

На правах рукописи



**Ковальчук Алексей Иванович**

**РАЗРАБОТКА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ  
ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ С КОНИЧЕСКИМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ  
ХОЛОДНЫМ ВЫДАВЛИВАНИЕМ  
НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Специальность 05.16.05 – Обработка металлов давлением

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

Новокузнецк – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ)»

Научный руководитель: Александров Александр Александрович  
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: Курлаев Николай Васильевич  
доктор технических наук, доцент,  
заместитель заведующего кафедрой  
самолето- и вертолетостроения ФГБОУ ВПО  
«Новосибирский государственный  
технический университет»

Поксеваткин Михаил Иванович  
кандидат технических наук, профессор,  
профессор кафедры машиностроительных  
технологий и оборудования  
ФГБОУ ВПО  
«Алтайский государственный технический  
Университет им. И.И. Ползунова»  
(г. Барнаул)

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Омский государственный  
технический университет»

Защита состоится «22» марта 2016 г. в 13<sup>00</sup> часов в аудитории ЗП на заседании диссертационного совета Д 212.252.01 при ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет» по адресу: 654007, г. Новокузнецк, Кемеровская область, ул. Кирова, д. 42, СибГИУ.

Факс: 8(3843) 46-57-92.

E-mail: [ds21225201@sibsiu.ru](mailto:ds21225201@sibsiu.ru).

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке и на сайте ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет» [www.sibsiu.ru](http://www.sibsiu.ru).

Автореферат разослан « » 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.252.01,  
д.т.н, профессор



О.И. Нохрина

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

Эффективность метода холодной объемной штамповки обусловлена возможностью получения поковок, приближающихся по форме, размерам и качеству поверхности к готовым деталям, что позволяет значительно уменьшить или полностью исключить доработку резанием. Однако из-за высоких нагрузок на инструмент использование технологий холодной объемной штамповки ограничено.

Применение процессов комбинированного выдавливания полых деталей с коническими поверхностями, включающих операции прямого и обратного выдавливания, способствует снижению сил деформирования, а также дает возможность сократить количество переходов штамповки.

Однако ряд способов комбинированного выдавливания, которые могут повысить эффективность создаваемых технологий получения изделий с коническими поверхностями, остаются недостаточно изученными.

Существующие теоретические методы обработки металлов давлением позволяют рассчитывать силовой режим процесса, кинематику течения металла и формоизменение штампуемой заготовки, напряженно-деформированное состояние и степень исчерпания ресурса пластичности металла, и определять оптимальные размеры формообразующего инструмента. Вместе с тем для получения более полного описания процессов пластической деформации можно использовать резервные возможности известных методов, например метода верхней оценки (МВО), для уточнения некоторых существующих решений и выработки научно обоснованных рекомендаций по проектированию технологии штамповки изделий.

Актуальность работы, направленной на совершенствование расчетных методов и математических моделей процессов холодного выдавливания для создания новых и совершенствования существующих технологий изготовления фасонных деталей, в том числе с использованием способов комбинированного выдавливания, определяется возможностью снижения материальных и энергетических затрат производства.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с Аналитической целевой программой министерства образования и науки Российской Федерации «Развитие научного потенциала высшей школы на 2009-2012 г.г.» (проекты 2.1.2/5431 и 7.1765.2011).

### **Степень ее разработанности**

Диссертация является законченным научным трудом, в котором представлены новые и усовершенствованные математические модели процессов прямого и комбинированного выдавливания, разработанные с использованием теоретических методов обработки металлов давлением, а также полученные автором экспериментальные данные. Разработан алгоритм и компьютерная программа, позволяющая производить математическое моделирование процесса комбинированного выдавливания. На основе проведенных исследований разработаны практические рекомендации по проектированию технологических процессов изготовления деталей с

коническими поверхностями. Приведены примеры разработанных технологий изготовления двух типов деталей, принятых к использованию на производстве.

### **Цели и задачи**

Разработка и совершенствование технологий штамповки деталей с коническими поверхностями методом холодного выдавливания с применением научно обоснованных рекомендаций, полученных на основе экспериментальных и теоретических исследований, для снижения энергетических и материальных затрат производства.

1. Разработать математическую модель процесса холодного комбинированного выдавливания детали с коническими полостями на основе вариационного энергетического метода, для определения силовых, кинематических и деформационных параметров.

2. Разработать уточненную математическую модель процесса холодного прямого выдавливания цилиндрической заготовки через коническую матрицу по линиям тока для нахождения оптимального угла матрицы, обеспечивающего наименьшую силу деформирования. Сопоставить полученные результаты с расчетами плоской задачи методом верхней оценки для клиновой матрицы.

3. Разработать графоаналитическую методику расчета деформированного состояния металла при прямом выдавливании через клиновую или коническую матрицу.

4. Провести эксперименты для оценки адекватности результатов теоретических исследований и научного обоснования рекомендаций, полученных с использованием разработанных математических моделей и расчетных методик.

5. Применить результаты исследований для совершенствования технологий изготовления изделий с коническими поверхностями.

### **Научная новизна**

1. Разработана и экспериментально подтверждена математическая модель для определения деформирующей силы, ресурса пластичности металла и формоизменения штампуемой заготовки при холодном комбинированном выдавливании детали с коническими полостями.

2. С использованием уточненной математической модели процесса холодного прямого выдавливания цилиндрической заготовки через коническую матрицу определены, обеспечивающие наименьшую силу выдавливания, оптимальные углы матрицы, значения которых подтверждены экспериментами.

3. Предложена методика определения деформированного состояния металла при прямом выдавливании на основе расчета положений сечений с использованием годографа скоростей.

