ГОСТ 7502-98. Рулетки измерительные металлические. Технические условия. - Взамен ГОСТ 7502-89; введ. 2000-01-07. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2006. - 8 с.
52. ГОСТ 11358-89. Толщиномеры и стенкомеры индикаторные с ценой деления 0,01 и 0,1 мм. Технические условия. - Взамен ГОСТ 11358-74 и ГОСТ 11951-82; введ. 1990-01-01. – М.: Стандартинформ, 2005. - 7 с.
53. ГОСТ 6507-90. Микрометры. Технические условия. - Взамен ГОСТ 6507-78; введ. 1991-01-01. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. - 11 с.
54. Северденко В.П. Брак в листовой штамповке / В.П. Северденко, П.С. Овчинников, С.Э. Розенберг. - Минск: Наука и техника, 1973. 168 с.
55. Лукьянов В.П.. Анализ причин образования трещин при штамповке днищ из нержавеющей сталей / В.П. Лукьянов, Е.Д. Горохов, В.А. Снежковский // Химическое и нефтяное машиностроение. - 1971. - №1. - С. 31-33.
56. Козлов Ю.И. Влияние различных факторов на характер процесса вытяжки и качество днищ / Ю.И. Козлов // Химическое и нефтяное машиностроение. 1974. №12. С.19-20.
57. Бакиев А.В. Технология аппаратостроения: учебное пособие. – Уфа, Изд-во УГНТУ, 1995. - 297 с.
58. Северденко В.П. Окалина при горячей обработке металлов давлением / В.П. Северденко, Е.М. Макушок, А.Н. Равин. - М.: Металлургия, 1977. – 208 с.
59. Зинягин А. Г. Учет влияния окалины при расчете энергосиловых параметров прокатки // Вторая Всероссийская научно-техническая конференция «Студенческая весна 2009: Машиностроительные технологии» / МГТУ им. Н.Э Баумана. – Электрон. дан. – М.: МГТУ, 2009. – 1 электрон. опт. диск (CD-R).

60. Шрейбер Г.К. Конструкционные материалы в нефтяной, нефтехимической и газовой промышленности / Г.К. Шрейбер, С.М. Прелин, Б.Ф. Шибреев. – М.: Машиностроение, 1969. - 396 с.
61. Русанов Ю.Н. Разнотолщинность горячештампованных днищ / Ю.Н. Русанов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1998. - №4. – С. 37-39.
62. Белов М.И. Эффективность использования математического моделирования при исследовании, оптимизации и проектировании технологических процессов ОМД. Пластическая деформация сталей и сплавов. - М.: Московский государственный институт стали и сплавов, 1996. – 245 с.
63. Унксов Е.П. Методы моделирования процессов обработки металлов давлением / Е.П. Унксов // Кузнечно-штамповочное производство. - 1975 - №4. – С. 1-5.
64. Рыбин Ю.И. Математическое моделирование и проектирование технологических процессов обработки металлов давлением / Ю.И. Рыбин, А.И. Рудской., А.М. Золотов. - СПб.: Наука, 2004. – 642 с.
65. Kobayashi S. Metal forming and the finite-element method / S. Kobayashi., S. Oh, T. Altan. - New York: Oxford university press, 1989. - 378 p.
66. Makinouchi A. Sheet metal forming simulation in industry / A. Makinouchi // Journal of materials processing technology. – 1996. - №60. – P. 19-26.
67. Lenard J.G. Metal forming science and practice. – Oxford: Elsevier, 2002. - 363 p.
68. Фомичев А.Ф. Компьютерное исследование технологических параметров при штамповке / А.Ф. Фомичев, Э.Е. Юргенсон, С.Ю. Панин // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2010. - №8. – С.38-42.
69. Математическое моделирование процесса изготовления изделия типа «Стакан» методом глубокой горячей вытяжки на основе применения программного комплекса Deform / [В.В Галкин и др.] // Фундаментальные исследования.- 2013. - №1. - С. 371-374.

70. Биба Н.В. Qform-программа, созданная для технологов / Н.В. Биба, С.А. Стебунов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2004. – №. 9. – С. 38-41.

71. Сидоров А.А. Настоящее и будущее моделирования процессов обработки металлов давлением / А.А. Сидоров // САПР и графика. – 2007. – №. 10. – С. 78-79.

72. Биба Н.В. Эффективность применения моделирования для разработки технологии штамповки / Н.В. Биба., А.И. Лишний, С.А. Стебунов // Кузнечно-штамповочное производство. – 2001. – №. 5. – С. 39-44.

