

На правах рукописи

ВОРОНКОВ ВИКТОР ИВАНОВИЧ

**ВЫБОР ГЕОМЕТРИИ ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ
ШТАМПОВКИ ПОКОВОК С ОТРОСТКАМИ И РЁБРАМИ В ЗАКРЫТЫХ
ШТАМПАХ**

Специальность 05.02.09 – **Технологии и машины обработки давлением**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)"

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Калпин Юлий Григорьевич

Официальные оппоненты: **Сосенушкин Евгений Николаевич**
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ
ВПО МГТУ «СТАНКИН» (г. Москва), профес-
сор кафедры «Системы пластического дефор-
мирования»

Митин Олег Николаевич
кандидат технических наук,
ОАО «Научно-производственное объединение
«СПЛАВ» (г. Тула), начальник отдела

Ведущее предприятие: ФГБОУ ВПО «Московский государственный
индустриальный университет» (г. Москва)

Защита диссертации состоится «__» _____ 2014 г. в __ ч. на заседании дис-
сертационного совета Д 212.271.01 при ФГБОУ ВПО «Тульский государственный
университет» (300012, г. Тула, ГСП, просп. Ленина, д. 92, 9-101).

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью,
просим направлять по вышеуказанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Тульский
государственный университет».

Автореферат разослан «__» _____ 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Черняев Алексей Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Изотермическая штамповка позволяет получать детали сложной конфигурации – поковки с отроостками, рёбрами и другими элементами, геометрия которых не позволяет применять для изготовления обычные методы горячей объёмной штамповки. За счёт нагрева инструмента до температуры горячей штамповки материал не остывает при заполнении тонких полостей штампа, что позволяет подобрать оптимальные режимы штамповки как по скорости деформирования, так и по нагреву материала. При разработке технологии изотермической штамповки деталей в закрытых штампах необходимо учитывать возможные проблемы, связанные со сложным характером течения материала при заполнении тонких полостей штампа и отроостков. Ошибки при проектировании чертежа поковки могут стать причиной образования прострелов, зажимов и заниженного КИМ. Технология изотермической штамповки пока ещё не получила такого же широкого распространения, как обычные методы горячей объёмной штамповки, и, как следствие, опыт разработки технологического процесса, в частности рекомендации по оптимальному проектированию поковки, ещё не накоплен. Так, например, в РТМ 1.4.1644-2001 нет чётких указаний по выбору радиуса закругления между полотно детали и рёбрами, телом поковки и отроостками. Указания носят лишь приблизительный, рекомендательный характер и приводятся без чётких научных обоснований. Назначение завышенных радиусов закругления приводит к перерасходу материала, а выбор слишком маленького радиуса, при котором будет нарушаться контакт материала с инструментом, может повлечь образование дефектов, например зажимов. Уменьшение радиусов закругления на поковке особенно актуально для деталей с большим количеством рёбер или отроостков, например крыльчаток. В связи с изложенным, теоретическое обоснование выбора радиусов закругления на поковке с учётом геометрических и температурных параметров изотермической штамповки заготовок с отроостками и рёбрами является **актуальной задачей**.

Цель работы.

Повышение эффективности операций изотермической штамповки повок с отроостками и рёбрами из алюминиевых сплавов путём теоретического обоснования выбора радиусов закруглений в штамповом инструменте.

Задачи исследования.

1. Теоретически исследовать эффект нарушения контакта материала с инструментом при прямом и обратном выдавливании по схемам плоского и осесимметричного течения.

2. Установить влияние технологических параметров изотермической штамповки на величину зазора в месте нарушения контакта материала с инструментом при прямом и обратном выдавливании.

3. Определить в явном виде математическую модель сопротивления деформации при постоянной и резко изменяющейся скорости деформации.

4. Экспериментально проверить теоретические расчёты течения металла при прямом и обратном выдавливании.

5. Использовать результаты исследований в промышленности и в учебном процессе.

Объект исследования.

Процесс деформирования алюминиевых сплавов методом изотермической штамповки.

Предмет исследования.

Эффект нарушения контакта материала с инструментом и форма свободной границы деформируемого материала (в месте нарушения контакта) при изотермической штамповке по схемам плоского и осесимметричного деформирования при прямом и обратном выдавливании. Сопротивление деформации при изотермической штамповке.

Методы исследования.

Экспериментальные исследования по сопротивлению деформации выполнены на универсальной испытательной машине INSTRON VHS400kN (VHS8800 family)¹. Экспериментальные исследования по течению материала при прямом и обратном выдавливании выполнены на гидравлическом прессе силой 2500 кН².

Теоретический расчёт отхода материала от стенки штампа выполнен методом баланса мощности. Программный код для расчёта теоретической задачи написан в программе MatLab³. Моделирование отхода материала от стенки штампа при прямом и обратном выдавливании выполнено в программе Qform 7.1⁴ Корректировка кривых текучести, полученных при проведении испытаний, выполнена методом постановки обратной задачи в программе Qform 5.1⁴. Разработка технологии штамповки детали «Колесо рабочее» выполнено с применением программ Qform 5.1 и Qform 7.1.

Автор защищает:

- общие закономерности изменения величины зазора в месте нарушения контакта материала с инструментом при прямом и обратном выдавливании по схемам плоского и осесимметричного деформирования;

- модель сопротивления деформации сплава АВ при постоянной и резко изменяющейся скорости деформации;

- рекомендации, представленные в виде диаграмм, для определения минимально допустимого радиуса закругления в штампе для различных геометрических отношений инструмента при прямом и обратном выдавливании по схемам плоского и осесимметричного деформирования для сплавов АВ, АД35, АД31, АW6082 и АМг6.

Научная новизна.