4. Теоретически установлено, что соотношения размеров клиновой матрицы, обеспечивающие наименьшую силу прямого выдавливания, могут быть описаны кривой третьего порядка при любом заданном значении коэффициента трения. С учетом положения и размеров очага деформации, соответствующих условию минимума мощности деформации, построено семейство таких кривых, позволяющее графически определить относительную удельную силу для заданного угла матрицы или величины обжатия.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

- С использованием созданных математических моделей процессов холодного выдавливания разработаны технологии штамповки, обеспечивающие получение деталей с коническими поверхностями с приложением наименьшей деформирующей силы.

- Предложена технология изготовления детали «биконическая втулка» холодным комбинированным выдавливанием, позволяющая увеличить коэффициент использования металла в 1,43 раза.

- Усовершенствована технология двухпереходной штамповки детали «корпус», за счет оптимизации угла конуса матрицы первого перехода, в результате достигнуто снижение деформирующей силы в 1,35 раза.

- Разработанные математические модели, методики расчета и рекомендации по проектированию процессов холодной объемной штамповки деталей с коническими поверхностями, а также компьютерная программа для расчета технологических параметров холодного выдавливания детали «биконическая втулка» (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2012617355) приняты к использованию на АО «Омсктрансмаш» г. Омск.

### **Методология и методы исследования**

При исследованиях в лабораторных и производственных условиях, использованы теоретические и экспериментальные методы обработки металлов давлением (метод мощностей, метод верхней оценки, метод координатных сеток), математическое моделирование, стандартные и специально разработанные программы, статистические методы обработки данных.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Разработанная математическая модель процесса холодного комбинированного выдавливания изделий с коническими полостями.

2. Разработана методика определения запаса пластичности металла при холодном комбинированном выдавливании в конические полости.

3. Уточненная математическая модель процесса прямого выдавливания цилиндрической заготовки через коническую матрицу и определяемые с её помощью оптимальные параметры инструмента, обеспечивающие наименьшую силу деформирования.

4. Методика расчета деформированного состояния заготовки при выдавливании через клиновую или коническую матрицу с использованием годографа скоростей.

5. Результаты экспериментов по определению деформированного состояния и формоизменения заготовки, а также сил выдавливания в исследованных процессах штамповки.

6. Технологии изготовления осесимметричных деталей с коническими поверхностями, разработанные с использованием рекомендаций, полученных на основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований.

### **Степень достоверности и апробация результатов**

Обеспечивается обоснованным использованием математических методов теории обработки металлов давлением, подтвержденных качественным и количественным согласованием теоретических и экспериментальных

результатов с данными, полученными, как лично автором, так и другими исследователями.

### **Апробация работы**

Материалы диссертации докладывались и обсуждались на конференциях:

– III Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Развитие дорожно-транспортного комплекса и строительной инфраструктуры на основе рационального природопользования» – Омск: СибАДИ, 2008 г.;

– II Всероссийская молодежная научно-техническая конференция «Россия молодая: передовые технологии в промышленность» – Омск: ОмГТУ, 2009 г.;

– VII Международная научно-техническая конференция «Динамика систем, механизмов и машин» – Омск: ОмГТУ, 2009 г.;

– 69-я Международная научно-техническая конференция Ассоциации автомобильных инженеров (ААИ) «Какой автомобиль нужен России?» – Омск: СибАДИ, 2010 г.;

– 5-я Межрегиональная научно-практическая конференция: «Многоцелевые гусеничные и колесные машины: разработка, производство, модернизация, эксплуатация, боевая эффективность, наука и образование» «Броня-2010» – Омск: ОТИИ, 2010 г.;

– VI Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Развитие дорожно-транспортного комплекса и строительной инфраструктуры на основе рационального природопользования» Омск: СибАДИ, 2011 г.;

– Международная научно-техническая конференция «Новые наукоемкие технологии получения материалов и изделий повышенного качества методами обработки давлением» – Краматорск: ДГМА, 2011 г.;

– 65-я Всероссийская научно-техническая конференция ориентированная на фундаментальные и прикладные исследования – Омск: СибАДИ, 2011 г.;

– Межвузовская научная конференция студентов и аспирантов «Природные и интеллектуальные ресурсы Омского региона (ОМСКРЕСУРС – 2 – 2012)» – Омск: СибАДИ, 2012 г.;

– Международная 66-я научно-практическая конференция «Ориентированные фундаментальные и прикладные исследования – основа модернизации и инновационного развития архитектуру-строительного и дорожно-транспортного комплексов России» – Омск: СибАДИ, 2012 г.;

– II Международная научная конференция «Инновационная деятельность предприятий по исследованию, обработке и получению современных материалов и сплавов» – Орск: ОГТИ, 2012 г.;

– 6-я Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее Машиностроения России» – Москва: МГТУ, 2013 г.;

– Молодежная научно-техническая конференция «Информационные технологии в науке и производстве» – Омск: ОмГТУ, 2014 г.

### **Специальность, которой соответствует диссертация**

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 05.16.05.

– Обработка металлов давлением и его следующим пунктам:

п. 1. – Исследование и расчет деформационных, скоростных, силовых, температурных и других параметров разнообразных процессов обработки металлов, сплавов и композитов давлением.

п. 2. – Исследование процессов пластической деформации металлов, сплавов и композитов с помощью методов физического и математического моделирования.

п. 5. – Математическое описание процессов пластической деформации металлов, сплавов и композитов с целью создания математических моделей, способов, процессов и технологий.

**Личное участие соискателя в получении результатов, изложенных в диссертации,** заключается в выполнении всех этапов диссертационной работы:

- изучение состояния вопроса и обоснование актуальности темы, формулировка цели и задач научного исследования;
- разработка математических моделей процессов прямого и комбинированного выдавливания с использованием теоретических методов обработки металлов давлением;
- разработка программных продуктов для математического моделирования;
- проведение экспериментов и обработка экспериментальных данных;
- разработка ресурсосберегающих технологий холодной объемной штамповки фасонных деталей с коническими поверхностями.

#### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 5 статей в рецензируемых научных журналах, общее количество опубликованных работ по теме диссертационной работы – 20, из которых 2 свидетельства о государственной регистрации компьютерной программы и электронного ресурса.

#### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, четырех разделов и заключения, изложенных на 134 страницах, содержит 71 рисунок, 3 таблицы, библиографический список из 135 наименований и 2 приложения.

**Во введении** кратко описаны область исследования, основные положения и проблемы, определяющие актуальность и важность научных исследований по теме диссертационной работы, сформулированы цели и основные задачи, также отмечена научная новизна, практическая значимость и достоверность полученных результатов.

**В первом разделе** выполнен обзор работ, посвященных теоретическим и экспериментальным исследованиям процессов холодной объемной штамповки фасонных осесимметричных деталей с коническими поверхностями, а также анализ существующих технологий их изготовления.

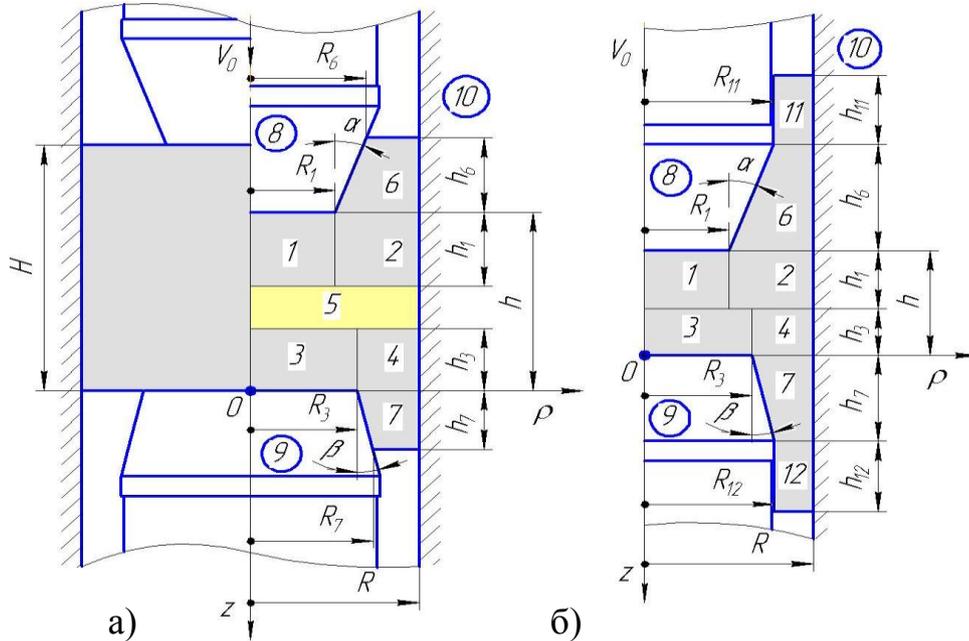
Рассмотрены технологические операции холодного прямого, обратного выдавливания и их комбинации, а также математические модели и методики их расчета. Показаны их достоинства и недостатки при разработке технологий штамповки изделий с коническими поверхностями.

Приведен расчет процессов штамповки деталей рассматриваемого типа, с применением различных методов, включая метод верхней оценки, метод мощностей из которых следует, что получаемые результаты достаточно близки.

Эффективность получения детали типа стакан с двумя коническими полостями комбинированным выдавливанием заключается в возможности экономии материала, получении конфигурации, близкой к готовой детали. Однако данный способ их получения недостаточно изучен.

**Во втором разделе** представлено теоретическое исследование процесса холодного комбинированного выдавливания деталей с коническими полостями, включающего операции прямого и обратного выдавливания.

При разработке математической модели, согласно расчетной схеме (рисунок 1), применен энергетический метод мощностей. Приняты следующие допущения: деформируемый металл жесткопластичный; предел текучести металла на сдвиг  $\tau_s = \sigma_s / \sqrt{3}$ ; контактное касательное напряжение  $\tau_k = 2\mu\tau_s$ , где  $\mu$  – коэффициент трения ( $0 \leq \mu \leq 0,5$ ).



а – конических участков; б – цилиндрических участков

Рисунок 1 – Расчетная схема процесса комбинированного выдавливания по стадиям формообразования

Составляющие скоростей перемещения частиц металла деформируемой заготовки в блоках 1, 2, 3, 4 описывались известными зависимостями с линейным законом распределения скоростей, а в блоках 6, 7, 11, 12 нижеследующими уравнениями, удовлетворяющими граничным условиям:

$$V_{z6} = -(1-m) \cdot V_0 \cdot R_6^2 / (R^2 - R_6^2) + m \cdot V_0, \quad V_{\rho6} = V_{z6} \operatorname{tg} \alpha \cdot R_6 (R^2 - \rho^2) / (\rho (R^2 - R_6^2));$$

$$V_{z7} = m \cdot V_0 \cdot R^2 / (R^2 - R_7^2), \quad V_{\rho7} = V_{z7} \operatorname{tg} \beta \cdot R_7 (R^2 - \rho^2) / (\rho (R^2 - R_7^2));$$

$$V_{z11} = -(1-m) \cdot V_0 \cdot R_{11}^2 / (R^2 - R_{11}^2) + m \cdot V_0, \quad V_{z12} = m \cdot V_0 \cdot R^2 / (R^2 - R_{12}^2), \quad V_{\rho11} = V_{\rho12} = 0,$$

где  $V_0$  – скорость пуансона,  $h$  – расстояние между пуансонами,  $R_6$  – внутренний радиус верхней кромки,  $R_6 = R_1 + z \cdot \operatorname{tg} \alpha$ ,  $R_7$  – внутренний радиус нижней кромки,  $R_7 = R_3 + z \cdot \operatorname{tg} \beta$ ,  $m$  – варьируемый кинематический параметр,

определяющий скорости течения металла в верхнюю и нижнюю полость от хода пуансона. При деформировании заготовки имеются очаги деформации, состоящие из блоков 1, 2, 6 для верхнего и 3, 4, 7 для нижнего очагов деформаций, которые могут быть разделены жестким блоком 5.