73. QForm-универсальная и эффективная программа для моделированияковки и штамповки / [Биба Н.В. и др.] //Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2011. – №. 1. – С. 36-42.

74. Development of the Technology of Large Bodies Manufacturing Based on Combined Process of Plate Rolling and Stamping / A Pesin et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2017. – Т. 293. – №. 1.

75. Kothari K. D. Investigation and parametric analysis of steel perforated sheet metal (PSM) for optimum forming process / K. D. Kothari, R.L. Jhala // International Journal of Engineering Research in Africa. – Trans Tech Publications, 2016. – Т. 21. – С. 118-123.

76. Tatipala S. et al. Introductory study of sheet metal forming simulations to evaluate process robustness //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2018. – Т. 418. – №. 1.

77. Логинов Ю.Н. Моделирование деформированного состояния круглой пластины при вытяжке / Ю.Н. Логинов, Б.И. Каменецкий, Г.И. Студенок // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. - 2006. - № 3. - С. 26-28.

78. Фомин А. А. Экспериментальное исследование деформированного состояния дна платинового стеклоплавильного аппарата при листовой штамповке / А.А. Фомин, Ю.Н. Логинов // XVII международная научно-техническая

Уральская школа-семинар металлургов-молодых ученых. Ч. 2. -Екатеринбург, 2016. – 2016. – Т. 2. – №. 17. – С. 16-19.

79. Логинов Ю.Н. Деформации при листовой штамповке платинового стеклоплавильного сосуда / Ю.Н. Логинов, А.А. Фомин // В сборнике: Трубы-2014. Труды международной научно-практической конференции. ОАО «РосНИТИ», НО «ФРТП». 2014. С. 284-287.

80. Фомин А.А. Анализ видов дефектности после первой операции штамповки дна стеклоплавильного аппарата из платины. / А.А. Фомин, Ю.Н. Логинов // Инновационные технологии в металлургии и машиностроении. - 2014. - С. 475-477.

81. Ершов А.А. Изучение с помощью программы RAM-STAMP влияния состояния поставки материала на формуемость при штамповке / А.А. Ершов, Ю.Н. Логинов // Металлург. - 2014. - № 3. - С. 38-41.

82. Логинов Ю.Н., Фомин А.А. Исследование первой операции штамповки элементов платиновых стеклоплавильных аппаратов / Ю.Н. Логинов, А.А. Фомин // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. - 2014. - № 4. - С. 37-41.

83. Ершов А.А. Расчет компенсации штампового инструмента после пружинения в программном комплексе RAM-STAMP / А.А. Ершов, В.В. Котов В.В., Ю.Н.Логинов // Металлург. - 2012. - № 7. - С. 24-26.

84. Логинов Ю.Н. Последовательность формоизменения металла в операции глубокой вытяжки тонкостенной заготовки с отверстием / Ю.Н. Логинов, В.В. Котов, Ю.В. Замаева // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. - 2018. - № 7. - С. 35-38.

85. Исследование деформационных характеристик и структуры сплава ПЛН-4,5 при изготовлении полых заготовок методом глубокой вытяжки / [Каменецкий Б.И. и др.], // Цветные металлы. - 2007. - № 8. - С. 51-53.

86. Поляков П.А. Оптимизация технологической системы изготовления волокнистых нанокompозитов электротехнического назначения / П.А. Поляков, С.В. Бывальцев, Ю.Д. Горбунова // Тезисы VI Российской научно-технической

конференция «Ресурс и диагностика материалов и конструкций» (г. Екатеринбург, 26-28 мая 2009 г). – Екатеринбург: ИМАШ УрО РАН, 2009. – с. 124.

87. Агапитова О.Ю. Программный комплекс для моделирования гидромеханического выдавливания / [О.Ю. Агапитова и др.] // Тезисы V Российской научно-технической конференция «Ресурс и диагностика материалов и конструкций» (г. Екатеринбург, 25-29 апреля 2011 г.) ИМАШ УрО РАН. – Электрон. дан. – Екатеринбург: ИМАШ УрО РАН, 2011. – 1 электрон. опт. диск (CD-R).

88. Theories, methods and numerical technology of sheet metal cold and hot forming / [Hu Ping et al.]. – London: Springer Science & Business Media, 2013. — 210 p.

89. Ершов А. А. Изучение с помощью программы RAM-STAMP влияния состояния поставки материала на формуемость при штамповке / А.А. Ершов, Ю.Н. Логинов //Металлург. – 2014. – №. 3. – С. 38-41.

