

На правах рукописи



ФАМ ВАН НГОК

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛЫХ
ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ С ФЛАНЦЕМ МЕТОДОМ
КОМБИНИРОВАННОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ В ИЗОТЕРМИЧЕСКИХ
УСЛОВИЯХ**

Специальность: 2.6.4. Обработка металлов давлением
(технические науки)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2023

Работа выполнена на кафедре «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский политехнический университет»

Научный руководитель: **Петров Павел Александрович**
кандидат технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», заведующий кафедрой «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии», г. Москва

Официальные оппоненты: **Черняев Алексей Владимирович**
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», кафедра «Механика и процессы пластического формоизменения», г. Тула

Головкин Павел Александрович
кандидат технических наук, АО «Плутон», начальник лаборатории входного контроля материалов, г. Москва

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва


Защита состоится «04» октября 2023 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.2.327.05 в ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 121552, г. Москва, ул. Оршанская, д.3, аудитория 523А.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, А-80, ГСП-3, МАИ, ученому секретарю диссертационного совета и по электронной почте paltievichar@mai.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета и на сайте https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT_ID=174011

Автореферат диссертации разослан « » _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
24.2.327.05, к.т.н., доцент



Палтиевич А.Р.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Осесимметричные кованные либо штампованные детали с фланцем являются достаточно распространенными изделиями (стаканы, корпуса, ступицы и т.д.), применяемыми в современной технике. Материалы, из которых изготавливают вышеуказанные изделия разнообразны: стали разных марок, цветные сплавы, в том числе алюминиевые, титановые и др.

Существенную часть заготовок для деталей с фланцем получают обработкой давлением, в частности горячей объемной штамповкой в открытых либо закрытых штампах, в том числе в штампах с разъемными матрицами и с компенсаторами, а также в штампах для выдавливания. Штампы для выдавливания позволяют реализовать комбинированные схемы формоизменения (прямое-обратное выдавливание, прямое-обратное-радиальное выдавливание, обратное-радиальное выдавливание и т.п.) за один рабочий ход машины для обработки давлением и изготовить сложнопрофильные изделия. К технологиям, в которых применяются штампы для выдавливания, относится горячая изотермическая штамповка, широко применяемая для обработки алюминиевых сплавов. Изотермическая штамповка позволяет повысить коэффициент использования металла (КИМ) за счет уменьшения припусков и напусков, назначаемых при проектировании штампованного изделия. Это обеспечивает сокращение операций в технологическом процессе изотермической штамповки, а снижение величины напусков способствует изготовлению сложнопрофильных штампованных деталей.

Одной из разновидностей сложнопрофильных штампованных деталей с фланцем, изготавливаемых из алюминиевых сплавов системы Al-Mg (AMg2, AMg3, AMg5, AMg6) по технологии горячей изотермической штамповки, являются полые осесимметричные штампованные изделия с развитым фланцем (диаметр фланца составляет 1,5-2 диаметра центральной части изделия при отношении диаметра фланца к его толщине не более 85) из сплава AMg6. Применение штампов для выдавливания не исключает возможности образования дефектов из-за сложного характера течения деформируемого материала в формообразующей полости.

Одной из проблем технологии горячей изотермической штамповки, обеспечивающей комбинированную схему формоизменения полых осесимметричных штамповок с развитым фланцем из алюминиевых сплавов,

является образование дефектов типа утяжина и/или прострел (терминология в соответствии с ГОСТ Р 57511-2017) в области фланцевой части, формируемой комбинированным выдавливанием. Наличие данного дефекта на штамповке существенно снижает её качество. Считается, что его образование возникает из-за потери устойчивости стенки в области фланца полой штампованной детали, что приводит к нестабильности выполнения технологического процесса горячей изотермической штамповки за счет неравномерного течения металла, приводящего к снижению качества штамповок из алюминиевых сплавов. На решение указанной актуальной научно-технологической задачи направлена диссертационная работа.

Цель диссертационной работы – повышение качества полых осесимметричных изделий с фланцем из алюминиевого сплава АМг6 посредством совершенствования технологии штамповки за счет управления устойчивостью заготовок при их комбинированном выдавливании в изотермических условиях.

Объектом исследования является процесс комбинированного выдавливания, реализуемый в условиях горячей изотермической деформации.

Предметом исследования является устойчивость заготовки при формировании фланца, составляющего 1,5-2 диаметра центральной части осесимметричного изделия, получаемого путем комбинированного выдавливания в условиях горячей изотермической деформации.

Задачи исследования:

1. Исследовать реологические свойства алюминиевых сплавов системы Al-Mg, характерным представителем которой является сплав АМг6, для области значений скорости деформации $0,001-0,4 \text{ с}^{-1}$ и области значений температуры деформирования $20-450^\circ\text{C}$, в том числе, соответствующих интервалу горячей изотермической штамповки на основе натурального и вычислительного эксперимента и установить закономерности взаимосвязи сопротивления деформации (напряжения текучести) с величиной деформации, скорости деформации, температуры и процентного содержания магния в сплаве.

2. Исследовать экспериментально особенности течения материала при формировании фланца, получаемого путем комбинированного выдавливания в условиях горячей изотермической штамповки полого осесимметричного изделия из сплава АМг6.

3. Обобщить результаты экспериментальных исследований связанных с изучением особенностей течения сплава АМг6 при формировании фланца и разработать математическую модель, связывающую параметр, характеризующий потерю устойчивости заготовки при её комбинированном выдавливании в изотермических условиях, с параметрами, характеризующими геометрию заготовки, геометрию стенки выдавливаемого полуфабриката, а также условия контактного трения.

4. Разработать научно-обоснованные режимы комбинированного выдавливания в условиях горячей изотермической деформации осесимметричного изделия с фланцем, диаметр которого в 1,5-2 раза больше диаметра его центральной части, при этом отношение диаметра фланца к его толщине не более 85, позволяющие управлять устойчивостью течения материала в стенке заготовки при её формообразовании.