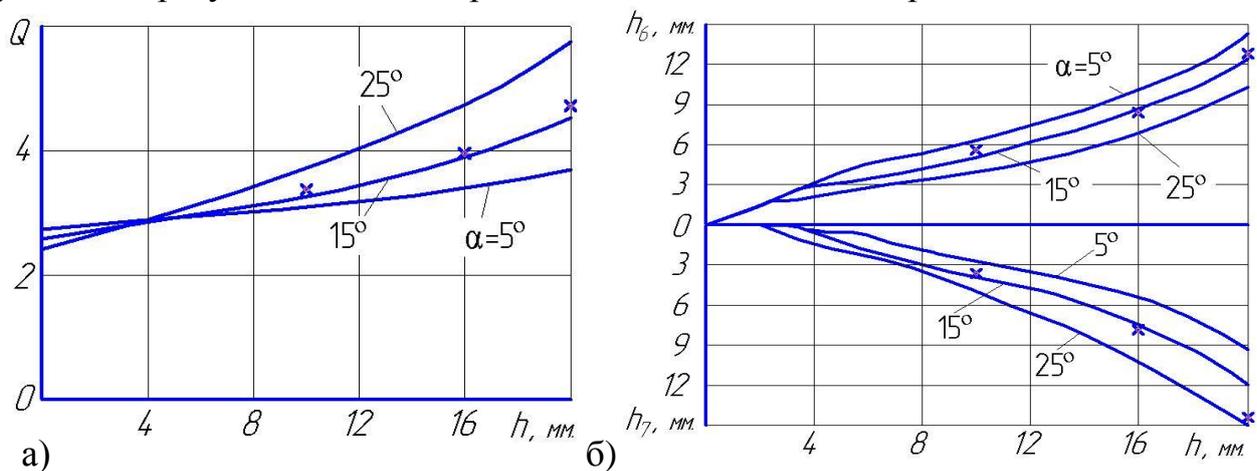
По заданным полям скоростей определены скорости деформаций, разрывы скоростей на границах блоков и вычислены мощности деформации внутри пластических блоков, сдвиг на границах блоков внутри заготовки и на контактное трение по поверхности инструмента. Суммированием составляющих получено выражение полной мощности  $N$ , представляющее собой функцию с тремя варьируемыми параметрами,  $h_1$ ,  $h_3$  и  $m$ . Их значения определяются с использованием вариационного принципа возможных изменений деформированного состояния по условию минимума силы на пуансоне или соответствующему минимуму полной мощности  $N$ .

$$N = \tau_s \int_V H_i \cdot dV + \tau_s \int_S [V]_{i,j} \cdot dS + \tau_k \int_S [V]_{i,k} \cdot dS, \quad (1)$$

где  $H_i$  – интенсивность скоростей деформаций сдвига в пластических блоках;  $[V]_{i,j}$  – разрывы в скоростях по поверхностям между блоками;  $[V]_{i,k}$  – разрывы в скоростях по поверхностям контакта инструмента и материала.

На основе математической модели разработана компьютерная программа, позволяющая рассчитать силовой режим и формоизменения при комбинированном выдавливании, в подвижной и в неподвижной матрице.

Сравнение теоретической величины относительной удельной силы  $Q$ , действующей на пуансон (рисунок 2) и высот  $h_6$  и  $h_7$  в зависимости от хода пуансона с результатами экспериментов показывает их хорошее соответствие.



а – относительной удельной силы; б – высоты конических участков

— — теория, x – эксперимент

Рисунок 2 – Изменение параметров при комбинированном выдавливании от хода пуансона при  $R=15$  мм,  $H=24$  мм,  $S=4$  мм,  $R_1=R_3=6$  мм,  $\beta=15^\circ$ ,  $\mu=0,15$

Рисунок 2а иллюстрирует интенсивный рост относительной удельной силы при увеличении угла конуса пуансона  $\alpha$ . Зависимости на рисунке 2б показывают, что при увеличении угла  $\alpha$  металл течет преимущественно в прямом направлении.

В процессе выдавливания, по мере затекания металла в сужающиеся полости штампа увеличивается интенсивность деформации, которая может приводить к исчерпанию запаса пластичности и образованию трещин на свободных поверхностях (кромках), причем наиболее опасными с точки зрения разрушения, являются траектории перемещения частиц металла по коническим поверхностям пуансона (при обратном выдавливании) и контрпуансона (при прямом выдавливании).

На основе, базирующейся на феноменологической теории разрушения В.Л. Колмогорова, методики В.В. Евстифеева и Г.Н. Подколзина для расчета предельной пластичности металла при прямом выдавливании конических стаканов, автором разработана методика определения запаса пластичности металла при холодном комбинированном выдавливании в конические полости.

По результатам расчетов построены графики изменения показателей напряженно-деформированного состояния для различных углов конусности пуансонов и относительной начальной величины конического зазора. Отмечено, что для одинаковых соотношений размеров инструмента степень деформации сдвига при обратном выдавливании выше, чем при прямом выдавливании, а уровень относительного гидростатического давления в рассматриваемых блоках примерно одинаковый.

Теоретически определены относительные величины начального зазора, обеспечивающие наименьший уровень исчерпания ресурса пластичности металла при прямом и обратном выдавливании в кольцевые конические полости, в зависимости от материала заготовки.

**В третьем разделе** приведен теоретический расчет по линиям тока процесса холодного прямого выдавливания цилиндрической заготовки через коническую матрицу.

При анализе с использованием расчетной схемы процесса прямого выдавливания по линиям тока (рисунок 3) за основу взята математическая модель, разработанная Ю.А. Алюшиным.