90. Gantar G. Optimization of sheet metal forming processes by the use of numerical simulations / G. Gantar, T. Pepelnjak, K. Kuzman //Journal of Materials Processing Technology. – 2002. – Т. 130. – P. 54-59.

91. ГОСТ 14637-89. Прокат толстолистовой из углеродистой стали обыкновенного качества. Технические условия. - Взамен ГОСТ 14637-79; введ. 1991-01-01. – М.: Стандартиформ, 2009. - 9 с.

92. ТУ 14-1-4853-90. Прокат толстолистовой, стойкий к коррозионному растрескиванию. – Взамен ТУ 14-1-3333-82; введ. 1990-01-12. – М. ЦНИИЧермет, 1990. - 6 с.

93. ГОСТ 5520 -2017. Прокат толстолистовой из нелегированной и легированной стали для котлов и сосудов, работающих под давлением. Технические условия. - Взамен ГОСТ 5520-79; введ. 2018-01-10. – М.: Стандартиформ, 2018. - 24 с.

94. ГОСТ 7350-77. Сталь толстолистовая коррозионно-стойкая, жаростойкая и жаропрочная. Технические условия. - Взамен ГОСТ 7350-66; введ. 1979-01-01. – М.: Стандартиформ, 2009. - 11 с.

95. ASME 2017 Section II Part D. MATERIALS Part D Properties (Customary). - Введ. 2017-01-07. – New York: The American Society of Mechanical Engineers, 2017. – 1134 p.
96. СТП 26.260.486-2005. Каталог аналогов импортных и отечественных основных и сварочных материалов, применяемых при изготовлении сосудов, аппаратов и трубопроводов, подведомственных Ростехнадзору. – Введ. 2005-01-04. – Волгоград: ОАО «ВНИИПТХимнефтеаппаратуры», 2013. – 85 с.
97. ГОСТ 10885-85. Сталь листовая горячекатаная двухслойная коррозионно-стойкая. Технические условия. - Взамен ГОСТ 10885-75; введ. 1986-01-07. – М.: Стандартинформ, 2002. – 10 с.
98. ТУ 0900-005-05764417-99. Листы двухслойные из стали марок 22К+08Х18Н10Т. – Введ. 1999-01-10. – СПб.: ОАО «Ижорские заводы», 1999. – 22 с.
99. ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. - Взамен ГОСТ 2789-59; введ. 1975-01-01. – М.: Стандартинформ, 2018. – 6 с.
100. Полухин П.И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. Справочник. / П.И. Полухин, Г.Я. Гун, А.М. Галкин. - М.: Metallurgy, 1983. - 352 с.
101. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента / [Н.А. Спиринов и др.]. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2003. - 260 с.
102. ГОСТ Р 50779.42-99. Статистические методы. Контрольные карты Шухарта. - Введ. 1999-07-15. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. – 32 с.
103. ГОСТ Р 51814.3-2001. Системы качества в автомобилестроении. Методы статистического управления процессами. - Введ. 2001-10-02. – М.: Стандартинформ, 2006. – 34 с.
104. Горбунова Ю.Д. Снижение металлоемкости эллиптических горячештампованных днищ / [Ю.Д. Горбунова и др.] // Уральская школа молодых металлургов: сборник материалов и докладов XIX Международной научно-

технической Уральской школы-семинара металловедов — молодых ученых (Екатеринбург, 19–23 ноября 2018 г.). - Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. - С. 531-534.

105. Кузнецов А.Ф. Исследование изменения толщины стенки эллиптических тонкостенных днищ при штамповке / А.Ф. Кузнецов, Ю.Д. Горбунова, Г.А. Орлов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2017. – №. 3. – С. 19-23.

106. Лукьянов В.П. Оптимальное усилие прижима при штамповке эллиптических днищ / В.П. Лукьянов, Е.Д. Горохов // Кузнечно-штамповочное производство. - 1971, - №8. – С. 18-20.

107. Манюров Ш. Б. Разработка технологии снижения поверхностного окисления и обезуглероживания стальных заготовок при нагреве с применением кратковременных технологических защитных покрытий: Дисс. канд. техн. наук: 05.16.02 / Манюров Шамиль Борисович; ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П.Бардина». – М., 2014. - 156 с.

108. Алексенко В. Л. Защита стальных заготовок от окисления при нагреве под термообработку и обработку давлением / В.Л. Алексенко, Н.В. Браило, Н.В. Сердюк //Науковий вісник Херсонської державної морської академії. – 2016. – №. 1. – С. 137-145.

