

На правах рукописи



**ГОРБУНОВА Юлия Дмитриевна**

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

05.16.05 – Обработка металлов давлением

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2019

Работа выполнена на кафедре «Обработка металлов давлением» Института новых материалов и технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Орлов Григорий Александрович**

Официальные оппоненты: **Готлиб Борис Михайлович**,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Уральский государственный  
университет путей сообщения»,  
г. Екатеринбург, профессор кафедры  
«Мехатроника»;

**Ершов Александр Алексеевич**,  
кандидат технических наук, ООО «Научно-  
производственный центр «Внутритрубная  
диагностика», г. Берёзовский, Свердловская  
область, начальник отдела анализа целостности  
трубопроводов

Ведущая организация: ФГБУН Институт машиноведения Уральского  
отделения Российской академии наук,  
г. Екатеринбург

Защита состоится «29» мая 2019 г. в 16:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.285.04 на базе ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19 в ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <http://lib.urfu.ru/mod/data/view.php?id=51&rid=289033>

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Селиванова  
Ольга Владимировна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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, необходимы исследования, направленные на обоснование возможности снижения исполнительной толщины заготовки горячештампованного эллиптического днища при сохранении требуемой прочности. 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.

Работа выполнена в соответствии с планом организационно-технических мероприятий, направленных на снижение издержек производства ПАО «Уралхиммаш» на 2016 г.

**Степень разработанности темы.** Изучению разнотолщинности эллиптических днищ при горячей штамповке посвящены труды Горохова Е.Д., Демина В.А., Лукьянова В.П., Любченко А.А., Мошнина Е.Н., Потулова В.М., Ризванова Р.Г., Русанова Ю.Н. 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 данных 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 данной 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**:

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

**Научная новизна работы** заключается в получении новых закономерностей изменения толщины стенки эллиптических днищ при горячей штамповке для различных групп сталей, при различных режимах обработки в результате анализа экспериментальных данных; разработке трехмерной компьютерной модели процесса горячей штамповки эллиптических днищ, проведении анализа показателей напряженно-деформированного состояния металла по объему днищ; формировании иерархической структуры единичных показателей качества днищ, проведении оценки 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:**

- закономерности изменения толщины стенки днищ при штамповке в зависимости от группы стали, режимов обработки;
- трехмерная компьютерная модель процесса горячей штамповки эллиптического днища;
- методика комплексной оценки качества горячештампованных эллиптических днищ с использованием принципов квалиметрии.

**Личный вклад** диссертанта заключается в формировании цели и задач исследования; в проведении и обработке результатов промышленного эксперимента; разработке трехмерной компьютерной модели процесса горячей штамповки эллиптического днища в программном комплексе DEFORM-3D; в разработке технологических рекомендаций и внедрении результатов работы в ПАО «Уралхиммаш».

**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», ИРНТУ, Иркутск, 2018; XIX Международная научно-техническая конференция «Уральская школа-семинар металлоспециалистов-молодых ученых», УрФУ, Екатеринбург, 2018; Научно-практический семинар студентов, аспирантов и соискателей кафедры «Обработка металлов давлением» ИНМиТ УрФУ «Методы вычислительного (на математических и

компьютерных моделях) физического и промышленного экспериментов и эффективное использование их для исследования технологических процессов», УрФУ, Екатеринбург, 2018.

**Публикации.** Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 6-ти печатных трудах, в том числе 4 статьи опубликованы в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Две статьи вошли в международную реферативную базу данных Chemical Abstracts.

**Структура и объем работы.** Диссертация изложена на 124 страницах машинописного текста, включает 46 рисунков, 10 таблиц и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 133 наименований и одного приложения.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, дана характеристика ее научной новизны, теоретической и практической значимости.

В **первой главе** представлен анализ литературы по проблематике исследования. Описаны особенности технологического процесса горячей штамповки эллиптических днищ, влияние технологических факторов на изменение толщины стенки. Рассмотрены современные подходы к моделированию процессов обработки металлов давлением, которым посвящены работы Белевитина В.А., Выдрина А.В., Готлиба Б.М., Залазинского А.Г., Золотова А.М., Коновалова А.В., Кучеряева Б.В., Логинова Ю.Н., Паршина В.С., Паршина С.В., Рудского А.И., Рыбина Ю.И., Смирнова Е.Н., Смирнова С.В. и др.

На основании выполненного обзора сформулированы цель и задачи исследования.

**Вторая глава** посвящена экспериментальному исследованию формоизменения эллиптических днищ при горячей штамповке в ПАО «Уралхиммаш».

Исследована разнотолщинность 60-ти эллиптических днищ с размерами (рисунок 1):  $D_g = 900...3400$  мм,  $S = 8...100$  мм.

Материал днищ: углеродистая сталь Ст3, низколегированная сталь 20ЮЧ; низколегированная марганцево-кремнистая сталь марки 09Г2С; аустенитные стали марок 12Х18Н10Т, SA-240 Type 304L (аналог стали 03Х18Н11); листовой двухслойный прокат: сталь марки 12ХМ с плакирующим слоем из стали марки 08Х18Н10Т; сталь марки 22К с плакирующим слоем из стали марки 08Х18Н10Т.

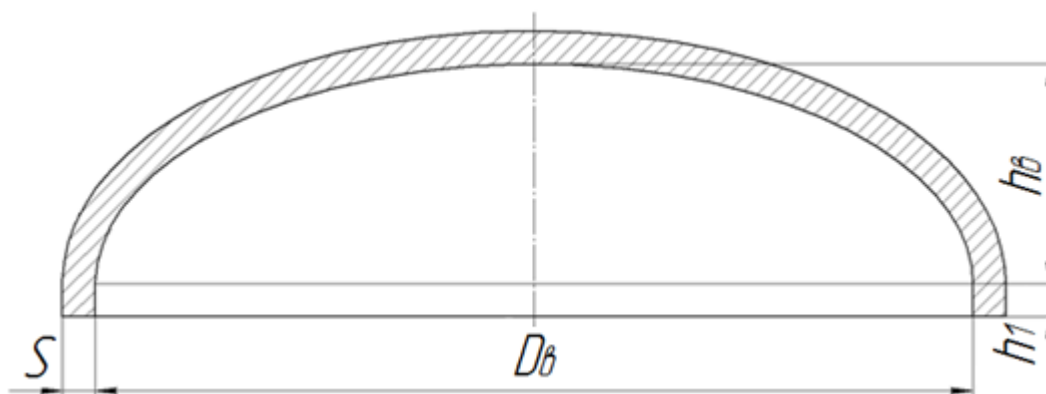


Рисунок 1 – Форма эллиптического днища:  $D_б$  - диаметр днища;  $h_б$  - высота эллиптической части днища;  $h_1$  - высота цилиндрической части (борта) днища;  $S$  - толщина стенки