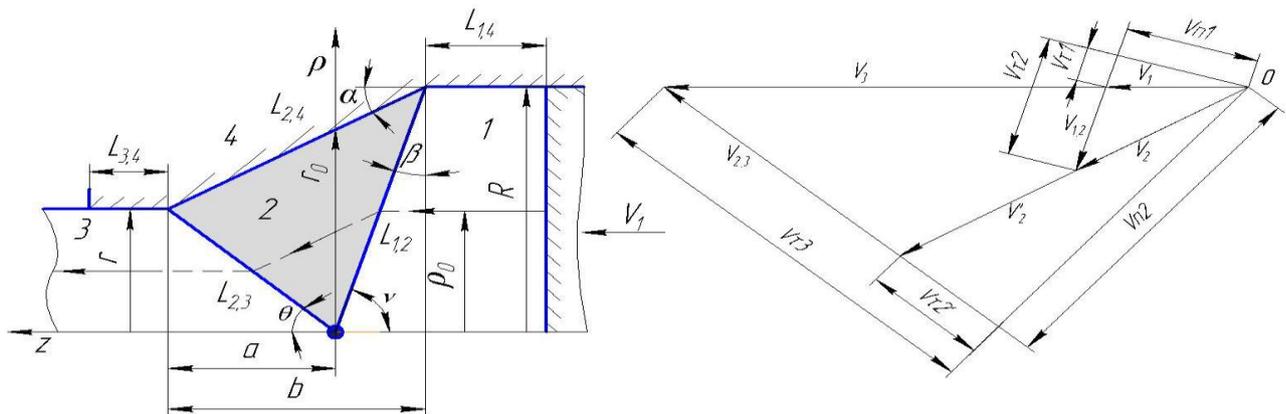


Рисунок 3 – Расчетная схема процесса и годограф скоростей

В принятых нами обозначениях, действующая на пуансоне относительная удельная сила:

$$Q = Q_2 + Q_{1,2} + Q_{2,3} + Q_{1,4} + Q_{2,4} + Q_{3,4}, \quad (2)$$

где доли относительной удельной силы затрачиваемые соответственно:  $Q_2$  – на деформацию в блоке 2,  $Q_{1,2}$ ,  $Q_{2,3}$  – на сдвиговую деформацию на границах между блоками 1 и 2, 2 и 3,  $Q_{2,4}$ ,  $Q_{3,4}$ ,  $Q_{1,4}$  – на преодоление сопротивления контактного трения (на конической поверхности, калибрующем пояске и контейнерной части матрицы).

Отметим, что в прежней модели процесса показано, что «даже простейшие кинематически возможные поля скоростей приводят к сложным зависимостям, интегрирование которых связано с существенными математическими трудностями», поэтому составляющая, учитывающая затраты мощности на пластическую деформацию в блоке 2 не была учтена.

Составляющая на деформацию в блоке 2 рассчитывалась по формуле,

$$Q_2 = \frac{1}{\pi R^2} \iiint_V H \cdot dV = \frac{2}{R^2} \left( \int_{b-a}^0 \int_{L_{1,2}}^{L_{2,4}} H \cdot \rho \cdot d\rho \cdot dz + \int_0^a \int_{L_{2,3}}^{L_{2,4}} H \cdot \rho \cdot d\rho \cdot dz \right).$$

Интенсивность скоростей деформации вычислялась по уравнению,

$$H = \sqrt{4(\xi_\rho^2 + \xi_\rho \xi_z + \xi_z^2) + \left( \frac{\xi_\rho}{\operatorname{tg} \alpha} + \xi_z \operatorname{tg} \alpha \right)^2} = \frac{V_0 \operatorname{tg} \alpha \cdot R^2}{r_0^2 \rho} \cdot \sqrt{4 + \operatorname{tg}^2 \alpha + \frac{6 \operatorname{tg} \alpha \cdot z}{\rho} + \frac{(4 \operatorname{tg}^2 \alpha + 1) \cdot z^2}{\rho^2}}.$$

После взятия интеграла, достигнутого путем преобразования уравнения интенсивности скоростей деформаций, получено аналитическое выражение, учитывающее затраты мощности на пластическую деформацию в блоке 2.

$$Q_2 = \frac{D_2}{2} \ln \left( \frac{(D_1 D_2 + D_3)(D_2 C_1 - C_2)}{(D_1 D_2 - D_3)(D_2 C_1 + C_2)} \right) + \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} \cdot \ln \left( \frac{B + C_1}{A + D_1} \right) + C_1 - D_1,$$

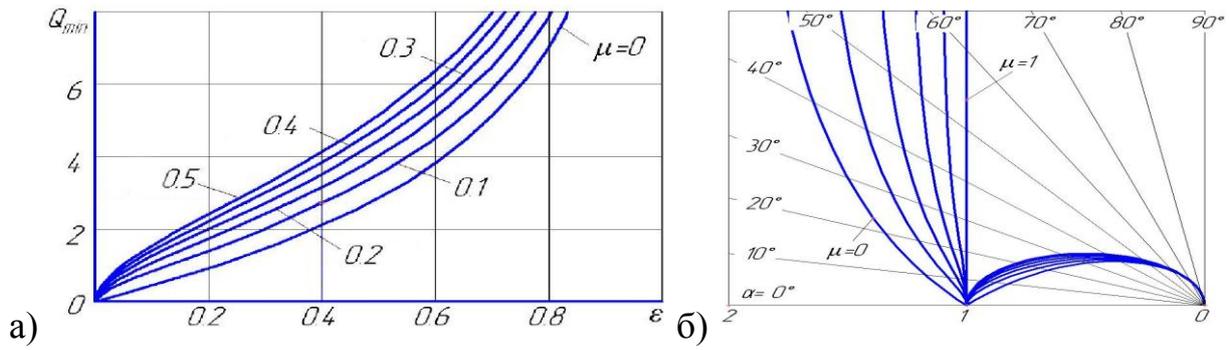
где  $D_1 = \sqrt{A^2 + 4}$ ,  $D_2 = \sqrt{4 + \operatorname{ctg}^2 \alpha}$ ,  $D_3 = 4 + A \cdot \operatorname{ctg} \alpha$ ,  $C_1 = \sqrt{B^2 + 4}$ ,  $A = \operatorname{ctg} \alpha - (\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{ctg} \alpha)r/r_0$ ,  $B = \operatorname{ctg} \alpha - (\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{ctg} \alpha)R/r_0$ ,  $C_2 = 4 + B \cdot \operatorname{ctg} \alpha$ .