5. На основании установленных в ходе натурных и вычислительных экспериментов научно-обоснованных режимов комбинированного выдавливания разработать рекомендации для проектирования параметров технологии горячей изотермической штамповки осесимметричных изделий с развитым фланцем из алюминиевого сплава АМг6.

Научная новизна работы:

1. Впервые с использованием установленной функциональной зависимости между напряжением текучести и температурно-скоростными параметрами, основываясь на экспериментальных данных и проведенных вычислительных экспериментах, получены эмпирические формулы для описания реологических свойств алюминиевых сплавов системы Al-Mg (АМг2, АМг3, АМг5, АМг6) при деформировании в области значений скорости деформации $0,001-0,4 \text{ с}^{-1}$ в холодном, полугорячем и горячем состоянии, в том числе, в условиях, близких к изотермическим, отличающиеся от известных учетом процентного содержания магния в деформируемом материале и обеспечивающие высокую сходимость расчетных и экспериментальных значений ($R^2 = 0,923-0,955$).

2. Впервые выявлена взаимосвязь между параметром, характеризующим потерю устойчивости (образование дефекта типа «утяжина» и/или «прострел») заготовки при её комбинированном выдавливании в изотермических условиях, и параметрами, характеризующими геометрию заготовки, геометрию стенки

выдавливаемого полуфабриката, а также условия контактного трения и разработаны математические модели, отражающие выявленные взаимосвязи.

3. На основе натурального и вычислительного экспериментов, разработана компьютерная модель технологической операции комбинированного выдавливания полых осесимметричных изделий с фланцем, реализуемой в условиях горячей изотермической деформации и позволяющей оценить энергосиловые параметры, напряженно-деформированное состояние в очаге деформации, распределение компонентов скорости деформации и спрогнозировать образование дефектов типа «утяжина» и «прострел».

4. Разработан алгоритм для прогнозирования значения напряжения текучести при фиксированных значениях величины деформации, скорости деформации, температуры и процентного содержания магния в сплаве системы Al-Mg на основе полученных зависимостей для описания сопротивления деформированию сплавов системы Al-Mg.

Практическая значимость работы.

1. Разработаны научно-обоснованные режимы комбинированного выдавливания в условиях горячей изотермической деформации осесимметричного изделия с фланцем, позволяющие управлять устойчивостью заготовки при её комбинированном выдавливании.

2. Разработаны рекомендации для проектирования технологии горячей изотермической штамповки осесимметричных изделий с развитым фланцем из алюминиевых сплавов системы Al-Mg.

3. Разработан алгоритм и получено свидетельство на программу для ЭВМ для построения изотермической кривой текучести и расчета коэффициентов математической модели сопротивления деформации.

4. Разработан алгоритм и получено свидетельство на программу для ЭВМ для прогнозирования текущего значения напряжения текучести при фиксированных значениях величины деформации, скорости деформации, температуры и процентного содержания магния в сплаве системы Al-Mg на основе модели сопротивления деформации. Данный алгоритм может быть применен на этапе подготовки производства для оценки значения силы деформирования.

Методы исследования.

Результаты натуральных экспериментов явились базой для вычислительных экспериментов, обеспечивая реализацию математического (компьютерного)

моделирования исследуемого процесса обработки давлением, что стало возможным за счет использования контрольно-измерительной аппаратуры и применения физико-химических методов исследования (световая микроскопия, растровая электронная микроскопия, оптико-эмиссионный спектральный анализ).

В теоретических исследованиях использовалось математическое моделирование на основе метода конечных элементов, реализующего вариационную формулировку, основных положений механики сплошной среды и прикладной теории пластичности. Расчеты производились в программе MATLAB для обработки результатов экспериментальных исследований реологического поведения изученных алюминиевых сплавов; а также в программном комплексе QForm методом конечных элементов. Экспериментальные исследования процесса комбинированного выдавливания в изотермических условиях производились на лабораторной установке, установленной на гидравлическом прессе номинальной силой 2,5МН, с непосредственным контролем положения формообразующего инструмента во время рабочего хода.

Положения, выносимые на защиту:

1. Функциональные зависимости, описывающие взаимосвязь сопротивления деформированию (напряжения текучести) алюминиевых сплавов системы Al-Mg (AMg2, AMg3, AMg5, AMg6) от температурно-скоростных параметров и процентного содержания магния, как основного легирующего элемента для области значений скорости деформации $0,001-0,4 \text{ с}^{-1}$ и области значений температуры 20-450°C.

2. Функциональные зависимости, описывающие взаимосвязи между параметром, характеризующим потерю устойчивости (образование дефекта типа «утяжина» и/или «прострел») заготовки сплава системы Al-Mg, и параметрами, характеризующими исследуемый процесс деформирования, полученные по результатам вычислительных экспериментов, выполненных с применением разработанной компьютерной модели технологической операции комбинированного выдавливания полых осесимметричных изделий с фланцем.

3. Научно-обоснованные режимы горячей изотермической штамповки полого осесимметричного изделия с фланцем, диаметр которого в 1,5-2 раза больше диаметра его центральной части, при этом отношении диаметра фланца

к его толщине не более 85, позволяющие управлять устойчивостью заготовки при её формообразовании, полученные по результатам исследований, выполненных с применением компьютерной модели технологической операции комбинированного выдавливания.

Степень достоверности результатов научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, подтверждается использованием известных научных гипотез, теоретических методов, корректных ограничений и допущений, полученных в результате выполненного информационно-аналитического поиска технической информации из достоверных источников, в том числе монографий, справочников, периодических изданий отечественных и зарубежных авторов. Результаты теоретического исследования основаны на полученных данных, описывающих сопротивление деформации (напряжение текучести) алюминиевых сплавов системы Al-Mg и применены при разработке компьютерной модели процесса комбинированного выдавливания полых осесимметричных изделий с фланцем за одну операцию в изотермических условиях.

