

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

ХОАНГ МАНЬ ЖОЙ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОТРЕЗКИ-ШТАМПОВКИ
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ ПРУТКОВ И
РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ**

Специальность 05.16.05 – «Обработка металлов давлением»

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Лисунец Николай Леонидович

Москва - 2020

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Расширяющееся применение легких сплавов, особенно – алюминиевых определяется современными способами их деформационной обработки как наиболее производительной и ресурсосберегающей. Увеличивается удельный вес алюминиевых деталей в автомобильной промышленности. Динамично развивающиеся отрасли радиоэлектронной и электротехнической промышленности с постоянно растущими требованиями миниатюризации и облегчения конструкций требуют разработки инновационных технологий холодной объемной штамповки.

Существующие на промышленных предприятиях технологии изготовления цилиндрических заготовок осесимметричных полуфабрикатов (конденсаторов, резисторов, предохранителей, аэрозольных баллонов, туб и тубиков) основаны на использовании штучных заготовок, изготовленных, в основном, вырубкой из листового проката, что приводит к образованию значительных (до 30-40%) отходов и необходимости их утилизации. Кроме того, для реализации требуется несколько единиц оснастки – штампов.

Совмещенный процесс отрезки – штамповки реализуется в одном штампе, за одну технологическую операцию отрезкой штучной заготовки от алюминиевого прутка с последующей деформацией осадкой, выдавливанием или их сочетанием. Актуальность его применения заключается в удешевлении технологии, сокращении числа штампов и повышении коэффициента использования металла. Данный процесс является ресурсосберегающим и практически безотходным. Выбор процесса обуславливается чисто экономическими задачами практического использования. При исследовании процесса отрезки – штамповки была разработано экспериментальное устройство и опытно-производственный штамп для изготовления осесимметричных полуфабрикатов, в частности – для контакта предохранителя.

Цель и задачи.

Целью данной работы является исследование процесса отрезки – штамповки

цилиндрических заготовок из алюминиевых прутков и разработка устройства, обеспечивающего безотходное осесимметричных полуфабрикатов за одну операцию .

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ современных способов изготовления цилиндрических заготовок, разработать их конструкторско-технологический классификатор и выполнить классификацию изготавливаемых из них осесимметричных полуфабрикатов;
2. Для изготовления цилиндрических заготовок и осесимметричных полуфабрикатов из алюминиевых прутков выбрать наиболее эффективный технологический процесс, обеспечивающий значительное повышение производительности, снижение числа единиц штамповой оснастки и кузнечно-прессового оборудования;
3. На основе метода верхней оценки и метода конечных элементов установить напряжённо - деформированное состояния отрезанной заготовки в процессе её штамповки осадкой и выдавливанием, что позволит определить взаимосвязи энергосиловых и геометрических параметров исследуемого процесса для реализации на кузнечно-штамповочном оборудовании;
4. Выявить в экспериментальных исследованиях влияние на силу и безразмерное давление возможного различного соотношения размеров и формы поперечного сечения заготовки (круг, квадрат, полоса);
5. Определить взаимосвязи геометрических и кинематических параметров штамповки контакта, позволяющие исключить возможность образования дефектов в виде утяжины;
6. Разработать научно - обоснованную методику расчёта технологических параметров процесса отрезки-штамповки для изготовления цилиндрических заготовок и осесимметричных полуфабрикатов из алюминиевых прутков;
7. Для подтверждения эффективности исследуемого процесса разработать и опробовать в лабораторных условиях устройство для изготовления детали «контакт предохранителя».

Степень разработанности проблемы. Развитие технологии холодной объемной штамповки протекает, в основном, экспериментальным путем. Основные теоретические подходы изготовления изделий холодной объемной штамповкой разработаны в 70-х годах прошлого века А.З.Журавлевым, А.Г.Овчинниковым, В.А.Головиным, Ю.А.Алюшиным, И.С.Алиевым. Теоретические основы анализа операций холодной объемной штамповки заложены в работах Л.Г.Степанского, Ф.И. Антонюка, А.М.Дмитриева, А.Я.Воронцова, в том числе – выявлению причин образования дефектов. На основании экспериментальных исследований существенный вклад в развитие теории разделительных процессов внес С.С.Соловцов.

В настоящее время развивается теория совмещенных процессов -штамповки (прокатка – разделение, редуцирование – отрезка, разрезка – высадка). Однако, отсутствует теоретический анализ и практические рекомендации для реализации совмещенного процесса отрезка – штамповка осадкой, выдавливанием или их сочетанием. При обзоре современного состояния вопроса замечено, что работы касаются, в основном, традиционных способов изготовления осесимметричных полуфабрикатов отрезкой на станках со значительными отходами в виде стружки или вырубкой из листового проката с низким коэффициентом использования металла.