Необходимо отметить, что анализ уравнений (результатов) полученных при расчете составляющих  $Q_{1,2}$ ,  $Q_{2,3}$ ,  $Q_{2,4}$ ,  $Q_{3,4}$ ,  $Q_{1,4}$  показал, что эти уравнения могут быть записаны в виде, аналогичном формулам, используемым для расчета плоской деформации:  $Q_{1,4} + Q_{2,4} + Q_{3,4} = L_{1,4}/R + L_{2,4}/(r_0 \cdot \cos \alpha) + L_{3,4}/r$ ,  $Q_{1,2} = L_{1,2}^2 \cdot \sin \alpha / (R \cdot r_0 \cdot \cos \alpha)$ ,  $Q_{2,3} = L_{2,3}^2 \cdot \sin \alpha / (r \cdot r_0 \cdot \cos \alpha)$ .

Таким образом, все составляющие, входящие в уравнение (2) определены. Это позволило точнее рассчитать величину относительной удельной силы по сравнению с ранней моделью процесса, в которой не были учтены затраты мощности пластической деформации блока 2.

В результате оптимизационного решения по условию минимума полной мощности получены графики величины относительной удельной силы выдавливания в зависимости от обжатия, показанные на рисунке 4а.

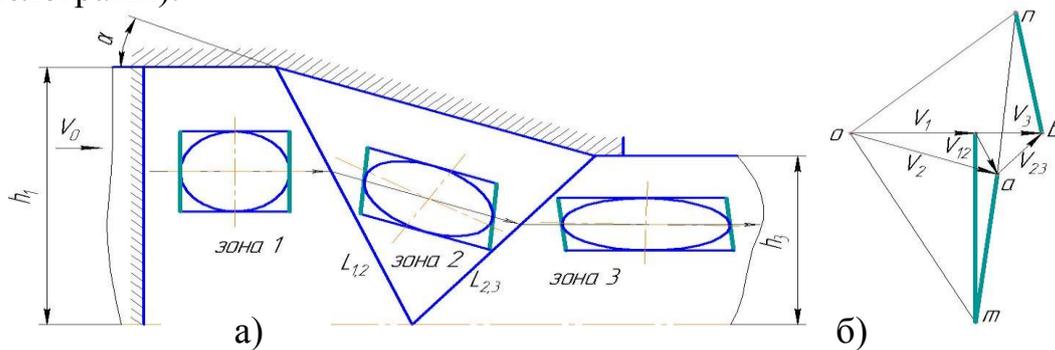
Необходимо отметить, что оптимальные соотношения между входным и выходным сечениями матрицы, как при плоской, так и осесимметричной деформации (без учета мощности деформации в блоке 2) одинаковы при любом заданном коэффициенте трения, описываются кривыми (рисунок 4б), по которым можно определить величину относительной удельной силы при любом заданном угле матрицы или обжатии.



а – относительной удельной силы; б – соотношений матрицы

Рисунок 4 – Оптимизационные зависимости

Расчет деформированного состояния при прямом выдавливании для схем плоской и осесимметричной деформации осуществлялся с использованием годографа скоростей по разработанной методике. На рисунке 5 приведен пример графического расчета формоизменения ячейки координатной сетки при прямом выдавливании через симметричную клиновую матрицу (исходная форма ячейки – квадрат; после прохождении линии разрыва скоростей – параллелограмм).

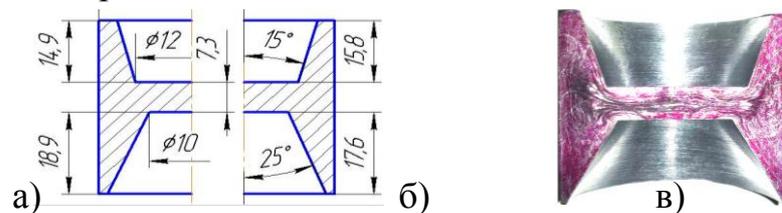


а – в физической плоскости; б – на годографе скоростей

Рисунок 5 – Графический расчет формоизменения ячеек при выдавливании

**В четвертом разделе** дано описание проведенных экспериментов по комбинированному и прямому выдавливанию при различных соотношениях размеров формообразующего инструмента, их результаты, сравнение с теоретическими расчетами, а также разработанные технологии холодной штамповки деталей с коническими поверхностями.

На рисунке 6 показаны размеры и форма поковки по расчетным и опытным данным, а также натурный вид деформированного образца (с нанесенной координатной сеткой), полученного холодным комбинированным выдавливанием цилиндрической заготовки.



а – расчет; б – эксперимент; в – деформированный образец

Рисунок 6 – Сравнение расчетной и опытной формы поковки

Сравнение экспериментальных и теоретических результатов, как по силам деформирования, так и по формоизменению, показали достаточно близкие результаты. Расхождение составило порядка 7% по удельной силе выдавливания, а по формоизменению 6,8%.

Разработаны рекомендации к усовершенствованию технологии получения осесимметричной детали «биконическая втулка», которая по базовой технологии изготавливается резанием прутка из латуни Л63 диаметром 32 мм.

Расчеты, выполненные с помощью разработанной компьютерной программы, показали, что деталь «биконическая втулка» для равного заполнения зон целесообразно получать холодным комбинированным выдавливанием в подвижной матрице из заготовки диаметром 30 мм и высотой 23 мм.