Для определения изменения толщины днища при горячей штамповке ультразвуковым толщиномером измерена толщина листовой заготовки днища в предварительно размеченных на поверхности точках (рисунок 2), затем после штамповки повторно измерена толщина штампованного днища в этих же точках. Точки размечены на двух центральных взаимно перпендикулярных осях  $A-A_1$ ,  $B-B_1$  с шагом 100 мм от центральной точки  $O$ . Для днищ с диаметром  $\varnothing 900 \dots \varnothing 1600$  мм размечены промежуточные точки для более точного построения эшюр. Оси идентифицированы путем маркирования ударным способом на припуске под штамповку.

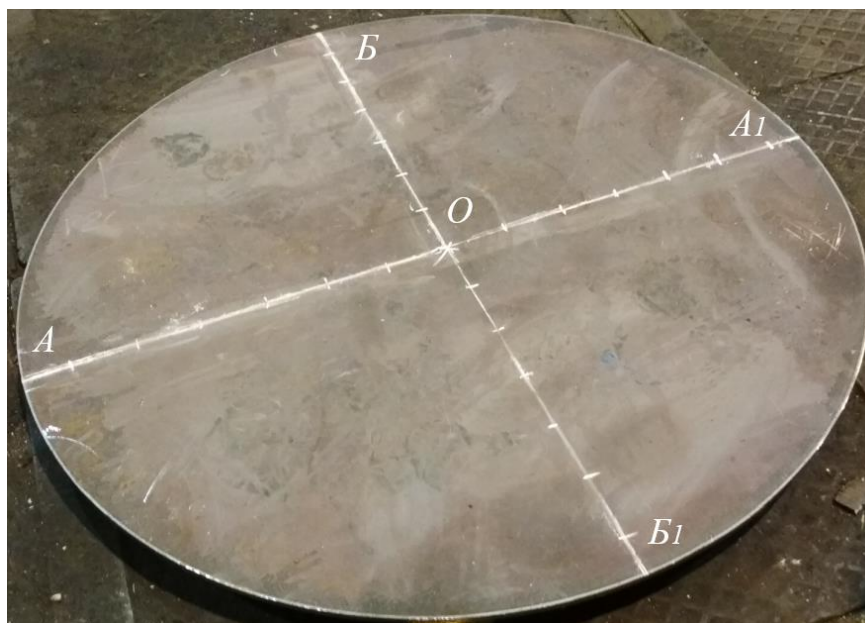


Рисунок 2 –Разметка заготовки днища для измерения толщины

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

$$\Delta = \frac{S_1 - S_0}{S_0} \times 100\%, \quad (1)$$

где  $S_0$  - толщина исходной плоской заготовки, мм;  $S_1$  - толщина стенки штампованного днища в этой же точке, мм. Отрицательные значения  $\Delta$  соответствуют утонению стенки, положительные – утолщению.

Проведена статистическая оценка экспериментальных данных, проверена гипотеза о нормальном распределении рассматриваемой случайной величины по критерию Пирсона. Оценка стабильности процесса и разброса экспериментальных данных проведена с помощью карт Шухарта (ГОСТ Р 50779.42-99).

На основании проведенных измерений и расчетов для каждого типоразмера днища построены эпюры и графики, характеризующие разнотолщинность стенки в меридиональных сечениях (рисунок 3).

В электронных таблицах Microsoft Excel построены регрессионные зависимости изменения толщины стенки горячештампованных днищ по их образующим (рисунок 4). Коэффициенты достоверности аппроксимации  $R^2$  построенных регрессионных зависимостей находятся в диапазоне от 0,9873 до 0,9973, что свидетельствует о достаточно высокой точности аппроксимации. Данные зависимости позволяют определить изменение толщины стенки в любом поперечном сечении в зависимости от его расположения относительно центральной оси днища.

Во всех случаях наблюдается характерное расположение зон изменения толщины стенки: утонение наблюдается в донной части днища, в зоне перехода эллиптической части в цилиндрическую, а на борту днища – утолщение.

Максимальное утонение днищ из углеродистых и низколегированных марганцево-кремнистых сталей, штампованных за 1 переход, достигает 3,4%, штампованных за 2 перехода - 4,3% (рисунок 3 а, б). Увеличение утонения днищ, изготовленных за 2 перехода, связано с повышением интенсивности окисления из-за повторного нагрева днищ. Зона с максимальным утонением расположена на эллиптической части днищ на пересечении образующей с осью, отклоненной на угол  $\alpha \sim 43^\circ$  относительно центральной оси днища.

Наименьшее утонение наблюдается у днищ из аустенитных сталей. Так, днища, штампованные за 2 перехода, то есть прошедшие 2 нагрева под штамповку, имеют максимальное утонение 1,5% (рисунок 3, в). Зона с максимальным утонением расположена на эллиптической части на пересечении образующей с осью, отклоненной на угол  $\alpha \sim 50^\circ$  центральной оси днища.

Отмечено, что 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 марганцево-кремнистых сталей.