Установлены закономерности изменения величины зазора в месте нарушения контакта материала с инструментом в зависимости от геометрических параметров, механических свойств деформируемого материала и температуры штамповки

¹ Оборудование установлено в Институте обработки металлов давлением (г. Ганновер, Германия)

² Оборудование установлено в Университете машиностроения (г. Москва)

³ Программное обеспечение установлено в Институте обработки металлов давлением (г. Ганновер, Германия) и Университете машиностроения (г. Москва)

⁴ Программное обеспечение установлено на кафедре «Машины и технологии обработки металлов давлением» Университета машиностроения (г. Москва)

при прямом и обратном выдавливании поковок с отростками и рёбрами в условиях плоской и осесимметричной схемы деформации на основе определения формы границы свободного течения металла.

Практическая значимость.

Диаграммы для определения минимально допустимого радиуса закругления на поковке из сплавов АВ, АД31, АД35, АW6082 и АМг6 могут быть использованы на производстве при проектировании инструмента. Полученная математическая модель сопротивления деформации сплава АВ может быть использована при расчётах технологических процессов в коммерческих специализированных программах, а также при расчётах любым из известных математических методов теории ОМД. Разработанная, с использованием диаграмм для определения минимально допустимого радиуса закругления в штампе, технология изотермической штамповки заготовки детали «Колесо рабочее» позволила повысить КИМ в 2,5 раза и, соответственно, снизить трудоёмкость последующей механической обработки.

Реализация работы.

Разработанная технология изотермической штамповки детали «Колесо рабочее» была востребована на ФГУП «НПЦ газотурбостроения «САЛЮТ», г. Москва. Благодаря переходу предприятия к изготовлению детали «Колесо рабочее» методом изотермической штамповки взамен технологического процесса изготовления детали ковкой существенно повышается коэффициент использования материала и сокращается время на изготовление детали.

Отдельные результаты исследований использованы в учебном процессе при подготовке магистров по направлению 150700 «Машиностроение», и включены в лекционный и практический курс дисциплин «Математические методы решения задач объёмной штамповки» и «Компьютерные технологии в машиностроении», а также использованы в научно-исследовательской работе студентов, при выполнении курсовых и дипломных проектов на кафедре «Машины и технологии обработки металлов давлением им. И.А. Норицына» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)».

Связь темы диссертации с общегосударственными задачами.

В диссертации использованы материалы полученные в рамках выполнения государственных контрактов ГК 14.740.11.0584 «Исследование сопротивления сплавов системы Al-Mg-Si деформации в течение переходных процессов, инициированных пластической деформацией, при повышенных температурах» от 05 октября 2010 г и ГК 14.В37.21.0874 «Развитие методов оценки сопротивления деформации сплавов на основе алюминия и магния при мгновенном изменении скорости деформации» от 10 сентября 2012 г.

Апробация работы.

Результаты исследований доложены на следующих конференциях:

- XX Conference «Computer methods in materials technology (KomPlasTech)», Zakopane, Poland 2013;

- the 16th international ESAFORM conference on material forming ESAFORM-2013, Aveiro, Portugal, 2013;

- 77-ая международная научно-техническая конференция ААИ «Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров», г. Москва, 2012;

- the 14th international ESAFORM conference on material forming ESAFORM-2011, Belfast, Great Britain, 2011;

- международная научно-техническая конференция ААИ «Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров», посвященная 145-летию МГТУ «МАМИ», Москва, 2010.

Публикации.

Основное содержание работы изложено в 20 печатных работах, из них 10 публикаций в ведущих рецензируемых изданиях, включенных в список ВАК.

Структура и объём работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных результатов и выводов, списка использованной литературы из 59 наименований, содержит 189 страниц машинописного текста, 122 рисунка, 10 таблиц и 4 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении кратко обоснована актуальность темы диссертационной работы, приведены научная новизна и практическая ценность, обоснована достоверность полученных результатов, дано краткое содержание диссертации.

В первой главе приведена классификация деталей из алюминиевых сплавов, получаемых изотермической штамповкой, согласно РТМ 1.4.1644-2001, из которой видно, что более половины деталей имеют оребрение и отrostки. При штамповке таких деталей в очаге деформации металл из сечения с существенно большей площадью перетекает в углублённую полость с сечением малой площади, и на характер течения металла существенное влияние оказывает радиус закругления на переходе. Для рассматриваемого класса деталей определение оптимального радиуса закругления на переходе от полотна детали к рёбрам и отrostкам позволит с одной стороны повысить коэффициент использования материала, а с другой избежать возникновения дефектов.

Обзор литературных источников выполнен по двум основным направлениям: заполнение металлом полостей штампа, в которых формируются отrostки, и сопротивление деформации при перетекании металла в полости штампа. Наибольшее внимание уделялось статьям, где исследовался эффект нарушения контакта материала с инструментом при заполнении вертикальных и горизонтальных полостей.

А.В. Ребельский, О.В. Протопопов, А.В. Кузнецов, И.С. Поляков, Ю.И. Рыбаков, В.Л. Бережной, С.Т. Басюк исследовали заполнение гравюры штампа при штамповке деталей с горизонтальными отrostками и при угловом выдавливании.

Б.А. Баев, И.В. Костарев, А.П. Петров, М.В. Жаров, А.Н. Паршиков, Р.А. Вайсбурд, А.С. Партин, А.Н. Пасько, А.А. Перепелкин исследовали особенности течения материала при штамповке деталей с оребрением.

Изучению влияния резкого изменения скорости деформации на величину сопротивления деформации посвящено много работ. К наиболее значимым исследованиям можно отнести работы, выполненные Н.Н.Малининым, Р.А.Васиным, Ю.М. Вайнблатом, Ф.Ю. Еникеевым, М. Pietrzyk, J. Ordon, С.М. Sellars, Z. Gronostajski, М. Abbod, Y. Estrin, E.W. Hart, R. Onodera, A. Ray.