Новая ресурсосберегающая технология изготовления осесимметричных полуфабрикатов совмещенным процессом отрезки с последующей штамповкой – находится в стадии экспериментальной разработки. Публикации по данной проблеме ограничены небольшим числом авторов, среди которых С.С.Соловцов, В. Б. Чижик-Полейко, Н. Л. Лисунец.

Актуальным является комплексное исследование процессов изготовления осесимметричных полуфабрикатов из алюминиевых прутков и разработка устройства для его осуществления, что и отражено в данной диссертационной работе.

Методология и методы исследования. Для решения задач исследования применялись методология и методы имитационного, а именно физического,

математического и компьютерного моделирования, основывающиеся на основных законах теории обработки металлов давлением, в том числе – метода верхней оценки, и современных вычислительных конечно-элементных систем, в частности *Q-Form-3D* и *Deform-3D*. При проведении физического моделирования использовалась методология соответствия модельного материала реальному (АД1).

Степень достоверности и апробация результатов обеспечивается:

1. Использованием современных методов имитационного моделирования, а также - лицензионных программных продуктов.
2. Удовлетворительной сходимостью результатов экспериментальных исследований с теоретическими положениями.
3. Успешной апробацией исследованного процесса и разработанного устройства в учебном процессе.
4. Текст диссертации и автореферата проверен на отсутствие плагиата с помощью программы "Антиплагиат" (<http://antiplagiat.ru>).

Практическая значимость работы.

1. Доказана возможность изготовления осесимметричных полуфабрикатов из алюминиевых прутков отрезкой и штамповкой за одну технологическую операцию в одном штампе.
2. Получены изделия «контакт предохранителя» процессом отрезки-штамповки.
3. Разработано устройство для безотходного изготовления из алюминиевых прутков изделия «контакт предохранителя» отрезкой – штамповкой.
4. Результаты исследований внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО НИТУ «МИСиС» и используются при чтении курса лекций по дисциплинам «Деформационная обработка легких сплавов» и «Технология конструкционных материалов».

Научная новизна.

Новый технологический процесс - отрезка с последующей штамповкой – находится в стадии экспериментальных исследований. Выполненная работа является одним из немногих по использованию совмещенного процесса в

технологии изготовления осесимметричных полуфабрикатов из алюминиевых прутков холодной объемной штамповкой, в процессе которой получены новые результаты:

- С использованием классических подходов прикладной теории пластичности, на основе энергетических методов построена модель деформирования заготовки выдавливанием в щелевой паз, которая позволяет прогнозировать образование дефекта – утяжины при определенных соотношениях размеров заготовки и паза;
- Экспериментально доказано, что при варьировании соотношения размеров заготовки и паза возможно предотвращение образования утяжины;
- Решена задача определения напряженно-деформированного состояния при разделительном переходе, а также в процессе штамповки осадкой и выдавливанием;
- Научно - обоснованная методика проектирования процессов изготовления осесимметричных полуфабрикатов из алюминиевых прутков отрезкой – штамповкой

Положения, выносимые на защиту:

- Конструкторско-технологический классификатор цилиндрических заготовок из алюминиевых прутков и классификация осесимметричных полуфабрикатов, изготавливаемых совмещенным процессом отрезки-штамповки;
- Основные взаимосвязи технологических и силовых параметров цилиндрических заготовок и осесимметричных полуфабрикатов после штамповки осадкой и выдавливанием;
- Аналитические зависимости высоты очага пластической деформации при выдавливании ножевой части контакта от соотношения геометрических размеров детали и условий трения;
- Методика проектирования процесса изготовления осесимметричных полуфабрикатов отрезкой от алюминиевых прутков и последующей закрытой штамповкой.

Апробация работы. Результаты работы представлены и обсуждены на следующих отечественных и международных форумах: XIII Международной

конгресс «Кузнец-2017», Рязань, 2017; XI Международный конгресс прокатчиков, Магнитогорск, 2017; XIV Международнордный конгресс «Кузнец-2019», Рязань, 2019; XII Международный конгресс прокатчиков, Магнитогорск, 2019, XX Международная научно-техническая конференция «АКТ». Воронеж, 2019.

Публикации.

Основное содержание диссертации отражено в 14 печатных работах, из них – 5 статей в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из **66** наименований отечественных и зарубежных авторов, и Приложения. Диссертация изложена на 98 страницах и включает 58 рисунков, 10 таблиц и 3 Приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности темы диссертации, поставлена цель работы, обозначена научная новизна и практическая значимость.