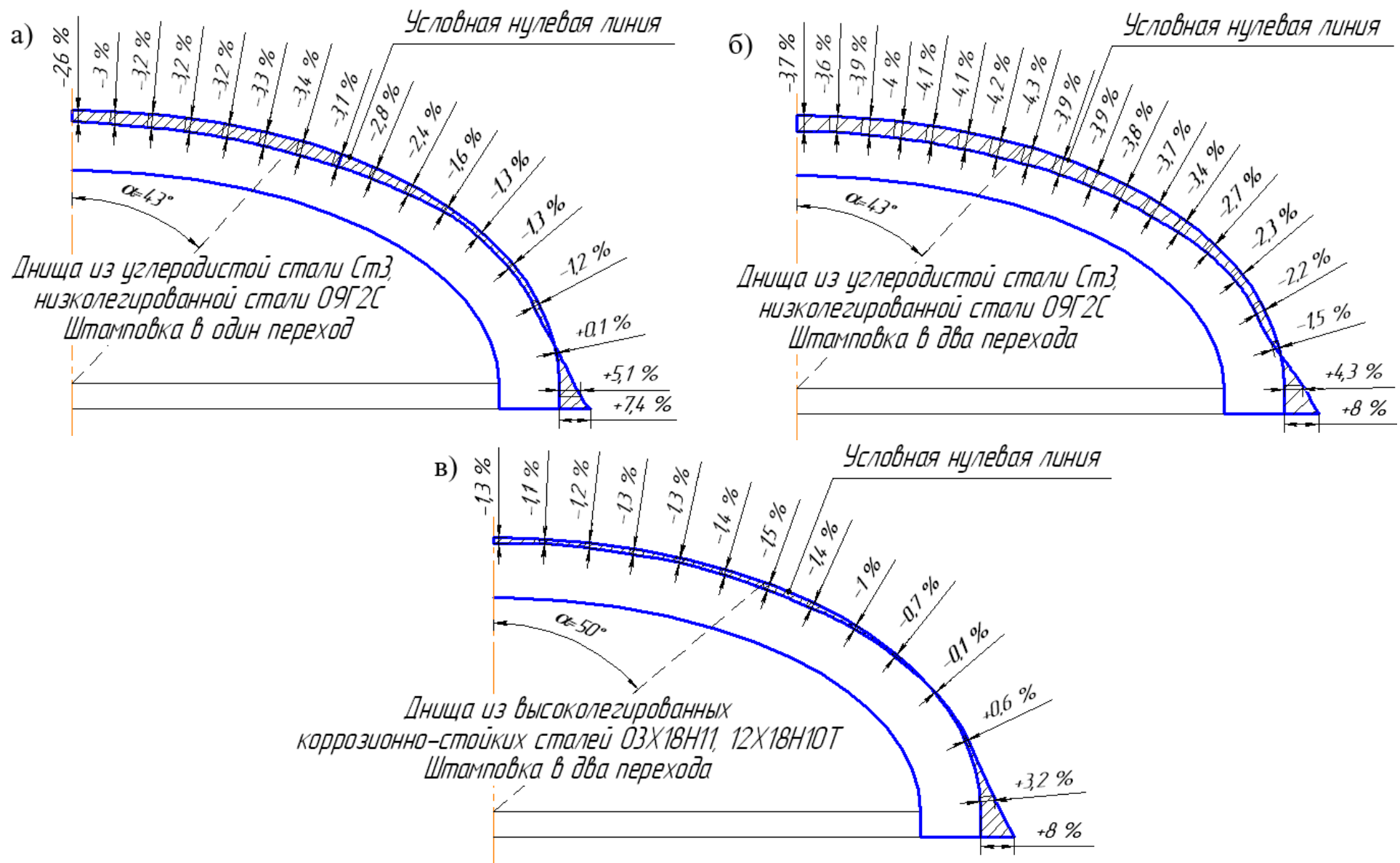


Рисунок 3 – Результаты экспериментального исследования: а) разнотолщинность стенки днищ из сталей Ст3, 09Г2С, штампованных за 1 переход; б) разнотолщинность стенки днищ из сталей Ст3, 09Г2С, штампованных за 2 перехода; в) разнотолщинность стенки днищ из сталей 03X18H11, 12X18H10T, штампованных за 2 перехода