Влияние истории нагружения материала на величину сопротивления деформации исследовали М.А. Большанина, А.И. Целиков, В.А. Персиянцев, Ю.Г. Калпин, Т.С. Басюк, П.А. Петров и др.

Как показал обзор литературных источников исследования эффекта нарушения контакта материала с инструментом проводились в основном для схемы радиального течения. Форма свободной границы течения материала при выдавливании и влияние радиуса закругления в инструменте на нарушение контакта материала с инструментом не исследовались. В справочной литературе нет чётких указаний по выбору радиуса закругления в инструменте для изотермической штамповки.

На основе проведённого обзора установлено, что при перетекании металла в полости штампа, соответствующие отрезкам и рёбрам, резко изменяется скорость деформации. В свою очередь резкое изменение скорости деформации оказывает влияние на величину напряжения текучести, характер изменения которого представляет собой сигмоид. При больших скоростях деформации вязкая составляющая реологических моделей перестаёт оказывать влияние, и напряжение текучести от скорости деформации уже не зависит.

В заключительном разделе первой главы на основании проведённого литературного обзора, сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе описываются эксперименты для определения кривых текучести материала АВ при постоянной и переменной скорости деформации, обработка экспериментальных данных, корректировка рассчитанных кривых текучести и определение математической модели сопротивления деформации сплава АВ, что необходимо для выполнения теоретических исследований эффекта нарушения контакта материала с инструментом.

Механические испытания образцов из алюминиевого сплава АВ проводили методом сжатия в изотермических условиях без нанесения смазки. Образцы осаживали в специальном контейнере, нагретом до температуры испытаний. Траверса испытательной машины перемещалась по закону, обеспечивающему постоянную скорость деформации. Испытания проводились при температурах 340 °С, 430 °С, 470 °С при постоянных скоростях деформации $0,1 \text{ с}^{-1}$, 1 с^{-1} и 10 с^{-1} . По результатам испытаний были получены диаграммы силы, по которым далее рассчитывали кривые текучести. Полученные кривые текучести корректировали экспериментальным методом (предложенным Ю.Г. Калпиным) и методом постановки обратной задачи.

Для проверки точности полученных кривых текучести сплава АВ воспроизводили механические испытания путём моделирования в программе Qform 5.1. Сопротивление деформации материала образца при моделировании задавали полученными кривыми текучести. Точность полученных кривых текучести оценивали сравнением расчётных и экспериментальных диаграмм силы. Полученные

кривые обеспечивают расчётные значения силы, не выходящие за доверительный интервал, составляющий $\pm 2,5\%$ от экспериментальных диаграмм силы. Таким образом, были получены данные о сопротивлении деформации сплава АВ, обеспечивающие высокую точность расчётов при постоянной скорости деформации.

По найденным кривым текучести была определена модель сопротивления деформации для постоянной или плавно изменяющейся скорости деформации, представляющая собой модель Хензеля-Шпиттеля с девятью неизвестными коэффициентами (выражение 1). Коэффициенты модели представлены в таблице 1.

$$\sigma_i = a_1 \exp(a_2 T) T^{a_3} \varepsilon_i^{a_4} \exp(a_5 / \varepsilon_i) (1 + \varepsilon_i)^{a_6 T} \exp(a_7 \varepsilon_i) \dot{\varepsilon}_i^{a_8} \dot{\varepsilon}_i^{a_9 T}, \quad (1)$$

где $a_1, a_2 \dots a_9$ – коэффициенты модели, T – температура, ε_i – накопленная деформация, $\dot{\varepsilon}_i$ – скорость деформации.

Таблица 1. Коэффициенты модели Хензеля-Шпиттеля

a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
215,621	$-4,937 \cdot 10^{-3}$	$-6,6 \cdot 10^{-12}$	$-7,263 \cdot 10^{-2}$	$-1,236 \cdot 10^{-2}$
a_6	a_7	a_8	a_9	
$7,236 \cdot 10^{-4}$	$1,984 \cdot 10^{-2}$	$-6,193 \cdot 10^{-2}$	$4,44 \cdot 10^{-4}$	

Были также проведены эксперименты при резко изменяющейся скорости деформации. Испытания проводили методом сжатия в изотермических условиях без нанесения смазки при температуре 430 °С по двум программам нагружения, обеспечивающим резкое повышение и резкое понижение скорости деформации: $1 \rightarrow 10 \text{ с}^{-1}$ и $10 \rightarrow 1 \text{ с}^{-1}$. При воспроизведении испытаний в программе Qform 5.1 (данные о сопротивлении материала образца пластической деформации задавали полученными кривыми текучести) было выявлено расхождение в экспериментальных и расчётных диаграммах силы на переходном участке в момент резкого изменения скорости деформации. Для получения точных данных о сопротивлении пластической деформации сплава АВ при резком изменении скорости деформации была определена в явном виде математическая модель (коэффициенты модели представлены в таблице 2), представляющая собой сигмоидальную функцию Больцмана (выражение 2).

$$\sigma_i = \frac{a_1 - a_2}{1 + \exp\left(\frac{\varepsilon_i - a_3}{a_4}\right)} + a_2, \quad (2)$$

где a_1, a_2, a_3, a_4 – коэффициенты модели, ε_i – накопленная деформация

Таблица 2. Коэффициенты модели Больцмана

Программа нагружения	a_1	a_2	a_3	a_4
$1 \rightarrow 10 \text{ с}^{-1}$	29.9081	42.9746	0.0648	0.0173
$10 \rightarrow 1 \text{ с}^{-1}$	41.1189	30.7103	0.039	0.0081

Таким образом, при моделировании процессов с переменной скоростью деформации напряжение текучести нужно задавать как кусочно-заданную функцию:

при резком изменении скорости деформации напряжение необходимо определять по сигмоиду Больцмана, при плавно изменяющейся скорости деформации – по модели Хензеля-Шпиттеля.