Практические результаты получены на универсальном испытательном оборудовании с помощью современной регистрирующей аппаратуры и подтверждаются соответствием результатов теоретических исследований лабораторным экспериментам, а также непротиворечивостью информации открытых источников.

Апробация работы. Основные результаты исследования докладывались и обсуждались на следующих конгрессах, конференциях и семинарах:

- III Международная научно-техническая конференция, посвященная 120-летию со дня рождения член-корреспондента АН СССР И.М. Павлова «Павловские чтения» (г. Москва, 27-28 мая 2021 г.);

- XXVIII Международная научно-техническая конференция «Машиностроение и техносфера XXI ВЕКА» в рамках международного форума «ТЕХНОСФЕРА - 2021» (г. Севастополь, 13-19 сентября 2021 г.);

- Всероссийская научно-техническая конференции студентов и аспирантов «Современные технологии обработки металлов и средства их автоматизации» (г. Тула, 12 октября 2021 г.);

- Международная научно-техническая конференция молодых ученых «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности» (г. Могилёв, Беларусь, 28-29 октября 2021 г.)

- XXXIII Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения «МИКМУС - 2021» (г. Москва, 30 ноября – 02 декабря 2021 г.);

- научно-техническая конференция «Современные тенденции развития инструментальных систем и металлообрабатывающих комплексов», посвященная памяти заслуженного деятеля науки и техники РФ, д.т.н., профессора А.А. Рыжкина (г. Ростов-на-Дону, 21 января 2022 г., Донской государственный технический университет);

- V Международная научно-техническая конференция «Машины, агрегаты и процессы. Проектирование, создание и модернизация» (г. Санкт-Петербург, 27 января 2022 г.);

- II Международная научно-практическая конференция «Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов» (г. Томск. 26-28 апреля 2022 г.).

Реализация работы. Результаты выполненных исследований внедрены в учебный процесс по направлению подготовки «Технологии материалов» при подготовке аспирантов в Московском политехническом университете, а также в учебный процесс Института машиностроения Вьетнамского Морского университета (г. Хайфон, Вьетнам) и исследовательский процесс Механического научно-исследовательского института (г. Ханой, Вьетнам).

Публикации. По теме диссертации опубликован 21 труд, в том числе 5 статей в рецензируемых изданиях из перечня ВАК, 3 статьи в журналах, включенных в международные наукометрические базы Scopus и Web of Science; получены 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка, приложений. Текст диссертации изложен на 192 страницах машинописного текста, иллюстрирован 72 рисунками, содержит 15 таблиц и 5 приложений. Библиографический список включает 129 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования, представлены научная новизна, теоретическая и практическая

значимость работы, перечислены положения, выносимые автором на защиту, а также определены цель и задачи исследования.

В первой главе «Анализ состояния вопроса и задачи исследования» представлены основные тенденции в технологии горячей изотермической штамповки для изготовления осесимметричных изделий с фланцем из алюминиевых сплавов и проведен анализ причин возникновения дефекта типа «утяжина» и типа «прострел», возникающего при штамповке. Показан внешний вид полого осесимметричного изделия с фланцем из сплава АМгб, технология горячей изотермической штамповки которого исследуется в диссертации (рисунок 1).



а) опытный образец



б) 3D-модель штампованного изделия

Рисунок 1 – Внешний вид полого осесимметричного изделия с фланцем

Отмечена важность управления устойчивостью заготовки в процессе её формообразования и проведен обзор и анализ технологий комбинированного выдавливания изделий с фланцами различной конфигурации; различных подходов к разработке термомеханических режимов деформирования; различных подходов к оценке потери устойчивости заготовки при её формоизменении и прогнозированию дефектообразования. К исследованиям в данной области относятся работы И.С. Алиева, А.Э. Артеса, В.В. Бойцова, Р.А. Вайсбурда, А.Л. Воронцова, В.И. Галкина, О.А. Ганаго, Г.Я. Гуна, Ю.Г. Калпина, Б.Г. Каплунова, В.И. Перфилова, Л.А. Рябичевой, К.Н. Соломонова, Е.Н. Сосенушкина, И.Я. Тарновского, А.Д. Томленова, С.З.Фиглина и других. Анализ состояния вопроса показал, что среди известных моделей дефектообразования отсутствуют данные о их применимости к прогнозированию формирования дефектов типа «утяжина» и «прострел» в процессе полых осесимметричных изделий с фланцем, диаметр которого в 1,5-2 раза больше диаметра его центральной части, при этом отношение диаметра фланца к его толщине не более 85. Также отсутствуют систематизированные данные о реологических свойствах деформируемых алюминиевых сплавов системы Al-Mg с одновременным учетом влияния четырех параметров: температура, деформация, скорость деформации и процентное содержание

магния в сплаве – на сопротивление деформации для любого из возможных режимов: холодная, полугорячая, горячая деформация. С учетом текущего состояния вопроса сформулированы цель и задачи работы.

Во второй главе «Методика построения изотермической кривой текучести алюминиевых сплавов» представлена методика исследования сопротивления деформации сплавов системы Al-Mg на основе применения физического (натурного) и математического (вычислительного) эксперимента, в соответствии с которой обосновывается выбор геометрических размеров образцов для проведения натуральных экспериментов; выполняется расчет программ монотонного нагружения с применением выбранных универсальных испытательных машин с различными техническими характеристиками; составляется методика обработки экспериментальных результатов и осуществляется выбор температурно-скоростных условий проведения экспериментов.

По представленной методике проведены натурные и вычислительные эксперименты, направленные на определение реологических свойств сплавов системы Al-Mg - сплавов AMg2, AMg3, AMg5, AMg6. Эксперименты выполнены по схеме осесимметричного сжатия с применением цилиндрических образцов в следующих температурно-скоростных условиях: 1) скорость деформации в каждом эксперименте равна $0,001 \text{ с}^{-1}$, $0,01 \text{ с}^{-1}$ или $0,4 \text{ с}^{-1}$; 2) скоростные условия поддерживаются в каждом эксперименте таким образом, чтобы обеспечить постоянную скорость деформации; 3) температура нагрева образца до начала проведения эксперимента - 20°C , 300°C , 400°C , 450°C ; 4) температурные условия деформирования образцов поддерживаются постоянными с помощью контрольно-задающей аппаратуры универсальной испытательной машины.