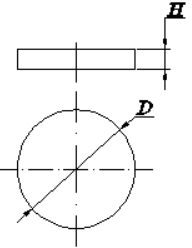
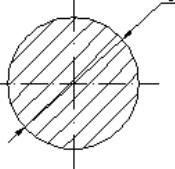
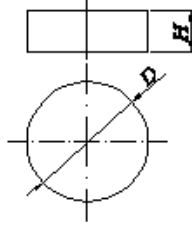
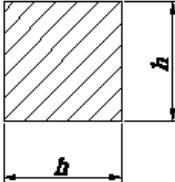
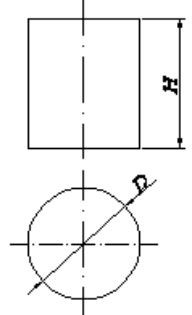
В первой главе выполнены анализ состояния разработок в области технологий производства цилиндрических заготовок и постановка задач исследования. Выявлены объект исследования и области применения цилиндрических заготовок для изготовления осесимметричных полуфабрикатов из алюминиевых прутков, в том числе – традиционными технологиями отрезкой от сортового проката на металлорежущих станках, в штампах на прессах и ножницах, а также вырубкой из листового проката. Приведен разработанный конструкторско-технологический классификатор цилиндрических заготовок (таблица 1), позволяющий по форме сечения исходного профиля, их относительным и абсолютным размерам выбрать эффективный способ изготовления.

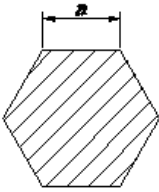
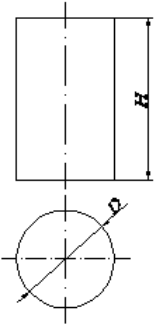
Выделен предмет исследования – ножевые плавкие предохранители и базовая технология их изготовления из двух частей – вырубкой основания и ножа из листового проката с последующей сборкой расчеканкой избыточного объема

металла. Представлена маршрутная технология, определен низкий коэффициент использования металла и выявлена необходимость использования двух единиц штамповой оснастки и прессов.

Рассмотрены возможности применения холодной объемной штамповки (ХОШ) – отрезки, осадки и выдавливания для изготовления осесимметричного полуфабриката детали «контакт предохранителя» за одну технологическую

Таблица 1 - Конструкторско-технологический классификатор заготовок

По форме сечения исходного профиля	По относительной высоте цилиндрических заготовок, $\bar{H}=H/D$	По абсолютным Размерам, (мм)	По эффективному способу изготовления
Полоса 		Тонкие $0,01 < \bar{H} < 0,1$	Мелкие $10 < D < 20$ Вырубкой из листового проката
Круг 		Короткие $0,1 < \bar{H} < 1$	Средние $20 < D < 30$ Отрезкой в штампах с последующей осадкой
Квадрат 		Компактные $1 < \bar{H} < 2,5$	Большие $30 < D < 40$ Отрезкой в штампах и на ножницах

Шестигранник 		Длинные $2,5 < \bar{H}$	Крупные $40 < D < 50$	Отрезкой на станках и пилах
---	---	----------------------------	--------------------------	--------------------------------------

операцию совмещенным процессом отрезки-штамповки в одном штампе путем последовательного выполнения поперечной осадки отрезанной заготовки с последующим выдавливанием ножевой части.

Выполнен анализ современных методов исследования процессов ОМД, таких как: инженерный метод, экспериментально-аналитический метод, энергетический метод прикладной теории пластичности (метод верхней оценки), метод математического планирования экспериментов и регрессионного анализа, метод конечных элементов. Сделаны выводы по первой главе и поставлены задачи исследования.

Во второй главе выполнены теоретические исследования операций ХОШ – закрытой поперечной осадки в цилиндрической и в прямоугольной (квадратной) матрице, а также прямого выдавливания в щелевой паз.

Экспериментальные и теоретические исследования поперечной осадки заготовки в цилиндрической матрице выполнены на основе результатов, полученных в работе [3]. Для теоретического анализа силового режима закрытой осадки использован метод верхней оценки (МВО). В результате расчетов МВО были получены выражения для силы деформирования и безразмерного давления в зависимости от параметра незаполнения – сегментной фаски с размерами $a \times \delta$.

Традиционно для определения давления поперечной осадки заготовки в квадратной матрице использовались выражения, полученные инженерным методом Л. Прандтля, Г.Я. Гуна а также рассчитанные А. З. Журавлевым методом линий скольжения, либо из выражения, предложенные Ф.И.Антонюком

на основе расчетов МВО. Исследования А.Л. Воронцова показали, что высота очага пластической деформации зависит от величины радиусов в углах закрытого штампа, поэтому во всех выражениях давление является функцией радиуса.