В третьей главе проведено теоретическое исследование определения минимально допустимого радиуса закругления в штампе (при котором не возникает нарушение контакта материала с инструментом) при прямом и обратном выдавливании по схемам плоского и осесимметричного течения материала. Выбор данных схем деформирования объясняется тем, что при заполнении металлом вытянутой полости штампа, соответствующей рёбрам или лопаткам, металл деформируется по схеме плоского течения, при заполнении цилиндрических отростков – очаг деформации осесимметричный.

Для определения радиуса закругления на переходе в штампе будем считать, что минимально допустимый радиус будет соответствовать форме свободной границы течения материала в месте нарушения контакта (а точнее, величине горизонтального размера, соответствующей зазору между инструментом и материалом), образующейся при перетекании металла в полость без радиуса закругления. Решить данную задачу методом конечных элементов с применением специализированного коммерческого программного обеспечения достаточно проблематично, т.к. в месте перетекания материала через острую кромку или кромку с очень малым радиусом закругления узлы сетки конечных элементов выходят за границы поверхности инструмента, что вызывает вырождение элементов и делает решение некорректным. Для решения задачи использовали метод баланса мощности. Рассматриваемые схемы деформирования и кинематически допустимое поле скоростей показаны на рисунке 1. Очаг деформации разделяется на области, внутри которых поле скоростей непрерывно. На границах между областями допустимы разрывы скоростей, при этом сохраняется непрерывность компонент вектора скорости нормальных к линии (поверхности) разрыва. Компоненты вектора скорости перемещения являются функциями координат. Выполняются граничные условия, условие несжимаемости и условие постоянства потока.

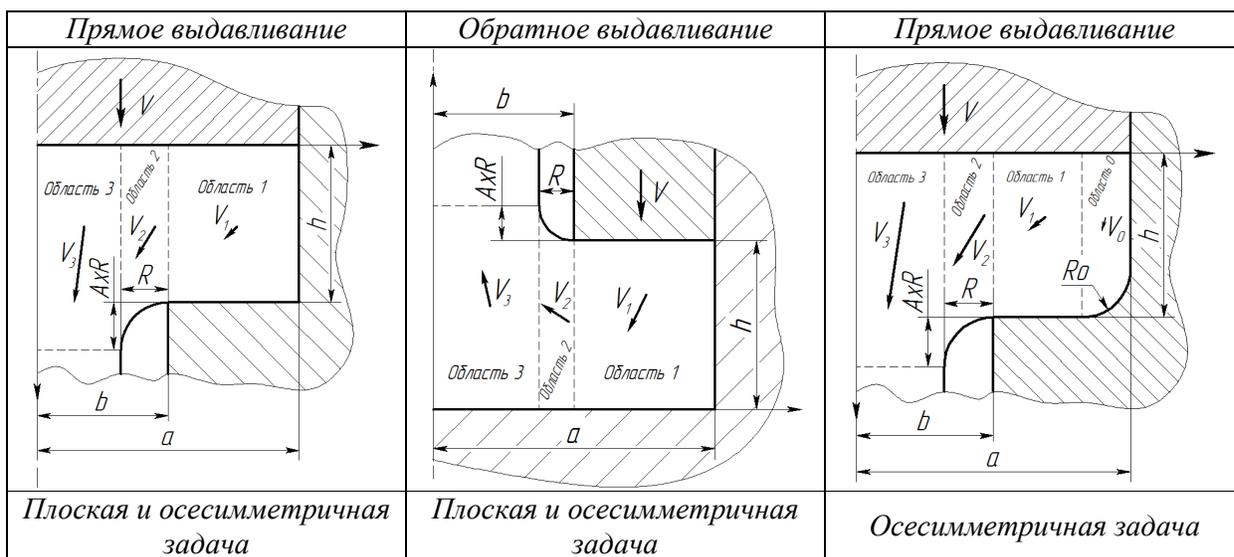


Рис. 1. Расчётные схемы

Металл при свободном течении будет деформироваться при минимуме мощности, а значит, минимизируя функцию мощности пластической деформации по величине R , можно найти теоретическую величину зазора между материалом и инструментом в месте нарушения контакта. Выражение для определения полной мощности пластической деформации имеет вид:

$$N = N_{вс} + N_{разр} + N_{мп}, \quad (3)$$

где $N_{вс}$ – мощность внутренних сил пластической деформации в каждой области; $N_{разр}$ – мощность развиваемая максимальными касательными напряжениями на каждой линии (поверхности) разрыва скоростей; $N_{мп}$ – мощность сил контактного трения.

По выражению 4 можно определить полную мощность пластической деформации для плоской задачи прямого и обратного выдавливания. По выражению 5 можно определить полную мощность пластической деформации для осесимметричной задачи прямого и обратного выдавливания. По выражению 6 определяли полную мощность пластической деформации для схемы осесимметричного прямого выдавливания с радиусом R_0 у дна матрицы.