109. Брагина Л.Л. Защитные технологические покрытия в металлургии и машиностроении / Л.Л. Брагина, А.Д. Чепурной // Збірник наукових праць "Вісник НТУ "ХПИ": Машинознавство і САПР - Вестник НТУ "ХПИ". - 2005. - №53 – С. 24-28.

110. Кульмаметьева Ю.З. Исследование и совершенствование технологии получения горячекатаных листов из низколегированных сталей путем нанесения на слябы алюминиевого газотермического покрытия: Дисс. канд. тех. наук: 05.16.06 / Кульмаметьева Юлия Зинуровна; Московский институт сталей и сплавов. – М., 2009. - 177 с.

111. Радюк А.Г. Применение жаростойких покрытий для защиты материалов и оборудования при высокотемпературном нагреве / А.Г. Радюк, А.Е. Титлянов // Технология металлов. – 2015. – №. 1. – С. 12-17.

112. Радюк А.Г. Применение алюминиевого газотермического покрытия для уменьшения потерь металла и тепла при горячей прокатке / А.Г. Радюк, А.Е. Титлянов // Черные металлы. – 2011. – №. 12. – С. 28-33.

113. Каргин Б.С. Инновационные технологии изготовления, испытания и опыт внедрения технологических смазок для обработки металлов давлением: Учебное пособие / Б.С. Каргин, В.В. Кухарь. – Мариуполь: Приазовский государственный технический университет, 2016. – 132 с.

114. Берлинер Ю.И. Технология химического и нефтяного аппаратостроения / Ю.И. Берлинер, Ю.А. Балашов Ю.А.- М.: Машиностроение, - 1976, - 256 с.

115. Горбунова Ю. Д. Опыт многослойной штамповки тонкостенных днищ / Ю.Д. Горбунова, А.И. Горяев, Г.А. Орлов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. - 2018. - №8. С. 24–27.

116. Любченко А.А. Горячая штамповка крупногабаритных деталей с применением прокладок / А.А. Любченко, Н.Т. Аристархов //Кузнечно-штамповочное производство. - 1960 - №5. – С. 47-49.

117. ISO 9001:2015. Системы менеджмента качества. Требования. – Взамен ISO 9001:2008; введ. 2015-15-09. – М. ОАО «ВНИИС», 2015. – 33 с.

118. ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования. – Введ. 2015-01-11. – М.:Стандартинформ, 2018. – 24 с.

119. СТО Газпром 9001-2012. Стандарт ОАО «Газпром». Системы менеджмента качества. Требования. – Взамен СТО Газпром 9001-2006, части I и II; введ. 2013-04-12. – М.: ОАО «Газпром», 2014. – 43 с.

120. ГОСТ РВ 0015-002-2012. Система разработки и постановки на производство военной техники. Системы менеджмента качества. Общие требования. – Взамен ГОСТ РВ 0015-002-2003; введ. 2013-01-01. – М.: Стандартинформ, 2013. – 38 с.

121. Азгальдов Г.Г. Квалиметрия для всех: Учеб.пособие / Г.Г. Азгальдов, А.В. Костин, В.В. Садовов. - М.: ИД ИнформЗнание, 2012. - 165 с.
122. Гун Г.С. Управление качеством высокоточных профилей. - М.: Металлургия, 1984. - 152 с.
123. Стеблов А.Б. Комплексный показатель качества металлопроката и его применение / А.Б. Стеблов // Литье и металлургия. - 2017, - № 1 (86). - С. 97-102.
124. Орлов Г.А. Комплексная оценка качества стального проката / Г.А. Орлов, А.Г. Орлов // Производство проката. - 2018, - № 4. - С. 3-8.
125. Орлов Г.А. Комплексная оценка качества горячекатаных стальных труб / Г.А. Орлов, Ю.Н. Логинов, А.Г. Орлов // Черные металлы. - 2018, - № 4. - С. 41-45.
126. Orlov G. A. Qualimetry Rating of Hot-Rolled Pipes / G. A. Orlov, A.G. Orlov // Solid State Phenomena. -2018, - Vol. 284. - P. 1349-1354.
127. ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения. - Введ. 1979-01-01. – М.: Государственный комитет стандартов совета министров СССР, 1979. –10 с.
128. Орлов Г. А. Разработка методики комплексной оценки качества горячештампованных эллиптических днищ / Г.А. Орлов, Ю.Д. Горбунова // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2018. – №. 12. – С. 97-102.
129. Горбунова Ю.Д. Оценка качества горячештампованных эллиптических днищ с использованием комплексных показателей / Ю.Д. Горбунова, А.И. Горяев, А.Ф. Кузнецов, Г.А. Орлов // Заготовительные производства в машиностроении (Кузнечно-прессовое, литейное и другие производства). - 2019. - Том №17. - №1. - С. 41-47.
130. Орлов Г.А. Анализ качества горячештампованных днищ / Г.А. Орлов, Ю.Д. Горбунова, В.В. Котов // Авиамашиностроение и транспорт Сибири: Сб. статей X Международной научно-технической конференции «Авиамашиностроение и транспорт Сибири» (г. Иркутск, 21-26 мая 2018 г.) – Иркутск: Изд-во ИРНТУ, 2018. - С. 73-77.