Наиболее точные результаты по определению давления при закрытой поперечной осадке в цилиндрической и квадратной матрице дают современные расчетные методы, основанные на методе конечных элементов с использованием вычислительных систем типа *Q-FORM* и *DEFORM*, приведенные ниже, в Главе 3.

Для решения задачи теоретического определения силовых параметров выдавливания в щелевой паз и условий образования утяжины использован энергетический метод прикладной теории пластичности, в котором расчет нагрузок осуществляется по равенству мощностей всех внешних и внутренних сил на кинематически возможных скоростях.

$$W_p = W_i + W_\tau,$$

где W_p - мощность нагрузок деформирования;

W_i - мощность внутренних сил;

W_τ - мощность сил контактного трения.

Переходя к физическим величинам, входящим в уравнение баланса мощностей, имеем:

$$W_p = P \cdot V = q \cdot V \cdot S_\partial,$$

где P - сила деформирования . кН

V_0 - скорость перемещения инструмента, мм/с

S_∂ - текущая поверхность деформирования, мм²

q – давление, МПа

$$W_\Delta = \sum k \cdot f_{ij} \cdot V_{ij},$$

где k – постоянная пластичности, $k = 0,5 \sigma_s$

σ_s – напряжение течения, МПа

f_{ij} – площадь поверхностей разрыва скоростей, мм².

$$W_\tau = \sum M \cdot \sigma_s f_{ik} \cdot V_{ik},$$

где f_{ik} - площадь контакта между инструментом и материалом, мм^2 .

Мощность внутренних сил W_i , вычисляемая на основе кинематически возможных полей скоростей, равна мощности, развиваемой на поверхностях разрыва f_{ij} определяется по формуле:

$$W_i = k \int V_{ij} df_{ij},$$

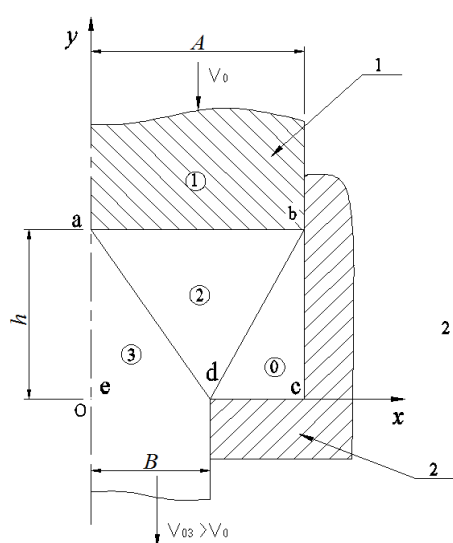
где V_{ij} – скорость на поверхности разрыва, мм/с

f_{ij} – площадь поверхностей разрыва, мм^2 .

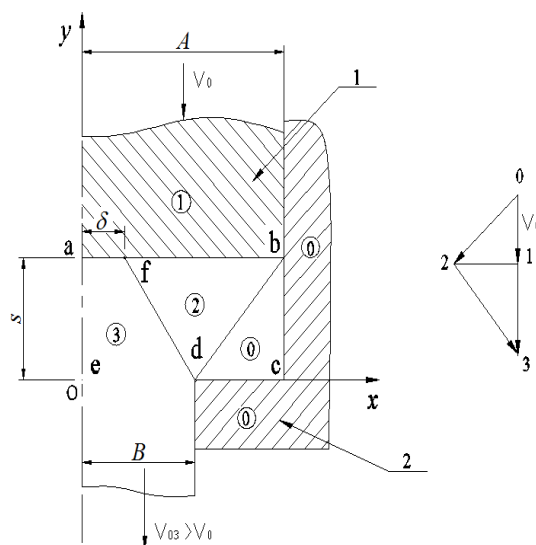
Из условия равенства мощности внешних и внутренних сил находим выражение для безразмерного давления осадки образца шириной l и высотой b с выдавливанием в условиях плоской деформации:

$$q/\sigma_s = (\sum l_{ij} V_{ij} + \sum 2M l_{ik} V_{ik}) / 2V_0 b.$$

Для выявления условий образования утяжины при осадке заготовки с последующим выдавливанием в щелевой паз рассмотрены три стадии процесса формоизменения на основе анализа блочной модели формоизменения и построения годографа КВПС: установившейся стадии (рисунок 1,а), неустановившейся стадии без трения (рисунок 1,б) и образования утяжины с трением (рисунок 2). Длину отрезков определим через известные координаты их концов (таблица 2).