На этапе обработки результатов натурного эксперимента полученные экспериментальные данные приводятся к условиям проведения испытания на сжатие при номинальных значениях: 1) контактное трение отсутствует и форма образца не искажается; 2) температура при сжатии постоянная и равна температуре нагрева образца до проведения натурного эксперимента; 3) скорость деформации в процессе сжатия образца постоянна и равна номинальному значению. Таким образом, оказывается возможным получить изотермические кривые текучести для определения взаимосвязи сопротивления

деформации (напряжения текучести) от термомеханических параметров и процентного содержания магния.

В третьей главе «Составление математической модели сопротивления деформации при постоянной скорости деформации» представлены результаты натуральных и вычислительных экспериментов, выполненных в соответствии с описанной во второй главе методикой исследования сопротивления сплавов системы Al-Mg пластической деформации. Полученные результаты позволили построить изотермические кривые текучести сплавов АМг2, АМг3, АМг5, АМг6 в температурно-скоростном диапазоне: $T \in [20; 450] \text{ } ^\circ\text{C}$ и $\dot{\varepsilon}_i \in [0,001; 0,4] \text{ c}^{-1}$. На рисунке 2 в качестве примера представлены изотермические кривые текучести сплава АМг6. Аналогичные результаты в виде изотермических кривых текучести получены для сплавов АМг2, АМг3 и АМг5.

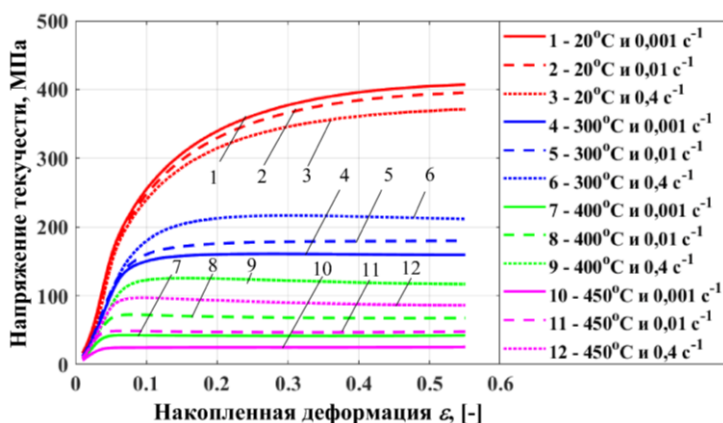


Рисунок 2 – Изотермические кривые текучести сплава АМг6

На основе данных (рисунок 2) определены реологические свойства (функциональные зависимости) исследуемых сплавов. В качестве допущений принято:

1) взаимосвязь между сопротивлением алюминиевого сплава деформации и термомеханическими параметрами может быть записана в виде математической функции с девятью неизвестными коэффициентами, предложенной А. Хензелем – Т. Шпиттелем и основанной на методе термомеханических коэффициентов:

$$\sigma_i = m_1 \cdot e^{m_2 T} \cdot \varepsilon_i^{m_3} \cdot \dot{\varepsilon}_i^{m_4} \cdot e^{m_5 / \varepsilon_i} \cdot (1 + \varepsilon_i)^{m_6} \cdot e^{m_7 \varepsilon_i} \cdot \dot{\varepsilon}_i^{m_8} \cdot T^{m_9}, \quad (1)$$

где $m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, m_6, m_7, m_8, m_9$ – неизвестные коэффициенты; σ_i – напряжение текучести в текущий момент времени t_i для текущего значения температуры T_i ; ε_i – накопленная деформации; $\dot{\varepsilon}_i$ – скорость деформации;

2) точность модели (1) оценивается величиной коэффициента детерминации (R^2), значение которого должно быть не менее 0,7 и не более 1,0, для того, чтобы регрессионная модель имела высокую значимость:

3) применение модели (1) в расчётных программных комплексах, например, QForm предполагает, что на каждом шаге расчёта по времени определяется текущее значение напряжения текучести; время является независимым параметром и шаг приращения времени мал в сравнении с временем всего процесса деформирования;

4) применение модели (1) обосновано для прогнозирования сопротивления деформации в прикладных задачах обработки давлением при значении накопленной деформации, не превышающего $\varepsilon_i = 2,0$.

Выполнено обобщение результатов экспериментальных исследования сопротивления деформации сплавов системы Al-Mg. На основе обобщения разработана регрессионная модель сопротивления деформации. Представлены три варианта модели:

1) модель сопротивления деформации (формула (1)) сплава системы Al-Mg заданного химического состава (изменение процентного содержания магния в сплаве не учитывается) для диапазона значений температуры от 20 до 300 °С (холодная и теплая (полугорячая) деформация) и от 400 до 450 °С (горячая деформация);

2) модель сопротивления деформации (формула (1)) сплава системы Al-Mg заданного химического состава (изменение процентного содержания магния в сплаве не учитывается) для диапазона значений температуры от 20 до 450 °С (любой режим деформации);

3) обобщенная модель сопротивления деформации сплавов системы Al-Mg для диапазона значений температуры от 20 до 450 °С (любой режим деформации), учитывающая процентное содержание магния в сплаве.