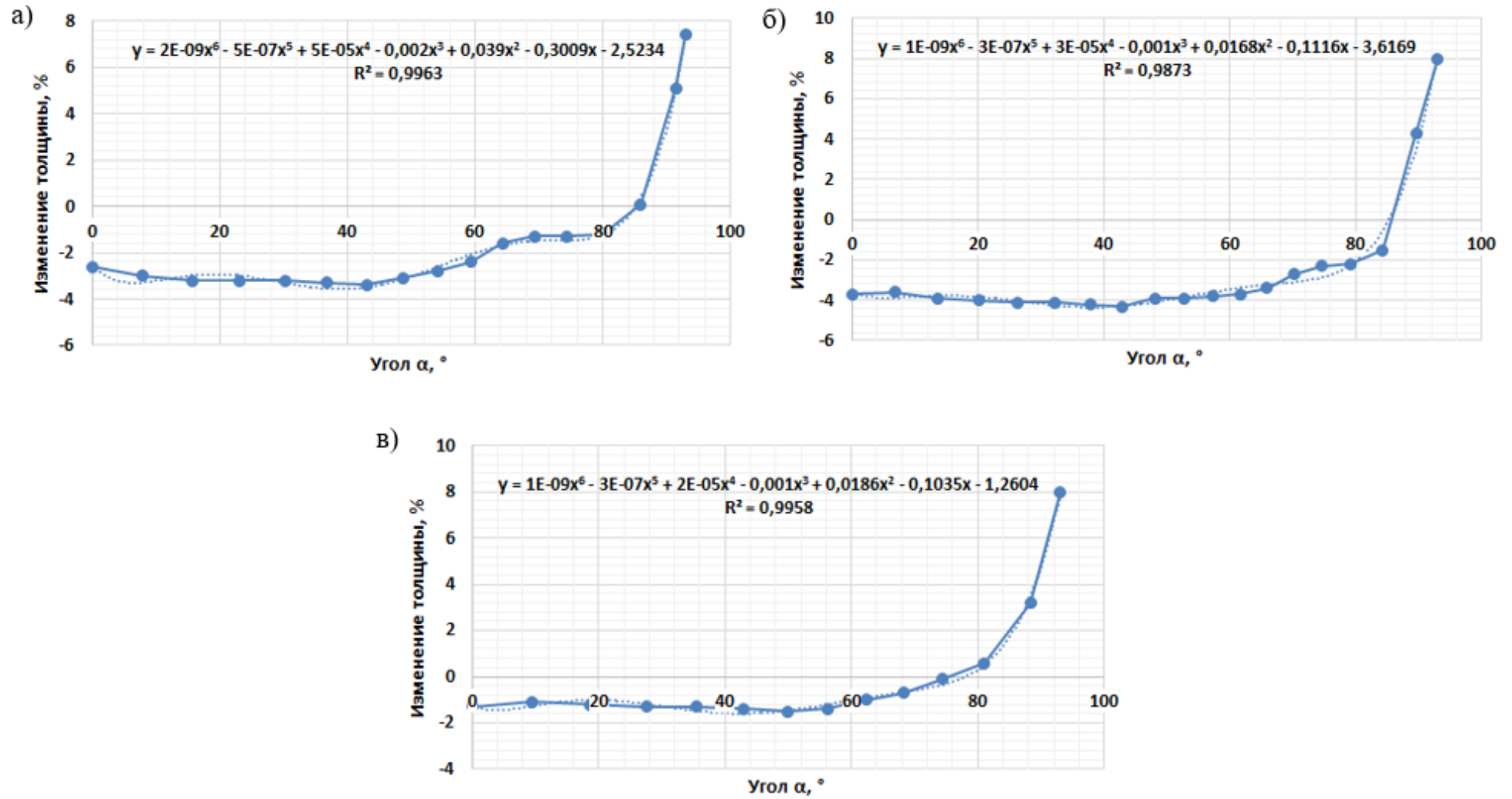


Рисунок 4 - Регрессионные зависимости изменения толщины стенки днищ: а) днища из сталей Ст3, 09Г2С, штампованных за 1 переход; б) днища из сталей Ст3, 09Г2С, штампованных за 2 перехода; в) днища из сталей 03Х18Н11, 12Х18Н10Т, штампованных за 2 перехода

Различия в величинах утонения днищ из аустенитных и углеродистых, низколегированных сталей можно объяснить, в частности, различной интенсивностью упрочнения при реализуемых деформационно-скоростных и температурных параметрах штамповки: сопротивление деформации стали 09Г2С в 1,45 раза меньше, чем стали 12Х18Н10Т, поэтому углеродистые и низколегированные стали деформируются легче, чем аустенитные.

Полученные в результате эксперимента данные свидетельствуют о том, что при расчете исполнительной толщины листовой заготовки из углеродистых и низколегированных сталей технологическую прибавку для компенсации утонения стенки при штамповке допускается снизить до 4,3%, из аустенитных сталей – до 1,5%.

Для исключения возможного понижения прочности днища в условиях изготовления в связи с производственными рисками, рекомендуется при расчете исполнительной толщины заготовки из углеродистых и низколегированных сталей технологическую прибавку для компенсации утонения стенки при штамповке принимать равной 10%, для днищ из аустенитных сталей – 7% вместо ранее принятых 15%. Это обеспечивает значительное снижение металлоемкости.

В **третьей главе** представлены результаты решения задачи по моделированию горячей штамповки эллиптического днища с внутренними базовыми размерами  $\varnothing 1600 \times 28$  мм из аустенитной стали 12Х18Н10Т в программном комплексе DEFORM-3D.

Начальные и граничные условия задачи:

1) Температурные параметры: процесс изотермический; температура инструмента и окружающей среды 20°C; температура заготовки 1100°C.

2) Заготовка: модель деформируемой среды – жесткопластическая с деформационно-скоростным упрочнением; показатель трения в законе Зибеля  $\psi = 0,3$  (графито-масляная смазка), контактные поверхности созданы с матрицей, пуансоном, прижимным кольцом; количество конечных элементов в сетке - 120 500 (рисунок 5).

3) Инструмент: жесткий, скорость движения пуансона 9,5 мм/сек; величина шага пуансона 4 мм; прижим неподвижен.



Рисунок 5 – Расположение элементов сетки по толщине заготовки

На рисунке 6 представлены основные этапы деформации днища.

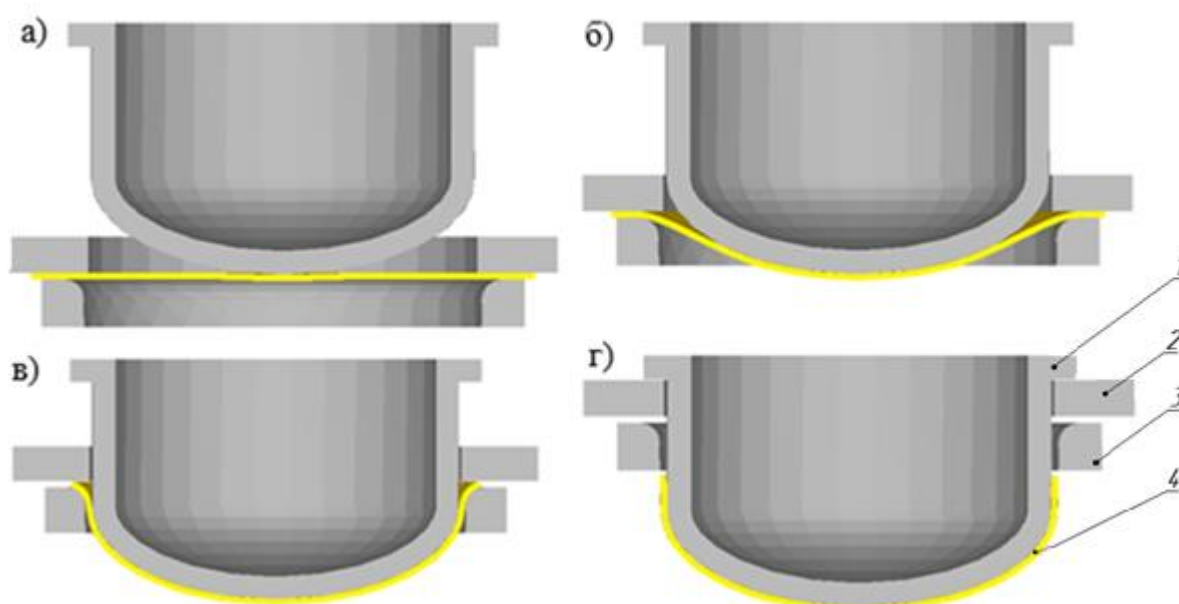


Рисунок 6 – Основные этапы деформации эллиптического днища: а) начало штамповки, касание пуансоном заготовки; б) формирование эллиптической части днища; в) формирование цилиндрической части днища (борта); г) выход борта днища из сменного кольца, окончание деформации; 1 – пуансон, 2 – прижим, 3 – матрица, 4 – отштампованное днище

Расчетные размеры и форма днища соответствовала требованиям ГОСТ 34347-2017. При моделировании штамповки днища образовались гофры высотой до 0,83 мм – допускается согласно ГОСТ 34347-2017.