$$N_{плоск} = 2 \left(\int_0^h dz \int_b^a \dot{\epsilon}_{i1} \sigma_{i1} dx + \int_{b-R}^b dx \int_0^{f(x)} \dot{\epsilon}_{i2} \sigma_{i2} dz + \int_0^{h+R} dz \int_0^{b-R} \dot{\epsilon}_{i3} \sigma_{i3} dx + \int_0^h |V_{z1} - V_{z2}| \frac{\sigma_{i12}}{\sqrt{3}} dz + \right. \\ \left. + \int_0^{h+AR} |V_{z2} - V_{z3}| \frac{\sigma_{i23}}{\sqrt{3}} dz + \frac{m}{\sqrt{3}} \left(2 \int_b^a |V_{x1}| \sigma_{i1} dx + \int_0^h |V_{z1}| \sigma_{i1} dz + \int_{b-R}^b |V_{x2}| \sigma_{i2} dx + \int_0^{b-R} |V_{x3}| \sigma_{i3} dx \right) \right), \quad (4)$$

$$N_{осесимм} = 2\pi \int_0^h dz \int_b^a \dot{\epsilon}_{i1} \sigma_{i1} \rho d\rho + 2\pi \sigma_{i2} \int_{b-R}^b d\rho \int_0^{f(\rho)} \dot{\epsilon}_{i2} \rho dz + 2\pi \sigma_{i3} \int_0^{h+AR} dz \int_0^{b-R} \dot{\epsilon}_{i3} \rho d\rho + \\ + 2\pi b \int_0^h |V_{z1} - V_{z2}| \frac{\sigma_{i12}}{\sqrt{3}} dz + 2\pi(b-R) \int_0^{h+AR} |V_{z2} - V_{z3}| \frac{\sigma_{i23}}{\sqrt{3}} dz + \\ + \frac{2\pi m}{\sqrt{3}} \left(2 \int_b^a |V_{\rho1}| \sigma_{i1} \rho d\rho + a \int_0^h |V_{z1}| \sigma_{i1} dz + \int_{b-R}^b |V_{\rho2}| \sigma_{i2} \rho d\rho + \int_0^{b-R} |V_{\rho3}| \sigma_{i3} \rho d\rho \right) \quad (5)$$

$$N_{R_0} = 2\pi \sigma_{i0} \int_{a-R_0}^a d\rho \int_0^{f_0(\rho)} \dot{\epsilon}_{i0} \rho dz + 2\pi \int_0^h dz \int_b^a \dot{\epsilon}_{i1} \sigma_{i1} \rho d\rho + 2\pi \sigma_{i2} \int_{b-R}^b d\rho \int_0^{f(\rho)} \dot{\epsilon}_{i2} \rho dz + 2\pi \sigma_{i3} \int_0^{h+AR} dz \int_0^{b-R} \dot{\epsilon}_{i3} \rho d\rho + \\ + 2\pi(a-R_0) \int_0^h |V_{z0} - V_{z1}| \frac{\sigma_{i01}}{\sqrt{3}} dz + 2\pi b \int_0^h |V_{z1} - V_{z2}| \frac{\sigma_{i12}}{\sqrt{3}} dz + 2\pi(b-R) \int_0^{h+AR} |V_{z2} - V_{z3}| \frac{\sigma_{i23}}{\sqrt{3}} dz + \\ + \frac{2\pi m}{\sqrt{3}} \left(a \int_0^{h-R_0} |V_{z0}| \sigma_{i0} dz + \int_{a-R_0}^a |V_{\rho0}| \sigma_{i0} \rho d\rho + \int_{h-R_0}^h \sqrt{V_{z0}^2 + V_{\rho0}^2} f_{0z} \sqrt{1 + (f'_{0z})^2} dz + \right. \\ \left. + 2 \int_b^{a-R_0} |V_{\rho1}| \sigma_{i1} \rho d\rho + \int_{b-R}^b |V_{\rho2}| \sigma_{i2} \rho d\rho + \int_0^{b-R} |V_{\rho3}| \sigma_{i3} \rho d\rho \right), \quad (6)$$

Для расчёта величины σ_i использовали модель сопротивления деформации полученную во второй главе, а также модели определённые при выполнении государственных контрактов ГК 14.740.11.0584 и ГК 14.В37.21.0874.

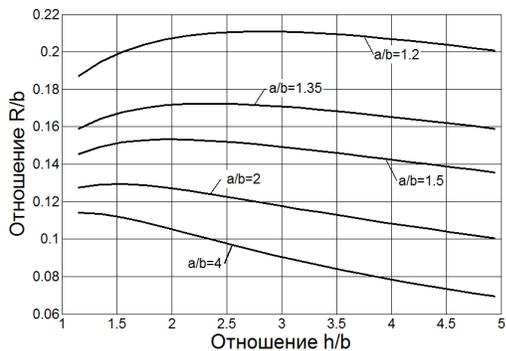


Рис. 2 Диаграмма для определения минимально допустимого радиуса закругления в штампе

По результатам теоретических расчётов были построены диаграммы для определения минимально допустимого радиуса закругления в штампе при прямом и обратном выдавливании по схемам плоского и осесимметричного течения металла. Диаграммы построены для алюминиевых сплавов и АВ, АД35, АД31, АW6082 и АМг6; температур 350 °С, 400 °С, 450 °С и 470 °С; отношения a/b равного 1,2; 1,35; 1,5; 2 и 4; отношения h/b , лежащего в диапазоне от 1 до 5. Для задачи прямого осесимметричного выдавливания с радиусом закругления R_0 у дна матрицы получены диаграммы для сплавов АД35 и АВ; температур 400 °С и 450 °С; отношения a/b равного 1,4; 1,6; 2; 2,5 и 3; отношения $(a-b)/R_0$, равного 2, 5 и 10; отношения h/b , лежащего в диапазоне от 1 до 5. Общий вид диаграммы показан на рисунке 2. Зная геометрические отношения h/b и a/b для конкретного штампа, можно определить отношение R/b , по которому, в свою очередь, зная величину b , можно определить наименьший радиус при котором не возникает нарушение контакта материала с инструментом, т.е. определить минимально допустимый радиус в матрице.

По результатам расчётов были определены следующие закономерности.

1. На величину зазора в месте нарушения контакта материала с инструментом влияет интенсивность упрочнения материала. Чем более интенсивно упрочняется материал в очаге деформации, тем зазор меньше.