Значения коэффициента детерминации модели сопротивления деформации каждого из исследованных сплавов представлены в таблице 1 (диапазон значений температуры $T \in [20; 450]$ °С; без учета изменения процентного содержания магния в сплаве):

Таблица 1 – Значения коэффициента детерминации R^2

Сплавы	AMg2	AMg3	AMg5	AMg6
R^2	0,947	0,923	0,937	0,955

Обобщенная модель сопротивления деформации сплавов системы Al-Mg может быть записана в виде (см. выше – вариант модели №3):

$$\sigma_i = K \cdot m_1 \cdot e^{m_2 T} \cdot \varepsilon_i^{m_3} \cdot \dot{\varepsilon}_i^{m_4} \cdot e^{m_5/\varepsilon_i} \cdot (1 + \varepsilon_i)^{m_6 T} \cdot e^{m_7 \varepsilon_i} \cdot \dot{\varepsilon}_i^{m_8 T} \cdot T^{m_9}, \quad (3)$$

$$K = (a \cdot Mg^2 + b \cdot Mg + c) \cdot (d \cdot T + e), \quad (3a)$$

где $m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, m_6, m_7, m_8, m_9, a, b, c, d, e$ – коэффициенты; σ_i – интенсивность напряжения; $\dot{\varepsilon}_i$ – скорость деформации; ε_i – истинная (накопленная) деформация; T – температура; Mg – содержание магния (мас.%).

Найденные значения коэффициентов модели (3) обеспечивают значение коэффициента детерминации $R^2=0,93$.

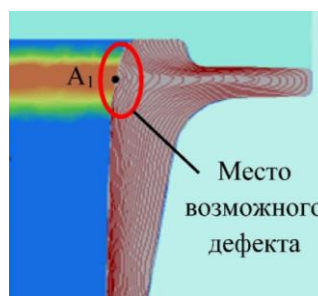
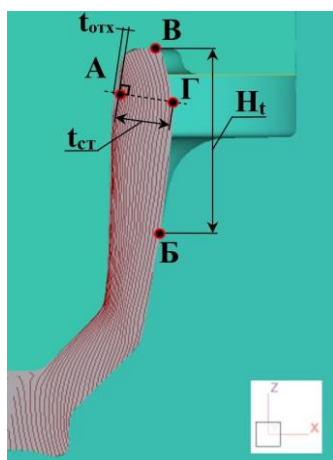
Четвертая глава «Анализ напряженно-деформированного состояния при горячей изотермической штамповке полых осесимметричных изделий с фланцем» посвящена анализу напряженно-деформированного состояния при горячей изотермической штамповке полых осесимметричных изделий с фланцем с применением физического и математического моделирования, выполненного в программе QForm. Для постановки вычислительного эксперимента использовались полученные данные о реологических свойствах сплава АМг6, соответствующие диапазону температур $T \in [20; 450] \text{ } ^\circ\text{C}$ и скоростей деформации $\dot{\varepsilon}_i \in [0,001; 0,4] \text{ c}^{-1}$.

На основе результатов пробного моделирования (рисунок 1б) составлен план экспериментального исследования, а, далее, разработана математическая (компьютерная) модель комбинированного выдавливания полого осесимметричного изделия с фланцем в изотермических условиях. Адекватность модели обеспечивается сравнением результатов натурального эксперимента и вычислительного эксперимента, а также результатов металлографии.

Процесс горячего изотермического комбинированного выдавливания выполняется за одну операцию; течение материала в штампе имеет сложный характер и его заполнение обеспечивается за счет прямого, обратного, радиального выдавливания деформируемого материала. При выполнении операции на этапе обратного выдавливания существует риск потери устойчивости в стенке заготовки в области фланца (рисунок 3, точка А и область «А₁») и, соответственно, формирования дефекта на внутренней поверхности детали (рисунок 3б).

На рисунке 3а отмечены четыре характерные точки. В точке А наблюдается максимальный отход ($t_{отх}$) металла от формообразующей

поверхности пуансона. Толщина стенки $t_{ст}$ измеряется между точкой А и Г по нормали к поверхности в месте максимального отхода. Точки Б и В определяют значение высота свободной стенки H_t .



б) поле Гартфилда в области «А₁»

а) искажение макроструктуры и размеры стенки, характеризующие потерю устойчивости изделия в области фланца

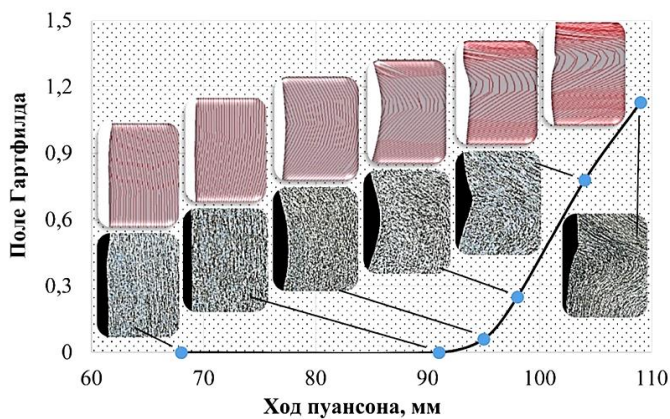
Рисунок 3 – Модель сечения исследуемого изделия в области возможного формирования дефекта (расчет в QForm)

Для диагностики и прогнозирования дефектов совместно применяется несколько инструментов программы QForm: 1) линии течения (рисунки 3а, б); 2) приповерхностные линии (на рисунке 3 не показаны); 3) поле Гартфилда (ПГ) (рисунок 3б). ПГ определяется в режиме пост-процессора по результатам расчета растягивающих деформаций в направлении нормали к поверхности деформируемой заготовки; чем выше значение поля, тем выше вероятность появления утяжины либо прострела. Уточнение диапазона значений поля Гартфилда было выполнено за счет проведения натурального эксперимента и сопоставления его результатов с результатами вычислительных экспериментов и металлографии.