На рисунке 7 представлены графики изменения силовых параметров процесса в зависимости от хода пуансона, рассчитанного в DEFORM-3D. Согласно данным графикам, требуемые силы штамповки и прижима заготовки – переменные. Точки экстремумов на графиках наблюдаются на 116 шаге расчета, когда ход пуансона составил 464 мм.

Как видно из графика, представленного на рисунке 7, сила вытяжки днища  $\varnothing 1600 \times 28$  мм из стали 12X18H10T, рассчитанная при моделировании технологического процесса в DEFORM-3D, составляет 7,14 МН. По опыту ПАО «Уралхиммаш», для штамповки указанного днища требуется сила вытяжки, равная 6,22 МН. Соответственно, сила вытяжки днища, рассчитанная в DEFORM-3D, больше на 15% производственных данных, что свидетельствует о достаточной сходимости результатов расчетов.

Сила прижима, рассчитанная при моделировании технологического процесса в DEFORM-3D, является переменной, максимальное значение - 3,88 МН (рисунок 7).

## Силловые параметры процесса

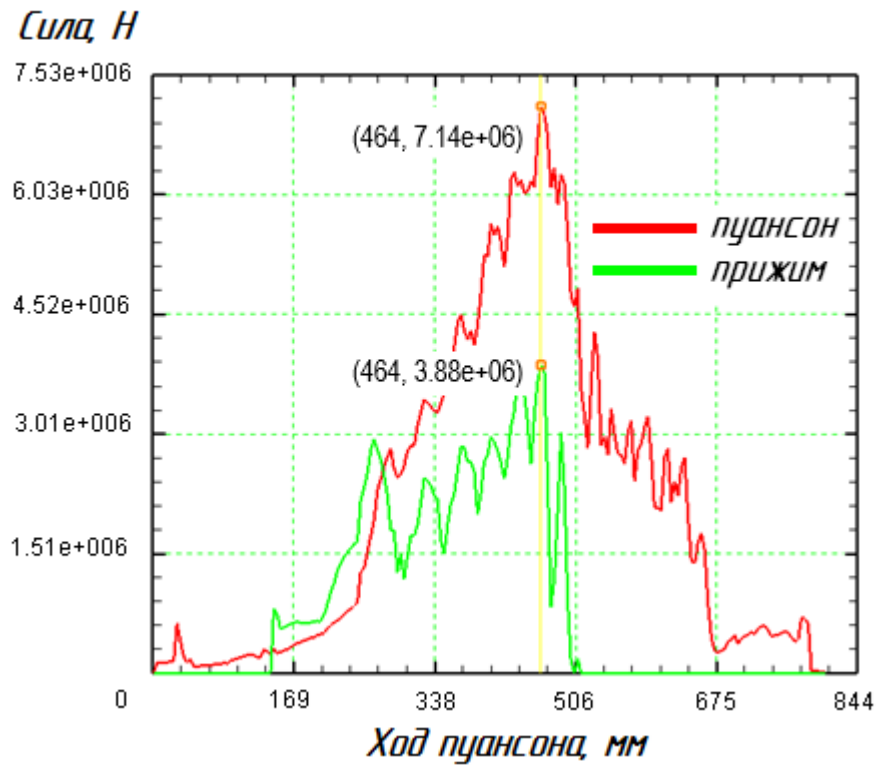


Рисунок 7 – Силловые параметры процесса штамповки, рассчитанного в DEFORM-3D

В процессе штамповки сила деформирования изменяется и достигает максимума при повороте кромок заготовки на угол  $\sim 70^\circ$  (рисунок 8). В этот момент поверхность перехода от цилиндрической к эллиптической части пуансона находится приблизительно на уровне центра радиуса скругления рабочей кромки матрицы, т.е. когда наблюдается минимальный зазор между матрицей и пуансоном.

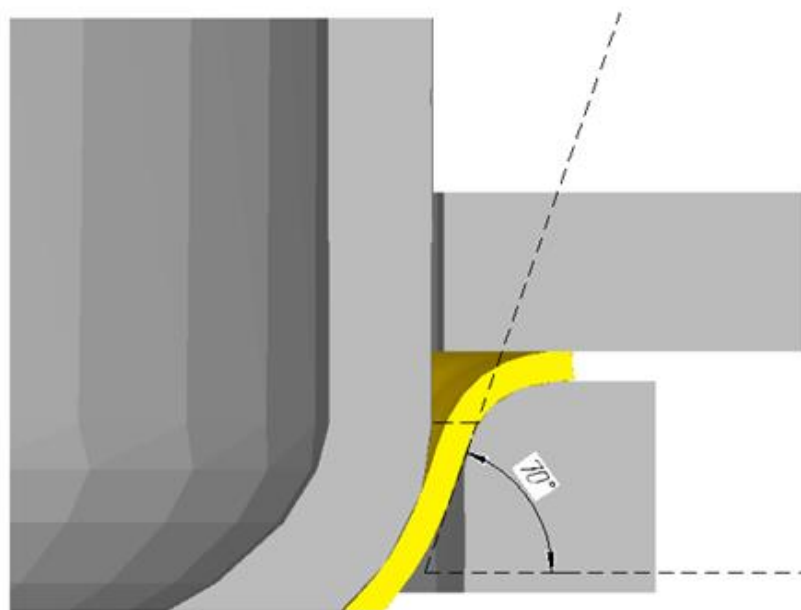


Рисунок 8 – Очаг деформации заготовки на 116 шаге расчета

По результатам измерений в пост-процессоре DEFORM-3D модели штампованного днища построена кривая, характеризующая разнотолщинность стенки в меридиональном сечении, и представлена на рисунке 9.