2. Чем выше температура, тем больше зазор в месте нарушения контакта материала с инструментом. Однако влияние температуры на величину зазора зависит также и от материала. Чем больше количественное изменение напряжения текучести с изменением температуры у конкретного сплава, тем сильнее для него выражено влияние температуры на величину зазора.

3. При прямом выдавливании с увеличением диаметра (или ширины) контейнера матрицы зазор между материалом и инструментом увеличивается, при обратном выдавливании зависимость противоположная.

4. Почти для всех геометрических отношений инструмента с увеличением высоты контейнера матрицы зазор в месте нарушения контакта уменьшается.

5. Также на величину зазора при прямом выдавливании существенное влияние оказывает радиус закругления между дном и вертикальной стенкой матрицы. Чем больше данный радиус, тем больше зазор в месте нарушения контакта.

Было проведено моделирование, в программе Qform 7.1, возникновения зазора в месте нарушения контакта материала с инструментом при прямом и обратном выдавливании. Дается обоснование трудности применения МКЭ для решения рассматриваемых задач. Однако моделирование позволило подтвердить общие закономерности изменения величины зазора в месте нарушения контакта.

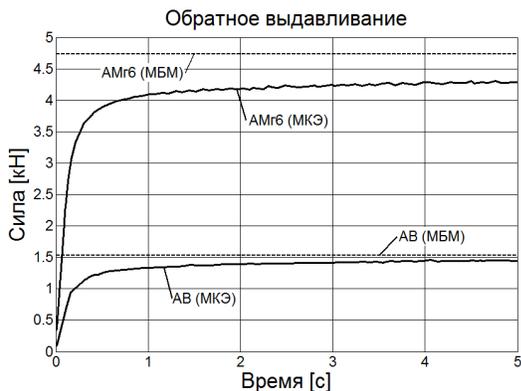


Рис. 3 Сравнение значений силы рассчитанных МБМ и МКЭ

верхней оценки завышения значения силы, можно сделать вывод о корректности определённого поля скоростей.

В четвёртой главе была проведена экспериментальная проверка теоретических расчётов образования зазора в месте нарушения контакта материала с инструментом и формы свободной границы деформируемого материала (в месте нарушения контакта). Выдавливание проводили по схемам прямого и обратного осесимметричного течения материала. Образцы из сплава АД35 выдавливали в специальной оснастке без радиуса закругления на переходе, в изотермических условиях при температуре 450 °С. Замер образовавшейся формы свободной границы выполняли в горизонтальном и вертикальном направлениях (рисунок 4). Горизонтальный размер соответствует величине R (рисунок 1) на схемах (величина зазора в месте нарушения контакта).

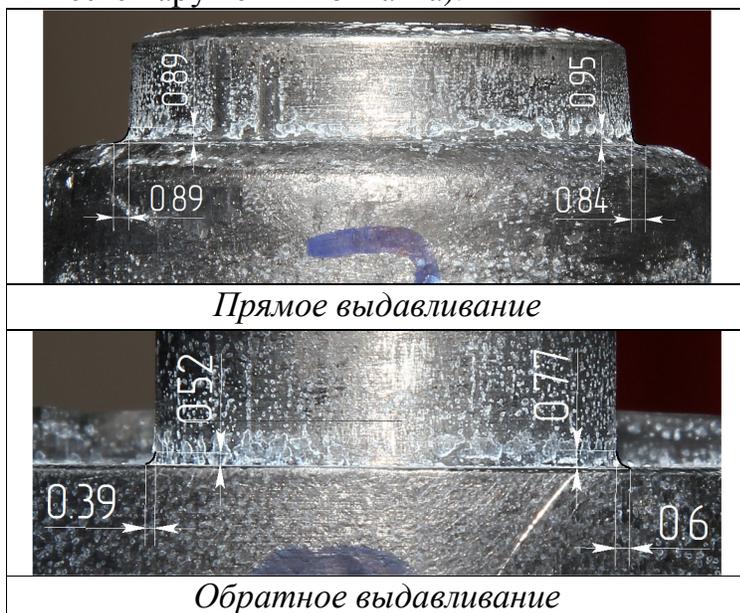
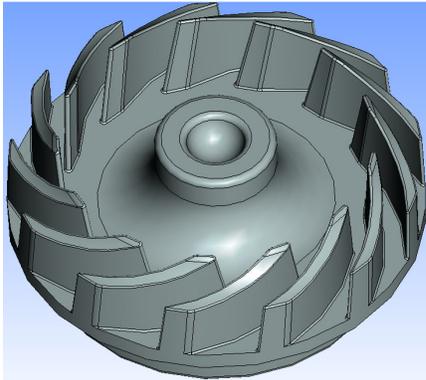


Рис. 4. Результаты измерения формы свободной границы

Для проверки корректности выбранного поля скоростей было проведено сравнение значений силы выдавливания рассчитанных методом баланса мощности (МБМ) и методом конечных элементов (МКЭ) в программе Qform 7.1. Из рисунка 3 видно, что значения силы полученные методом баланса мощности несколько выше. При обратном выдавливании значения силы в среднем завышено на 7–15 %, при прямом выдавливании – на 5–12 % (в зависимости от отношения a/b). Таким образом, учитывая характерное для метода

По результатам измерений было рассчитано среднее отношение R/b (см. схемы на рисунке 1). С учётом геометрических отношений инструмента, который применялся при проведении испытаний, по разработанным в третьей главе данной диссертационной работы диаграммам было определено теоретическое отношение R/b . В результате было установлено, что при прямом выдавливании расхождение теоретического расчёта и эксперимента составляет 2 %, в случае обратного выдавливания – 7 %.