131. ГОСТ 19903-2015. Прокат листовой горячекатаный. Сортамент характеристики. - Взамен ГОСТ 19903-74; введ. 2016-01-09. – М.: Стандартиформ, 2016. – 15 с.

132. ГОСТ 22851-77. Прокат листовой горячекатаный. Сортамент характеристики. - Взамен ГОСТ 19903-74; введ. 2016-01-09. – М.: Стандартиформ, 2016. – 15 с.

133. Новик Ф.С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф.С. Новик, Я.Б. Арсов. - М.: Машиностроение, 1980. - 304 с.

Приложение

Акт о внедрении результатов диссертационной работы



Публичное акционерное общество
УРАЛЬСКИЙ ЗАВОД
ХИМИЧЕСКОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ
(ПАО «Уралхиммаш»)



Хибиногорский пер., 33, Екатеринбург, 620010, Россия
Тел.: (343) 310-08-00, 310-06-90 Факс: (343) 258-50-92, 258-60-45
E-mail: general@ekb.ru, www.uralhimmash.ru
ОКПО 00217320, ОГРН 1026605781290, ИНН/КПП 6664013880/667901001, БИК 046577411
Р/с 40702810800261000430, к/с 30101810365770000411, Ф-л Банка ГПБ (АО) «Уральский»

От 21.01.2019, № 460/01



Акт о внедрении результатов диссертационной работы

ПАО «Уралхиммаш» настоящим актом подтверждает, что ведущий инженер-технолог бюро листовой штамповки и котельной заготовки Отдела главного технолога Горбунова Юлия Дмитриевна занималась на предприятии научно-исследовательской работой по исследованию разнотолщинности эллиптических стальных днищ при горячей штамповке.

В течение 2016-2017 г.г. Горбунова Ю.Д. участвовала в измерениях днищ с текущих производственных заказов, а также проанализировала результаты ежегодных периодических испытаний штамповок эллиптических днищ за последние 10-15 лет, проводимые на предприятии в соответствии с требованиями ТУ 26-37-80.

Анализ данных, полученных в ходе исследования, свидетельствует о том, что существующая технология штамповки днищ на ПАО «Уралхиммаш» обеспечивает потенциальное снижение технологической прибавки для компенсации утонения стенки при штамповке, применяемой при прочностном расчете днищ.

За счет применения уточненной технологической прибавки для компенсации утонения стенки днищ при горячей штамповке, потенциальное снижение расходов на производство эллиптических горячештампованных днищ из углеродистых и низколегированных сталей составляет 3 121 460 руб. в год, из аустенитных сталей –16 683 108 руб. в год.

По результатам проведенного исследования Горбуновой Ю.Д. сформулированы рекомендации, направленные на улучшение существующего технологического процесса изготовления горячештампованных днищ. Одна рекомендация на сегодняшний день реализована на предприятии. В 2016 г. Горбунова Ю.Д. систематизировала имеющийся опыт предприятия, разработала инструкцию по организации и проведению периодической проверки штамповой оснастки на геометрическую точность. Отмечается снижение несоответствий, выявленных в процессе в производства, по причине состояния штамповой оснастки.

Результаты выполненной работы имеют высокую практическую значимость для ПАО «Уралхиммаш».

Технический директор

Главный технолог

Начальник бюро листовой штамповки
и котельной заготовки Отдела главного технолога

Сытченко Д.В. 21 ЯНВ 2019 Сытченко Д.В.
Кашин М.В. 21 ЯНВ 2019 Кашин М.В.
Горяев А.И. 21.01.2019 Горяев А.И.