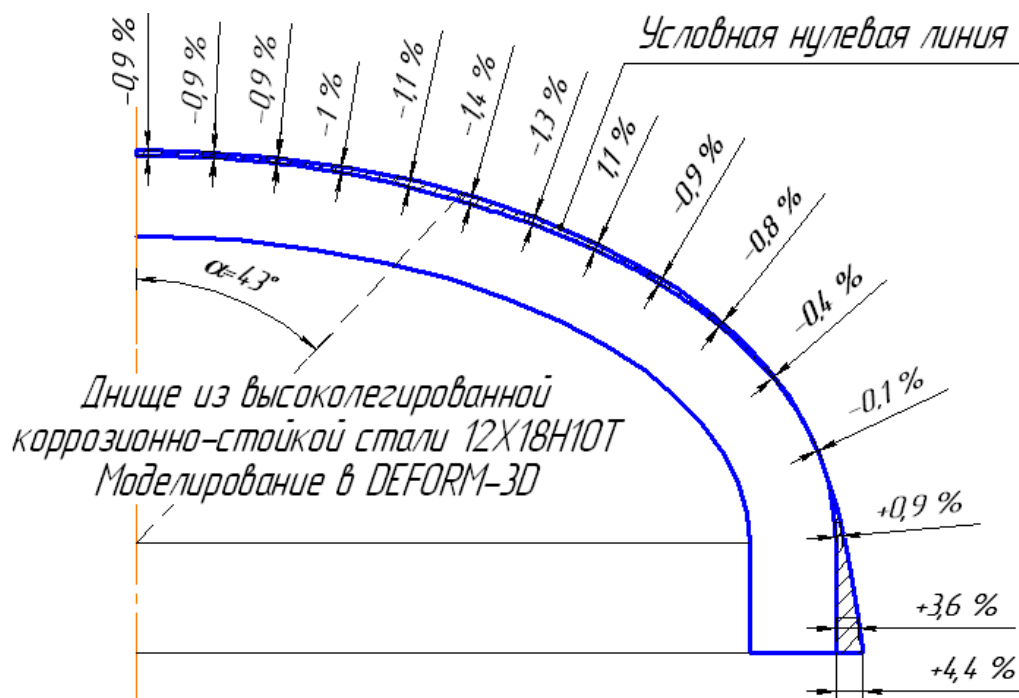


Рисунок 9 - Относительное изменение толщины стенки модели днища из стали 12X18H10T

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%. Высота борта по результатам моделирования составляет 148 мм, что сопоставимо с реальными производственными данными с учетом назначаемого припуска под штамповку и величины 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%. Соответственно, использование переменного в процессе штамповки прижима позволяет снизить утонение стенки днища (рисунок 10).

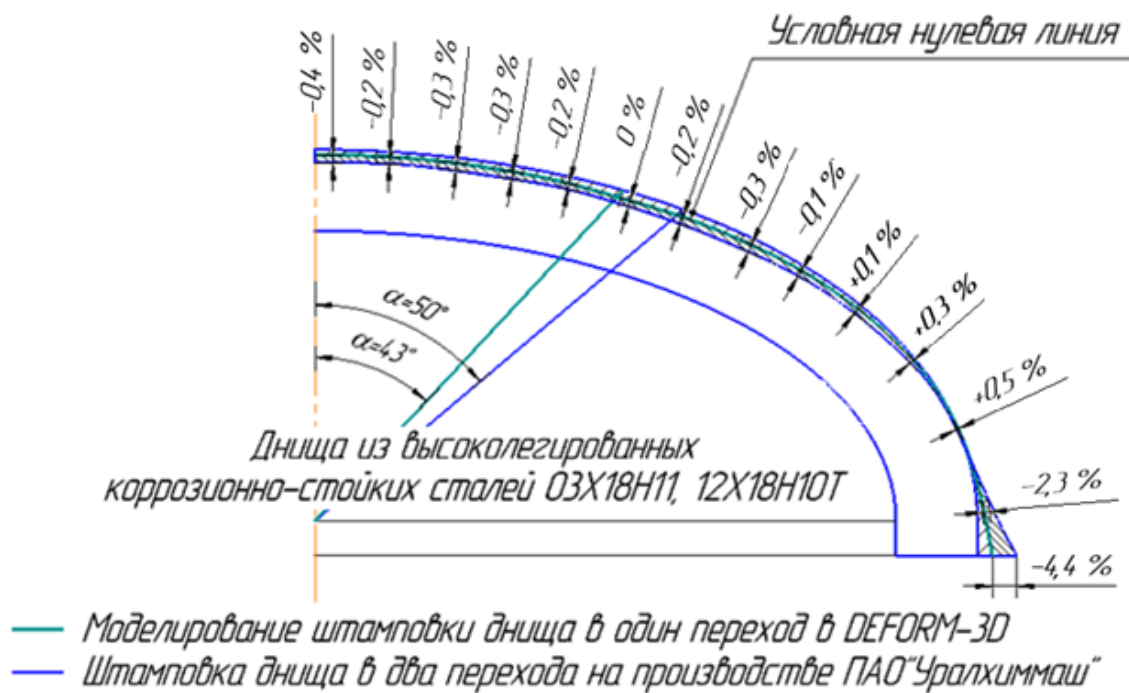


Рисунок 10 - Относительное изменение толщины стенки днища в результате эксперимента и моделирования

На рисунке 11 представлен график, полученный из пост-процессора «Поврежденность («Damage»)). В DEFORM-3D критерием разрушения по умолчанию является критерий Кокрофта-Латама.

Анализ распределения, приведенного на рисунке 11, 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.

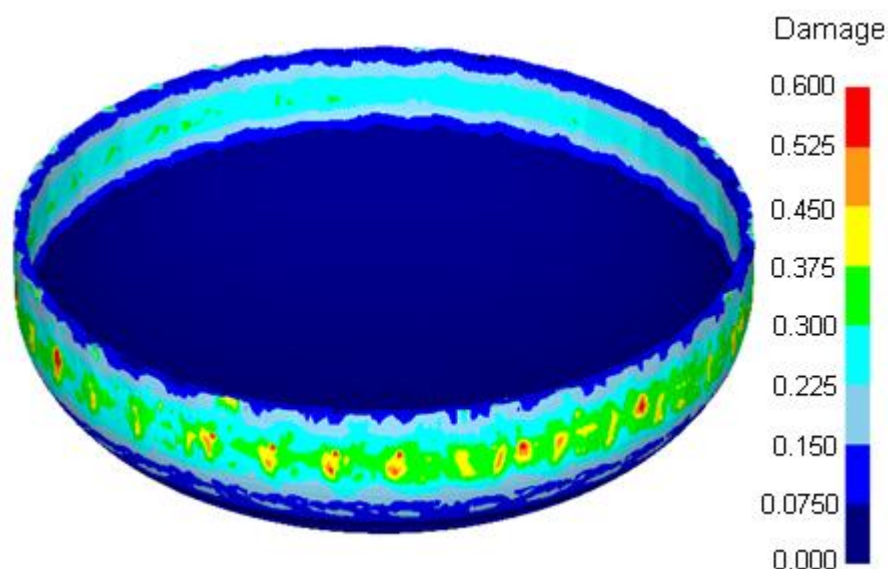


Рисунок 11 – Распределение поврежденности модели штампованного днища

На рисунке 12 представлен график пост-процессора «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.