*Рис. 5. Поковка детали
«Колесо рабочее»*

В пятой главе с использованием программ Qform 5.1 и Qform 7.1 была разработана технология изотермической штамповки поковки детали «Колесо рабочее» (рисунок 5), взамен существующей технологии изготовления заготовки методом свободнойковки, что позволило повысить КИМ с 0,23 до 0,59. Поковка штампуется в два перехода, на первом переходе осуществляется осадка, на втором – окончательная штамповка, при этом лопатки заполняются по схеме прямого выдавливания. Согласно существующей справочной литературе по определению радиуса закругления в штампе (РТМ 1.4.1644, ОСТ 1.41188-78, Справочник «Ковка и штамповка» том 2) на переходе от полотна поковки к лопаткам необходимо назначить радиус закругления от 2 до 8 мм (в зависимости от используемой литературы). На чистовой детали радиус равен 1 мм. Из диаграмм, разработанных в третьей главе данной работы, можно определить, что при радиусе закругления 1 мм нарушения контакта материала с инструментом не будет. Таким образом, при разработке чертежа поковки, радиус на переходе от полотна детали к лопаткам был назначен равным 1 мм, что позволяет повысить КИМ с 0,56 (при расчёте когда радиус закругления равен 4 мм) до 0,59, и, что самое важное, сократить время механической обработки. Моделирование процесса штамповки показало, что при заполнении лопаток поковки не должно происходить горизонтального смещения материала, поэтому на первом переходе заготовку необходимо осадить до диаметра, близкого к диаметру матрицы.

В выводах кратко подведены итоги исследований по определению оптимального радиуса закругления в штампе. Обозначены результаты работы в целом.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В работе **решена актуальная научно-техническая задача**, имеющая важное значение для машиностроительного производства, в частности для авиационной промышленности, и состоящая в теоретическом обосновании выбора радиусов закругления на поковке с учётом геометрических и температурных параметров изотермической штамповки заготовок с отрезками и рёбрами. Решение указанной научно-технической задачи позволило разработать научно-обоснованные рекомендации для определения минимально допустимых радиусов закругления в штампе. Назначение минимально допустимых радиусов закругления на поковке позволит снизить затраты дорогостоящих авиационных сплавов, сократить время на последующую механообработку и в тоже время избежать возникновения дефектов при штамповке. Основные результаты и выводы, полученные при подготовке диссертационной работы:

1. Теоретически исследован эффект нарушения контакта материала с инструментом при прямом и обратном выдавливании по схемам плоского и осесимметричного течения. По результатам исследований были разработаны рекоменда-

ции (представленные в виде диаграмм) для определения минимально допустимого радиуса закругления в штампе. Диаграммы позволяют определить минимально допустимый радиус закругления при отношении радиуса (или ширины) полотна детали a к радиусу отрезка (или ширине ребра) b от 1,2 до 4, при отношении высоты полотна детали h к b от 1 до 5, для температурного диапазона от 350 °С до 470 °С и для алюминиевых сплавов АВ, АД35, АД31, АW6082 и АМгб.

2. Определено влияние на величину зазора в месте нарушения контакта материала с инструментом таких технологических параметров как температура, деформируемый материал и геометрические параметры инструмента. Установлено, что при обратном выдавливании с увеличением ширины (диаметра) контейнера матрицы в 2,5 раза зазор в месте нарушения контакта уменьшается в среднем в 1,6 раза (в 1,5 раза при осесимметричном очаге деформации), а при прямом выдавливании увеличивается в среднем в 3 раза (в 2,2 раза при осесимметричном очаге деформации). Выявлено, что чем более интенсивно упрочняется материал в очаге деформации, тем зазор меньше. Так, например, зазор при выдавливании сплава АВ больше чем при выдавливании сплава АД35 в среднем в 1,3 раза. Показано, что с увеличением температуры на 100 °С зазор в месте нарушения контакта увеличивается в 1,1–1,5 раза в зависимости от деформируемого материала.

3. Установлено, что наличие радиуса закругления у дна матрицы при прямом выдавливании оказывает существенное влияние на величину зазора. Так, например, при штамповке сплава АД35 с увеличением радиуса закругления у дна матрицы в 5 раз зазор увеличивается приблизительно в 2 раза.

4. Определена в явном виде математическая модель сопротивления деформации при постоянной и плавно изменяющейся скорости деформации. По найденным кривым текучести алюминиевого сплава АВ были определены коэффициенты математической модели сопротивления деформации Хензеля-Шпиттеля, позволяющей рассчитать напряжение текучести сплава АВ при горячей штамповке в диапазоне скоростей деформации $0,1 - 30 \text{ с}^{-1}$ и температур 340 – 470 °С. Кривые текучести и математическая модель сопротивления деформации могут быть использованы при моделировании процессов горячей объёмной штамповки практически в любой из известных коммерческих программ.

5. Определена в явном виде математическая модель сопротивления деформации сплава АВ для расчёта процессов с резким изменением скорости деформации, позволяющая описать напряжение текучести сплава АВ при резком изменении скорости деформации в 10 раз.

6. Экспериментально проверены теоретические расчёты течения металла при прямом и обратном выдавливании. Было установлено, что при прямом выдавливании расхождение теоретически рассчитанной величины зазора в месте нарушения контакта материала с инструментом и наблюдаемой при проведении эксперимента составляет 2 %, в случае обратного выдавливания – 7 %.

7. Результаты исследований по определению минимально допустимого радиуса закругления в штампе были использованы при разработке технологии изотермической штамповки поковки «Колесо рабочее». При проектировании инструмента был назначен радиус закругления, который позволил повысить КИМ

(при прочих равных параметрах) с 0,56 до 0,59. Разработанная технология изотермической штамповки передана в производство для промышленного освоения на ФГУП «НПЦ газотурбостроения «САЛЮТ» взамен технологии изготовления поковки методом свободнойковки. Планируемый результат внедрения: повышение КИМ с 0,23 до 0,59.