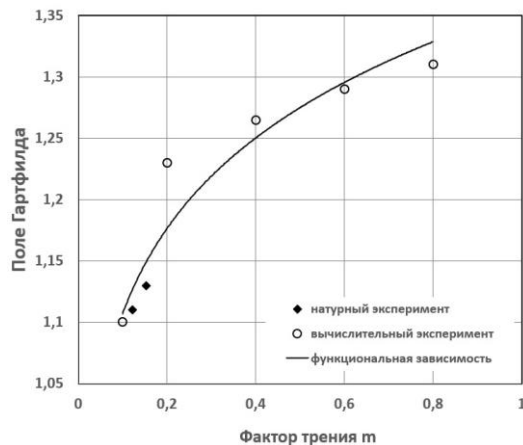
Разработанная компьютерная модель комбинированного выдавливания позволила выявить взаимосвязи между параметром, характеризующим потерю устойчивости заготовки при её комбинированном выдавливании в изотермических условиях, т.е. образование дефекта типа «утяжина» и/или «прострел» (поле Гартфилда), и параметрами, характеризующими: а) геометрию заготовки (H_0/D_0) (рисунок 4а), б) геометрию стенки выдавливаемой детали ($H_t/t_{ст}$) (рисунок 4б), в) условия контактного трения (m , фактор трения в модели трения А.Н.Леванова) (рисунок 4в); г) величину рабочего хода пуансона (рисунок 4г).

На основе выявленных взаимосвязей разработаны математические модели (функциональные зависимости), обеспечивающие управление устойчивостью заготовки при её комбинированном выдавливании на этапе

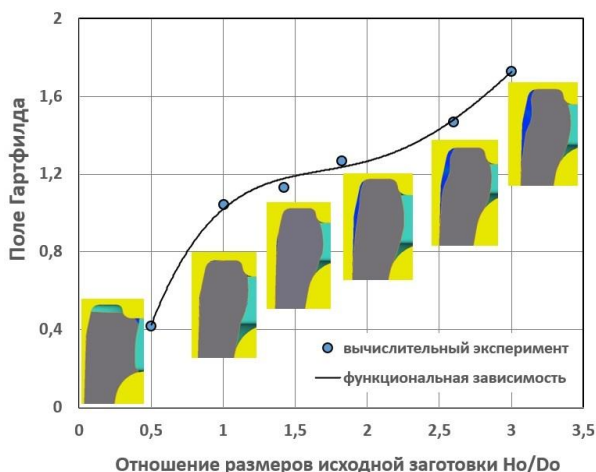
формирования фланца. При деформировании заготовки с $H_0/D_0 = 1,42$, начиная от значения рабочего хода пуансона 90 мм, материал заготовки постепенно отходит от его внутренней поверхности (рисунок 4а). Отход материала сопровождается увеличением значения поля Гартфилда. При значении хода пуансона равного 104 мм вектор скорости меняет свое направление и материал заготовки постепенно возвращается обратно к поверхности пуансона ($\Pi\Gamma = 1,0$).



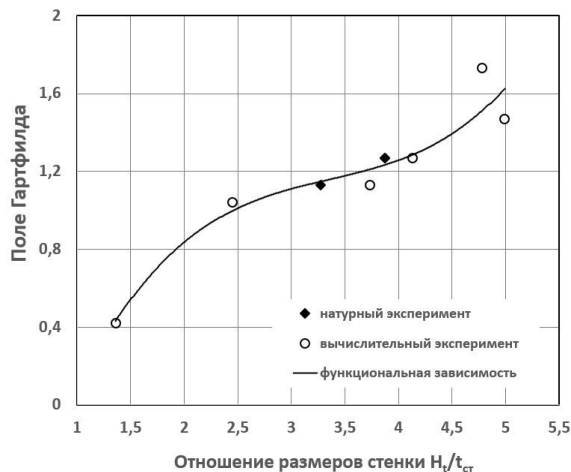
а) влияние технологического параметра ($H_0/D_0 = 1,42$)



в) влияние фактора трения



б) влияние размеров исходной заготовки (H_0/D_0)



г) влияние параметра H_t/t_{ct}

Рисунок 4 – Взаимосвязь параметров, влияющих на значение поле Гартфилда (образование дефекта типа «утяжина» или «прострел»)

При ходе пуансона 109 мм фланец полностью оформляется; наблюдается минимальный отход материала в области возможного дефектообразования. Величина отхода соответствует значению $\Pi\Gamma=1,13$ (рисунок 4а). Увеличение размеров H_0/D_0 (рисунок 4б) приводит к увеличению значения поля Гартфилда и повышению риска дефектообразования.

Увеличение параметра H_t/t_{ct} (рисунки 4г и 3а) приводит к образованию утяжины в области «А₁» (рисунок 3б). При увеличении фактора трения (рисунок 4в) увеличивается контактное трение на формообразующей

поверхности пуансона и фланцевой части матрицы и, как следствие, уменьшается скорость скольжения деформируемого материала вдоль этих поверхностей, что приводит к снижению скорости деформации в фланцевой части и увеличению значения показателя Гартфилда (до 1,3 и более).

Из графика, показанного на рисунке 4в, следует, что для получения штампованных изделий хорошего качества (без утяжины и/или прострела) необходимо использовать технологическую смазку, обеспечивающую фактор трения менее 0,2. Выполнение данного требования имеет практическое значение, т.к. предполагает подбор соответствующей технологической смазки либо разработку новой технологической смазки.