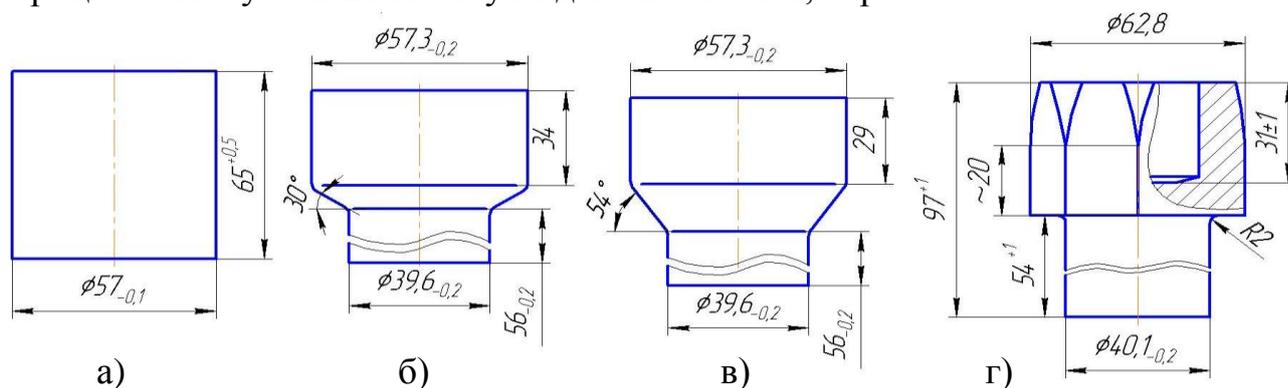
Деталь предложено изготавливать по способу, показанному на рисунке 6, который использован при проведении экспериментов, или выдавливанием в сужающиеся конические полости с использованием разъемной матрицы. Полученную поковку дорабатывают, удаляя металл с цилиндрической поверхности до достижения требуемого размера.

Предложенная технология изготовления детали «биконическая втулка» дает возможность снизить расход металла, уменьшить объем механообработки и увеличить коэффициент использования металла в 1,43 раза.

На основе результатов экспериментальных и теоретических исследований усовершенствована технология выдавливания детали «корпус» (материал – сталь 20), штампуемой за два перехода.

По применяемой в настоящее время технологии (рисунок 7) первый переход прямого выдавливания через коническую матрицу является наиболее нагруженным, что вызвало необходимость поиска условий, обеспечивающих снижение деформирующей силы на этом переходе.

Расчеты показали, что в данном случае за счет оптимизации угла конуса матрицы можно уменьшить силу выдавливания в 1,35 раза.



а – заготовка; б – существующий и в – предлагаемый варианты первого перехода; г – второй переход

Рисунок 7 – Технологические переходы штамповки детали «корпус»

Разработанные математические модели, методики, рекомендации, программа расчета процессов и технологии изготовления деталей холодным выдавливанием приняты к использованию на АО «Омсктрансмаш» г. Омска.

## **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ**

1. Решена актуальная научно-техническая задача по снижению материальных и энергетических затрат при производстве фасонных деталей получаемых холодным выдавливанием.

2. Разработана методика прогнозирования предельной пластичности металла при холодном комбинированном выдавливании в конические полости.

3. Разработана математическая модель, алгоритм и компьютерная программа для расчета вариационным энергетическим методом силового режима, формоизменения заготовки и ресурса пластичности штампуемого материала при комбинированном выдавливании детали с двумя коническими полостями.

4. Проведены эксперименты и отработка технологии комбинированного выдавливания двух типоразмеров деталей с коническими полостями. Сравнение опытных и теоретических данных по силе деформирования и по формоизменению показало, что наибольшее расхождение по удельной силе составило 7,3%, а по формоизменению 6,8%.

5. Получено уточненное аналитическое решение задачи к расчету силы прямого выдавливания цилиндрической заготовки через коническую матрицу по линиям тока.

6. Разработана графоаналитическая методика определения формоизменения ячеек координатной сетки в штампованной заготовке с использованием годографа скоростей для расчета деформированного состояния частиц металла при выдавливании заготовки через клиновую или коническую матрицу.

Теоретически установлено, что оптимальные соотношения размеров инструмента и очага деформации обеспечивающие минимум энергетических затрат при прямом выдавливании, описываются кривыми третьего порядка. Например, при нулевом трении – строфоидой.

7. На основе результатов исследований были выработаны практические рекомендации, использованные при разработке технологий изготовления деталей «биконическая втулка» и «корпус».

Изготовление детали «биконическая втулка» по разработанной технологии увеличивает коэффициент использования металла в 1,43 раза, по сравнению с обработкой резанием.

Усовершенствование технологии холодной объемной штамповки за два перехода многогранной детали «корпус» достигнуто оптимизацией угла конической воронки матрицы первого перехода, что позволило снизить величину деформирующей силы в 1,35 раза.

8. Разработанные математические модели, методики, рекомендации, программа расчета процессов и технологии изготовления деталей холодным выдавливанием приняты к использованию на АО «Омсктрансмаш» г. Омска.

### **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

#### **Публикации в рецензируемых изданиях:**

1. Ковальчук, А.И. К расчету силы прямого выдавливания в конической матрице по линиям тока (краткое сообщение) [Текст] / А.И. Ковальчук,

А.А. Александров, В.В. Евстифеев // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия, 2011. № 12. С. 52.

2. Евстифеев, В.В. К расчету процессов деформации по линиям тока (краткое сообщение) [Текст] / В.В. Евстифеев, А.А. Александров, А.И. Ковальчук // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия, 2015. № 4. С. 282-283.

3. Александров, А.А. Прогнозирование разрушения заготовки при прямом холодном выдавливании в конической матрице [Текст] / А.А. Александров, А.И. Ковальчук // Вестник Академии военных наук, 2010. № 3 (32). С. 198-202.