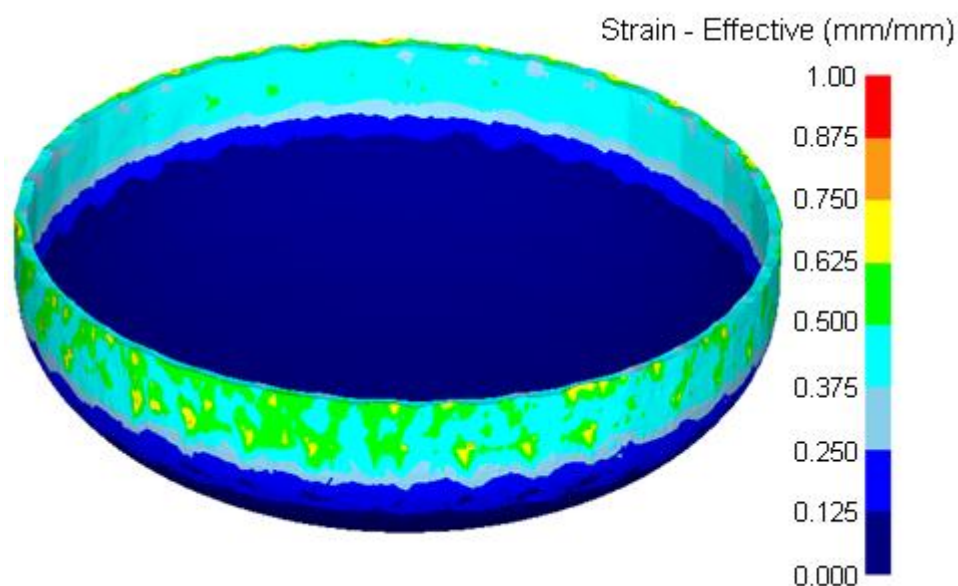


Рисунок 12 – Распределение интенсивности деформации модели штампованного днища

На рисунках 13, 14, 15 представлены графики пост-процессора «Напряжение» («Stress»). Рассмотрено распределение компонентов тензора напряжений  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$ ,  $\sigma_{zz}$ , возникающих в днище при его штамповке на 116 шаге задачи, когда силы штамповки и прижима достигают своего максимума, и начинается формирование борта.