В пятой главе «Применение результатов для разработки технологии горячей изотермической штамповки полых осесимметричных изделий с фланцем» показаны возможные практические решения, полученные на основе результатов проведенных исследований:

1) прикладная программа для прогнозирования значения напряжения текучести и силы деформирования (рисунок 5) на этапе проектирования технологического процесса штамповки деталей за счет комбинированного выдавливания в условиях горячей изотермической деформации с учетом особенностей реологического поведения алюминиевого сплава в выбранных температурно-скоростных условиях деформирования и при изменении процентного содержания магния от 2 до 6;

2) схема технологического процесса комбинированного выдавливания (вытяжка – обратное – радиальное – прямое выдавливание) полого осесимметричного изделия с фланцем, диаметр которого в 1,5-2 раза больше диаметра его центральной части при отношении диаметра фланца к его толщине не более 85, в изотермических условиях из заготовки с соотношением $H_0/D_0 = 0,5$, обеспечивающая получение штамповки без дефектов типа «утяжина» и/или «прострел» и реализуемая на универсальном гидравлическом прессе за одну операцию. Поле Гартфилда принимает значение 0,42;

3) схема технологического процесса комбинированного выдавливания (прямое – обратное – радиальное – прямое выдавливание) полого осесимметричного изделия с фланцем в изотермических условиях из заготовки с соотношением $H_0/D_0 = 1,42$, обеспечивающая получение штамповки с минимальным отходом материала от пуансона без формирования дефекта либо с появлением дефекта, не превышающего половины припуска на линейный

размер; реализуемая на универсальном гидравлическом прессе за одну операцию. Поле Гартфилда принимает значение, не превышающее 1,13.

На основании полученных практических решений сформулированы рекомендации по проектированию процесса комбинированного выдавливания полого осесимметричного изделия с фланцем в изотермических условиях с применением данных о реологических свойствах сплавов системы Al-Mg, полученных в диссертации, а также научно-обоснованные режимы комбинированного выдавливания, позволяющие управлять устойчивостью заготовки при её комбинированном выдавливании. Выбор режима основан на алгоритме прогнозирования дефектообразования. Алгоритм учитывает полученные функциональные зависимости, визуализация которых показана на рисунке 4.

ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение **задачи**, имеющей существенное значение для теории и практики комбинированного выдавливания в условиях горячей изотермической деформации – повышение качества полых осесимметричных изделий с фланцем, связанное с снижением риска образования дефекта типа «утяжина» и/или «прострел» посредством совершенствования технологии штамповки за счет управления устойчивостью заготовок при их комбинированном выдавливании в изотермических условиях. В процессе теоретических и экспериментальных исследований получены **следующие основные результаты и сделаны выводы:**

1. Впервые установлены функциональные зависимости для описания сопротивления деформированию алюминиевых сплавов системы Al-Mg (AMg2, AMg3, AMg5, AMg6) от температурно-скоростных параметров и процентного содержания магния для области значений скорости деформации $0,001-0,4 \text{ с}^{-1}$, области значений температуры $20-450^\circ\text{C}$ и области значений процентного содержания магния от 2 до 6, полученные на основе проведения натурного и последующего вычислительного экспериментов с применением программ MATLAB и QForm, Натурные эксперименты выполнены на универсальных испытательных машинах. Зависимости представлены в виде изотермических кривых текучести и реологических уравнений с рассчитанными значениями коэффициентов. Установленные функциональные зависимости имеют высокую адекватность, оцениваемую значением коэффициента детерминации

$R^2 = (0,923 \div 0,955)$. Полученные зависимости могут быть рекомендованы для использования в структуре базы данных расчетных программ, применяемых при решении прикладных задач для компьютерного моделирования процессов ОМД.

2. Проведено экспериментальное исследование особенностей течения материала при формировании фланца, т.е. в зоне, в которой возможен отход материала от поверхности формообразующего инструмента и образование дефекта типа «утяжина» и/или «прострел». Получены макроструктуры образцов, соответствующие различным условиям комбинированного выдавливания, характер которых подтверждает особенности течения материала: отход материала от поверхности формообразующего инструмента, формирование дефектов типа «утяжина» и «прострел» в области фланца.

3. На основе обобщения результатов экспериментов впервые разработаны функциональные зависимости, описывающие взаимосвязь между параметром, характеризующим потерю устойчивости заготовки при её комбинированном выдавливании в изотермических условиях (полем Гартфилда) и параметрами, характеризующими геометрию заготовки, геометрию стенки выдавливаемого полуфабриката, а также условия контактного трения. Полученные зависимости могут быть использованы для выбора рациональных режимов деформирования алюминиевых сплавов системы Al-Mg при решении прикладных задач о течении материала при комбинированном выдавливании в изотермических условиях полых осесимметричных изделий с фланцем.

4. Установлены научно-обоснованные режимы комбинированного выдавливания в условиях горячей изотермической деформации осесимметричного изделия с фланцем, диаметр которого в 1,5-2 раза больше диаметра его центральной части, при этом отношение диаметра фланца к его толщине не более 85, позволяющие управлять устойчивостью заготовки, в том числе, при соотношении размеров исходной заготовки H_0/D_0 от 0,5 до 2,0. В случае $H_0/D_0 = 0,5$ и $H_0/D_0 = 1,42$ штамповка получается либо бездефектной, либо с минимальным отходом материала от пуансона, не влияющим на качество. Прогнозирование дефектообразования основано на алгоритме, учитывающим полученные функциональные зависимости для значения поля Гартфилда.

5. Предложены рекомендации для проектирования технологии горячей изотермической штамповки осесимметричных изделий с развитым фланцем из

алюминиевых сплавов, основанные на применении на этапе подготовки производства программного обеспечения, новизна которого подтверждена свидетельством о государственной регистрации.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ
Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. **В.Н. Фам** Моделирование программ монотонного нагружения с постоянной скоростью деформации на современной испытательной машине / П.А. Петров, **В.Н. Фам**, Б.Ю. Сапрыкин, У.Ш.Диксит // Технология легких сплавов. – 2021. – № 3. – С. 45-52. - DOI 10.24412/0321-4664-2021-3-45-52.

2. **В.Н. Фам**. Построение кривых текучести алюминиевых сплавов системы Al-Mg на основе натурального и вычислительного экспериментов / П.А.Петров, **В.Н. Фам**, Vu Чонг Бач [и др.] // Технология металлов. – 2022. – № 5. – С. 42-51. – DOI 10.31044/1684-2499-2022-0-5-42-51.