8. Отдельные результаты исследования внедрены в учебный процесс на кафедре «Машины и технологии обработки металлов давлением» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)».

Основные результаты исследований отражены в следующих работах.

1. Петров П.А., Воронков В.И., Шайхулов М.В., Петров М.А., Назарова О.А. Сравнительный анализ (оценка) методов определения коэффициента трения в ОМД // Обработка материалов давлением. Сборник научных трудов. Краматорск: Донбасская государственная машиностроительная академия 2010. – №1(22), с. 124 – 130.

2. Гринберг И.В., Петров П.А., Гневашев Д.А., Воронков В.И. Физическое и конечно-элементное моделирование процесса изготовления тонкостенных оболочек в штампе для выдавливания // Технология легких сплавов 2010. – №2 с. 101 – 106.

3. Петров П.А., Воронков В.И., Плотников А.В., Басюк С.Т. Numerical analysis of the design and research into the production of shell made of magnesium alloy // Computer Methods in Materials Science 10 2010. – №2, p. 97 – 107.

4. Петров П.А., Воронков В.И., Иванов В.А., Басюк С.Т. Модель технологического процесса штамповки магниевоего колеса // Автомобильная промышленность 2010. – №10, с. 29 – 32.

5. Петров П.А., Гневашев Д.А., Воронков В.И., Иванов В.А., Басюк С.Т. Конечно-элементное моделирование процесса изготовления тонкостенных оболочек в штампе с жестким буферным устройством. // Технология легких сплавов 2011. – №1, с. 86 – 93.

6. Петров П.А., Воронков В.И., Шайхулов М.В., Петров М.А., Назарова О.А. Анализ методов исследования контактного трения, основанных на выдавливании деформируемого материала // Известия МГТУ "МАМИ" 2011. – №1(11), с. 177 – 183.

7. Петров П.А., Воронков В.И., Плотников А.А., Иванов В.А., Петров М.А., Басюк С.Т. Research into the technological process of extrusion-type forging of automotive wheel made of magnesium alloy produced with the help of loaded-die. Computer Methods in Materials Science 11 2011. – №2, p. 251 – 258.

8. Petrov P., Voronkov V., Potapenko K., Ivanov V. The effect of transient change in strain rate on plastic flow behaviour of Al-Mg-Si alloy at elevated temperatures // AIP Conf. Proc. 1353, the 14th international ESAFORM conference on material forming ESAFORM-2011, (2011). pp. 374 – 379.

9. Петров П.А., Петров М.А., Bast J., Воронков В.И., Шайхулов М.В. Numerische Vergleichsanalyse der Methoden zur Abschätzung der Reibung in Umformprozessen // Tribologie und Schmierungstechnik 5/2011, S. 10 – 14.

10. Потапенко К.Е., Пеньков И.В., Воронков В.И., Петров П.А. Исследование контактного трения при горячей изотермической штамповке сплава АМгб // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением 2012. – № 2, с. 16 – 19.

11. Воронков В.И., Петров П.А., Сапрыкин Б.Ю., Прокопов Ф.Б., Таранов А.В. Информатизация лабораторного практикума в области обработки металлов давлением. // Известия МГТУ "МАМИ" 2012. – № 2, т.3, с. 328 – 334.

12. Потапенко К.Е., Пеньков И.В., Воронков В.И., Петров П.А., Шайхулов М.В. Исследование контактного трения при горячей пластической деформации сплава АВ // Заготовительные производства в машиностроении 2012. – № 6, с. 18 – 21.

13. Petrov P., Voronkov V., Potapenko K., Petrov M. Research into the flow stress of Al-Mg-Si alloy during the abrupt change of the strain rate at elevated temperatures. // Computer Methods in Materials Science 13 (2013) 1, pp. 63 – 67.

14. Косачев Н.В., Петров П. А., Прокопов Ф.Б., Воронков В. И. Разработка оснастки для нахождения предела текучести материалов термографическим методом. // Известия МГТУ "МАМИ" 2013. – №2(16), т.2, с. 194 – 198.

15. Потапенко К. Е., Воронков В. И., Петров П. А. Моделирование механических испытаний для изучения сопротивления деформации при резких изменениях скорости деформации. // Известия МГТУ "МАМИ" 2013. – №2(16), т.2, с. 178 – 184.

16. Воронков В. И., Потапенко К. Е., Петров П. А., Гамзина О. Ю. Получение уточнённых данных по сопротивлению пластической деформации при горячей объёмной штамповке алюминиевого сплава АМгб. // Обработка материалов давлением. Сборник научных трудов. ДГМА 2013. – № 3 (36), с. 17 – 23.

17. Потапенко К. Е., Воронков В. И., Петров П. А. Определение модели сопротивления деформации по найденным изотермическим кривым текучести с применением современных компьютерных программ. // Заготовительные производства в машиностроении 2013. – № 8, с. 32 – 38.

18. Петров П.А., Воронков В.И., Потапенко К.Е., Петров М.А., Гамзина О.Ю. Research into the flow stress of Al-Mg-Si alloy (AD-35) during the abrupt change of the strain rate at elevated temperatures. // Key Engineering Materials. 2013, 554 – 557, 1099 – 1104.

19. Воронков В.И., Калпин Ю.Г., Петров П.А., Потапенко К.Е. Определение оптимального радиуса закругления в штампе для изотермического обратного выдавливания. // Заготовительные производства в машиностроении 2014. – № 2, с. 19 – 24.

20. Воронков В.И. Определение минимально допустимого радиуса закругления в штампе для изотермического прямого осесимметричного выдавливания алюминиевого сплава АД35. // Известия МГТУ "МАМИ" 2014. – №1(19), т.2, с. 221 – 227.