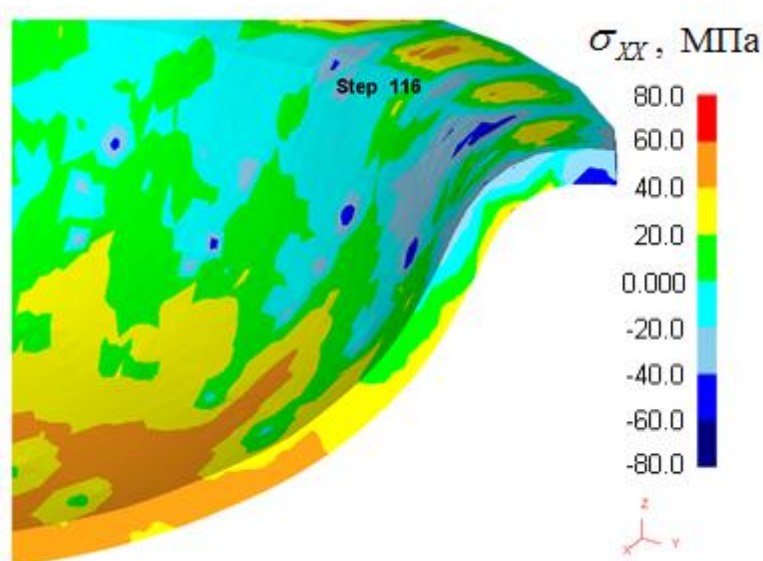


Рисунок 13 - Распределение напряжений  $\sigma_{xx}$  по объему днища



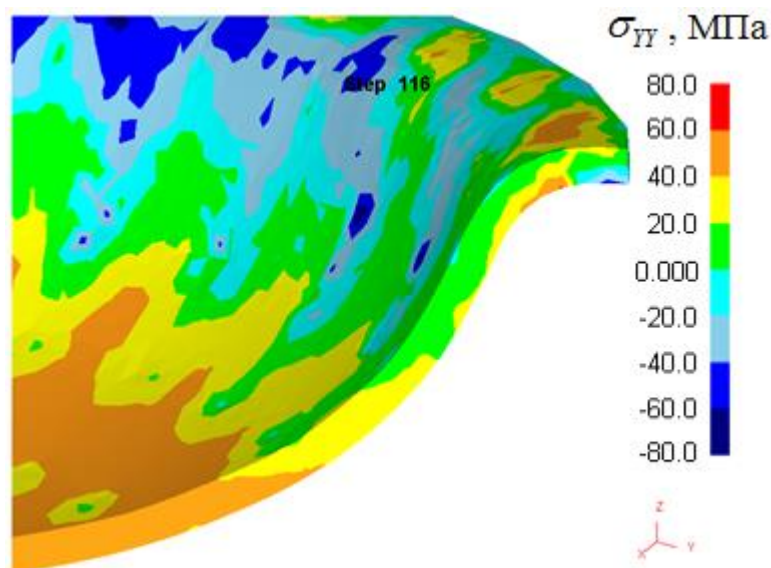


Рисунок 14 - Распределение напряжений  $\sigma_{yy}$  по объему днища

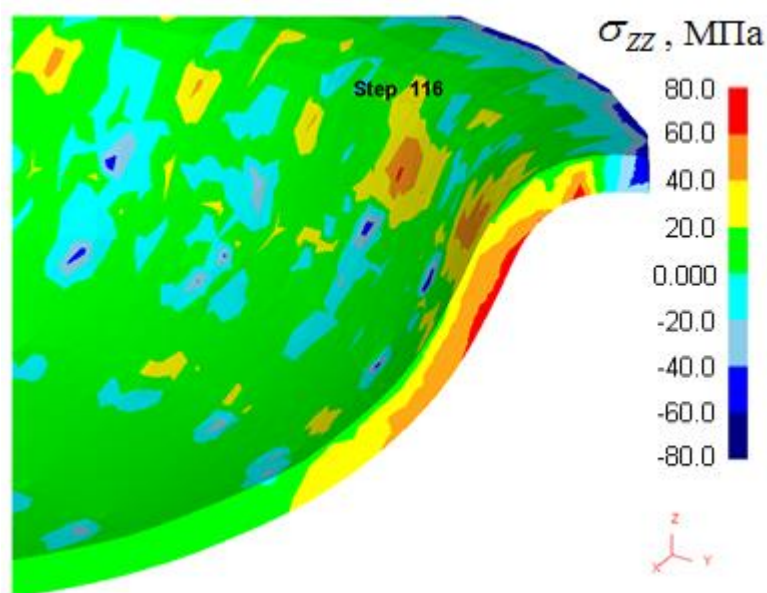


Рисунок 15 - Распределение напряжений  $\sigma_{zz}$  по объему днища

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 характерных зон изменения толщины стенки – утонения в зоне перехода эллиптической части в цилиндрическую, утолщения – на борту днища.

Сопоставление результатов компьютерного моделирования с результатами экспериментального исследования показало достаточную сходимость по силовым параметрам и по разнотолщинности днищ.

**Четвертая глава** содержит результаты производственных исследований, проведенных с целью разработки рекомендаций, направленных на улучшение существующего технологического процесса изготовления горячештампованных днищ.

1) Изготовление многослойной заготовки позволяет снизить интенсивность остывания днища при деформации, получить днища без дефектов формы, с минимальным утонением стенки при штамповке тонкостенных днищ, когда высока вероятность образования местных утонений или разрывов металла, а также, при предъявлении особых требований к утонению стенки днища при горячей штамповке.

2) Проведены производственные опытные работы по защите поверхности заготовок при помощи покрытий, что 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.

3) Реализован современный подход к оценке качества продукции с использованием комплексных показателей применительно к горячештампованным эллиптическим днищам.

Разработана методика комплексной оценки качества горячештампованных эллиптических днищ с использованием принципов квалиметрии на примере днища с размерами  $\text{Ø}4000 \times 22$  мм из стали 20К (рисунок 1).

Предложена иерархическая структура рассматриваемых показателей качества в соответствии с ГОСТ 34347-2017 (рисунок 16).

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

Рисунок 16 – Иерархическая структура показателей качества горячештампованного эллиптического днища

Проведено нормирование показателей качества в интервале (0...1) относительно разброса допускаемых ГОСТ значений свойств: определены минимальные  $x_{\min}$  и максимальные  $x_{\max}$  допускаемые, эталонные  $x_0$  и браковочные  $x_{бр}$  значения свойств. Нормированные значения  $k = 0$  соответствуют браку,  $k = 1$  – эталонному качеству. В таблице 1 приведен перечень показателей для оценки точности днищ. Аналогичные расчеты были сделаны для других групп свойств, показанных на рисунке 16.

Таблица 1 – Перечень единичных свойств для оценки точности горячештампованного эллиптического днища с размерами  $\text{Ø}4000 \times 22$  мм

N	Свойство	$x_{\min}$	$x_{\max}$	$x_3$	$x_{\text{бр}}$	Формула для расчета $k_i$
1	Отклонение внутреннего диаметра $\Delta D_6$ , 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 $\Delta h$ , мм	0	5	0	6	$k_3 = 1 - \frac{x_{\text{факт}}}{6}$
4	Высота гофр 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 $\Delta m$ , мм	0	5	0	6	$k_6 = 1 - \frac{x_{\text{факт}}}{6}$
7	Зазор между шаблоном и эллипсоидной частью $\Delta r$ , мм	0	16	0	17	$k_7 = 1 - \frac{x_{\text{факт}}}{17}$
8	Зазор между шаблоном и эллипсоидной частью $\Delta R$ , 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	$k_9 = 1 - \frac{x_{\text{факт}}}{15,1}$

Для каждого свойства определены коэффициенты значимости  $a_i$  экспертным методом.

Итоговую оценку качества отобранных днищ выполнили с помощью комплексного показателя качества продукции  $k_0$ , рассчитанного по двум вариантам: как средневзвешенное арифметическое  $k_0 = \sum_{i=1}^{17} k_i \times a_i$  и

средневзвешенное геометрическое  $k_0 = \prod_{i=1}^{17} k_i^{a_i}$  значений 17 единичных свойств.

Рассчитанные комплексные показатели качества исследуемых днищ составили, соответственно,  $k_0 = 0,893$  и  $0,883$ , что по шкале Харрингтона соответствует высокому качеству, даже несколько превосходящему требования стандартов.

Примененный подход к оценке качества горячештампованных эллиптических днищ с помощью комплексных показателей качества позволил сделать вывод о достаточно высоком технологическом уровне ПАО «Уралхиммаш». Из анализа единичных свойств днищ выявлены определенные резервы повышения качества за счет совершенствования технологических режимов обработки днищ на всех стадиях.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

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 за 2 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 марганцево-кремнистых сталей марок Ст3, 09Г2С, штампованных за 1 переход, достигает 3,4%, штампованных за 2 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 08X18H10T) соответствуют днищам из углеродистых и низколегированных марганцево-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 рекомендуется 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 горячештаповочных эллиптических днищ с использованием принципов квалиметрии.

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

8. Внедрение результатов работы в производство обеспечит снижение расходов на производство эллиптических горячештапованных 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 РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в рецензируемых изданиях, определенных ВАК:

1. Горбунова Ю.Д. 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. (0,5 / 0,2 п.л.)
2. 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. (0,48 / 0,18 п.л.)
3. Горбунова Ю.Д. 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. (0,52 / 0,22 п.л.) (*Индексирована в Chemical Abstracts*)
4. 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. (0,58 / 0,2 п.л.) (*Индексирована в Chemical Abstracts*)

### Публикации в других изданиях:

5. Горбунова Ю.Д. 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 ИРНИТУ, 2018. - С. 73-77. (0,48 / 0,2 п.л.)
6. 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 металлургов — молодых ученых (Екатеринбург, 19–23 ноября 2018 г.). - Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. - С. 531-534. (0,3 / 0,1 п.л.)