3. **В.Н. Фам**. Построение кривых текучести алюминиевого сплава АМг5 на основе натурального и вычислительного экспериментов / П.А. Петров, **В.Н. Фам**, И.А. Бурлаков [и др.] // Технология легких сплавов. – 2022. – № 2. – С. 65-74. – DOI 10.24412/0321-4664-2022-2-65-74.

4. **В.Н. Фам**. Напряжения текучести и изменение структуры при пластической деформации заготовок из порошкового алюминиевого сплава RS-356 / П.А. Петров, Ф.Т.Д. Во, **В.Н. Фам** [и др.] // Технология легких сплавов. – 2022. – № 4. – С. 7-15.

5. **В.Н. Фам**. Построение кривых текучести алюминиевого сплава RS356 на основе натурального и вычислительного эксперимента / П.А. Петров, И.А. Бурлаков, **В.Н. Фам** [и др.] // Технология легких сплавов. – 2023. – № 1. – С. 63-69.

Публикации в изданиях, индексируемых Scopus/Web of Science:

6. **V.N. Fam**. Plotting of Yield Curves for Al–Mg Aluminum Alloys Using Full-Scale and Computational Experiments / P.A. Petrov, **V.N. Fam**, T.B. Vu [et al.]// Russian Metallurgy (Metally) - Vol. 2022, No. 13. - P. 1781-1788.

7. **V.N. Fam**. Improvement of the Reliability and Efficiency of Measurements of the Deformation Parameters of Aluminum Alloys Using a Universal Testing Machine / P.A. Petrov, **V.N. Fam**, I.A. Burlakov [et al.] // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2022. – Vol. 51. – No 3. – P. 277-285. – DOI 10.3103/S105261882202011X.

8. **V.N. Fam**. Study of the Temperature and Strain Rate Effects on the Structure of Materials in Metal Formation of Nonferrous Hybrid Blanks / P.A. Petrov, I.A. Burlakov, **V.N. Fam** [et al.] // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2022. – Vol. 51. – No 6. – P. 582-589.

Публикации в изданиях, индексируемых РИНЦ:

9. **В.Н. Фам.** Выбор математической функции для описания сопротивления деформации алюминиевых сплавов системы Al-Mg / П.А. Петров, **В.Н. Фам** // Автоматизированное проектирование в машиностроении. – 2022. – № 12. – С. 25-28. – DOI 10.26160/2309-8864-2022-12-25-28.

10. **В.Н. Фам.** Повышение надежности и эффективности измерений параметров деформации алюминиевых сплавов на универсальной испытательной машине / П.А. Петров, **В.Н. Фам**, И.А. Бурлаков [и др.] // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2022. – № 3. – С. 102-112. – DOI 10.31857/S0235711922020110.

11. **В.Н. Фам.** Исследование влияния температурно-скоростных режимов деформации на структуру материалов в процессе формообразования гибридных заготовок из цветных сплавов / П.А. Петров, И.А. Бурлаков, **В.Н. Фам** [и др.] // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2022. – № 6. – С. 104-112. – DOI 10.31857/S0235711922050121.

12. **В.Н. Фам** Формообразование гибридных заготовок из алюминиевых сплавов осадкой с кручением / П.А. Петров, **В.Н. Фам**, И.А. Бурлаков, Х.Т. Нгуен // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2023. – № 3. – С. 105-111.

Статьи в сборниках материалов научных конференций:

13. **В.Н. Фам.** Анализ течения материала на границе разрыва скоростей при выдавливании полых осесимметричных изделий с фланцем. / П.А. Петров, **В.Н. Фам**, И.А. Бурлаков // Третья международная научно-техническая конференция. «Павловские чтения». Сборник материалов. – М: ИМЕТ РАН, 2021, С. 78-79.

14. **В.Н. Фам.** Построение кривых текучести сплава АМгб с применением метода постановки обратной задачи / П.А. Петров, **В.Н. Фам** // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2021. - №4(75). – С. 104-109.

15. **В.Н. Фам.** Исследование сопротивления деформации алюминиевого сплава RS-356 (ALSI7MG) после селективного лазерного сплавления / П.А. Петров, **В.Н. Фам** // Всероссийская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Современные технологии обработки металлов и средства их автоматизации» (12 октября 2021 г.): сборник тезисов. Тула: Изд-во ТулГУ, 2021. С.39-40.

16. **В.Н. Фам.** Моделирование технологического процесса изотермической штамповки полых изделий с фланцем / **В.Н. Фам**, П.А. Петров // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: Материалы Международной научно-технической конференции молодых ученых, Могилёв, 28–29 октября 2021 года / Редколлегия: М.Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – 2021. – С. 63.

17. **В.Н. Фам.** Моделирование горячей изотермической штамповки полых осесимметричных изделий с фланцем / **В.Н. Фам**, П.А. Петров // XXXIII Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения (МИКМУС - 2021): Труды конференции, Москва, 30 ноября – 02 2021 года. – Москва: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, 2021. – С. 82-88.

18. **В.Н. Фам.** Кривые текучести сплава АМгЗ для имитационного моделирования горячей изотермической штамповки. / **В.Н. Фам**, П.А. Петров // Научно-техническая конференция «Современные тенденции развития инструментальных систем и металлообрабатывающих комплексов». сборник трудов / под редакцией В.А.Лебедева; Донской государственный технический университет. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2022. – С. 398.

19. **В.Н. Фам.** Прогнозирование значения силы деформирования на этапе разработки технологического процесса штамповки / **В.Н. Фам**, П.А. Петров // Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов: Сборник докладов II Международной научно-практической конференции, Томск, 26–28 апреля 2022 года. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2022. – С. 587-591.

Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ:

20. **В.Н. Фам** Программа для построения "изотермической" кривой текучести и расчета коэффициентов математической модели сопротивления деформации. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021664070 от 14.09.2021 Петров П.А., **В.Н. Фам.**

21. **В.Н. Фам** Программа для прогнозирования напряжения текучести алюминиевых сплавов системы Al-Mg. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022615932 от 15.04.2022 Петров П.А., **В.Н. Фам.**