4. Александров, А.А. Математическое моделирование процесса поперечного выдавливания конических фланцев на трубной заготовке [Текст] / А.А. Александров, В.В. Евстифеев, А.И. Ковальчук, А.В. Евстифеев // Вестник СибАДИ, 2012. № 6. С. 93-98.

5. Ковальчук, А.И. Расчет параметров процесса комбинированного выдавливания полых деталей переменного сечения [Текст] / А.И. Ковальчук, А.А. Александров, А.В. Евстифеев, В.В. Евстифеев // Вестник СибАДИ, 2013. № 1 (29). С. 18-23.

**В других изданиях:**

6. Александров, А.А. Геометрия предельных решений некоторых задач обработки металлов давлением [Текст] / А.А. Александров, В.В. Евстифеев, А.И. Ковальчук // Инновационная деятельность предприятий по исследованию, обработке и получению современных материалов и сплавов: сб. докл. междунар. науч. конф. Орск: ОГТИ. М.: Машиностроение, 2012. Т.1.С. 216-226.

7. Александров, А.А. К расчету силы прямого выдавливания в конической матрице по линиям тока [Текст] / А.А. Александров, А.И. Ковальчук // Обработка материалов давлением: сб. науч. трудов. Краматорск: ДГМА, 2010. № 4 (25). С. 22-25.

8. Александров, А.А. О некоторых графических построениях к расчетам процессов пластической деформации металлов [Текст] / А.А. Александров, А.И. Ковальчук // Обработка материалов давлением: сб. науч. трудов. Краматорск: ДГМА, 2011. № 1 (26). С. 11-16.

9. Александров, А.А. Динамические трапеции в задачах плоской деформации [Текст] / А.А. Александров, А.И. Ковальчук // Динамика систем, механизмов и машин: Матер. VII Междунар. науч.-техн. конф. Омск: ОмГТУ, 2009. Кн. 2. С. 212-217.

10. Александров, А.А. Графический метод определения направления волокна при пластической деформации заготовки [Текст] / А.А. Александров, А.И. Ковальчук // Матер. 69-й Междунар. науч.-технич. конф. «Ассоциации автомобильных инженеров». Омск: СибАДИ, 2010. С. 145-148.

11. Ковальчук, А.И. Моделирование процессов пластического деформирования [Текст] / А.И. Ковальчук // Матер. II Всеросс. науч.-технич. конф. «Россия молодая: передовые технологии в промышленность». Омск: ОмГТУ, 2009. Кн.1. С. 51-55.

12. Ковальчук, А.И. Определение технологических параметров изготовления осесимметричных деталей с коническими участками [Текст]

/ А.И. Ковальчук // Матер. 4-ой Всеросс. науч.-практич. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Развитие транспортного комплекса и строительной инфраструктуры на основе рационального природопользования». Омск: СиБАДИ, 2011. Кн.2. С. 151-154.

13. Ковальчук, А.И. Оптимизация силового режима штамповки выдавливанием в конической матрице [Текст] / А.И. Ковальчук, А.А. Александров, В.В. Евстифеев // Матер. 65-ой Всеросс. науч.-технич. конф., ориентированной на фундаментальные и прикладные исследования. Омск: СиБАДИ, 2011. С. 101-105.

14. Ковальчук, А.И. Расчет кинематических параметров деформации через коническую матрицу [Текст] / А.И. Ковальчук // Научные труды молодых ученых, аспирантов и студентов: материалы Всеросс. науч.-практич. конф., посвящ. дню российской науки. Омск: СиБАДИ, 2012. С. 105-108.

15. Ковальчук, А.И. Определение деформированного состояния заготовки при прямом выдавливании через клиновую матрицу [Текст] / А.И. Ковальчук, В.А. Шамаро // 66-я науч.-практ. конф. «Ориентированные фундаментальные и прикладные исследования – основа модернизации и инновационного развития архитектуру-строительного и дорожно-транспортного комплексов России». Омск: СиБАДИ, 2012. С. 132-135.

16. Александров, А.А. Расчет ресурса пластичности металла при холодном выдавливании полых изделий с коническими стенками [Текст] / А.А. Александров, А.И. Ковальчук, В.В. Евстифеев // 66-я науч.-практ. конф. «Ориентированные фундаментальные и прикладные исследования – основа модернизации и инновационного развития архитектуру-строительного и дорожно-транспортного комплексов России» (с международным участием). Омск: СиБАДИ, 2012. С. 115-118.

17. Ковальчук, А.И. Комбинированное выдавливание полой детали переменного сечения [Текст] / А.И. Ковальчук, А.А. Александров // Материалы науч.-техн. конф. «Природные и интеллектуальные ресурсы Омского региона (ОМСКРЕСУРС 2 - 2012)». Омск: СиБАДИ, 2012. С. 162-164.

18. Ковальчук, А.И. Моделирование холодного комбинированного выдавливания цилиндрической детали с коническими полостями [Текст] / А.И. Ковальчук, В.А. Шамаро // Материалы молодежной науч.-техн. конф. «Информационные технологии в науке и производстве». Омск: ОмГТУ, 2014. С. 89-92.

19. Свидетельство о государственной регистрации программы на ЭВМ «Программа для расчета технологических параметров комбинированного выдавливания биконической втулки» [Текст] / А.И. Ковальчук, А.А. Александров, А.В. Евстифеев, В.В. Евстифеев // М.: ВНИИЦ, 2012. № 2012617355.

20. Свидетельство о государственной регистрации электронного ресурса «Расчет технологических параметров комбинированного выдавливания биконической втулки» [Электронный ресурс] / А.И. Ковальчук, А.А. Александров, А.В. Евстифеев, В.В. Евстифеев // М.: ИНИПИ РАО ОФЭРНиО, 2012. № 18421.