а)



б)

Рисунок 1 - Схемы моделей из жестких блоков и годографы скоростей при выдавливании без учета трения (а - стационарная стадия, б - неустойчивая стадия)

Таблица 2 – Координаты точек к расчетной схеме блочной модели выдавливания

Координаты	a	b	c	d	e
x	0	A	A	B	0
y	h	h	0	0	0

На первой стадии из годографа скоростей (рисунок 1,а) и подобия треугольников через координаты определяем длины отрезков $l_{1,2}$, $l_{2,0}$, $l_{2,3}$ и соответствующие скорости V_0 , V_{01} , $V_{0,2}$, $V_{1,2}$, $V_{2,3}$. После замены отрезков на размеры, указанные на рисунке имеем:

$$V_{1,2} = V_0 (A-B)/h, \quad V_{2,3} = V_0 (A-B)/B, \quad V_{0,2} = V_0 [1 + (A-B)/h^2].$$

После подстановки найденных величин в уравнение для безразмерного давления получим:

$$q/\sigma_s = (2AB - 2B^2 + h^2)/2hB = (A-B)/h + h/2B \quad (1)$$

Исследуя функцию (1) на экстремум $\partial q/\partial h = 0$, находим минимальное значение безразмерного давления:

$$(q/\sigma_s)_{\min} = \sqrt{(2\varepsilon/1 - \varepsilon)},$$

$$\text{где } \varepsilon - \text{степень вытяжки,} \quad \varepsilon = 1 - B/A$$

Для определения причины образования утяжины представим эту стадию в виде схемы. Если $h > S$, формоизменение идет без образования утяжины (стадия стационарная, рисунок 1,а). Если $h < S$, образуется утяжина. Поле скоростей (трение отсутствует) представлено на рисунке 1,б. Пусть размер утяжины равен δ . Если $\delta = 0$, то утяжины нет. При $\delta > 0$ блок 3 течет быстрее и отрывается от пуансона (блок 1, скорость V_{01}) и течет со скоростью $V_{03} > V_{01}$. Это легко получается из закона постоянства объема:

$$V_{01}(A - \delta) + V_{03}\delta = V_{03} \cdot$$

$$\text{Тогда} \quad V_{03} = V_{01}(A - \delta) / (B - \delta).$$

Следовательно, образуется утяжина.

Определим высоту очага пластической деформации S для образования утяжины δ . Запишем уравнение для безразмерного давления q/σ_s :

$$q/\sigma_s = \frac{1}{2A} [(A-B)(A-\delta) + (A-B)^2 + S^2 + \frac{A-B}{A-\delta} ((B-\delta)^2 + S^2)]$$

Уравнение принимает минимальное значение при условии

$$S^2 = 2(B - \delta)^2$$

При $S=B\sqrt{2}$ минимуму безразмерного давления соответствует поле скоростей с образованием утяжины. Применительно к технологии изготовления детали «контакт предохранителя», а именно – выдавливания ножевой части толщиной $2B = 4\text{мм}$ предельная высота очага пластической деформации S без образования утяжины равна:

$$S = 2\sqrt{2} \approx 2,82 \text{ мм.}$$

На чертеже изделия «контакт предохранителя» толщина основания $h = 3\text{ мм}$. Таким образом, для данных размеров пуансон не касается очага деформации, и утяжина не образуется. Следовательно, при выдавливании ножевой части контакта в щелевой паз шириной $2B$ из заготовки с длиной $2A$ и коэффициентом вытяжки $\varepsilon = 0,88$ очаг деформации распространяется на высоту $S = B\sqrt{2}$, и для предотвращения образования дефекта утяжины толщина основания h должна быть не менее этой величины, то есть $h \geq B$.

С учетом деформационного разогрева при выдавливании до температур горячей деформации (как показало дальнейшее моделирование) и максимального контактного трения ($\mu = 0,5$) между поверхностью инструмента и выдавливаемой ножевой частью контакта поле скоростей представлено на рисунке 2.

Для этого поля скоростей утяжина образуется, если $\delta > 0$ при минимальном значении безразмерного давления q/σ_s :

$$q/\sigma_s = \frac{1}{2AV_{01}} (\sum l_{ij} V_{ij} + \sum 2\mu l_{ik} V_{ik}) \quad (2)$$

Функция (2) принимает минимальное значение при толщине основания контакта S , равной:

$$S < \frac{2(1-\varepsilon)}{\sqrt{\varepsilon}} A$$

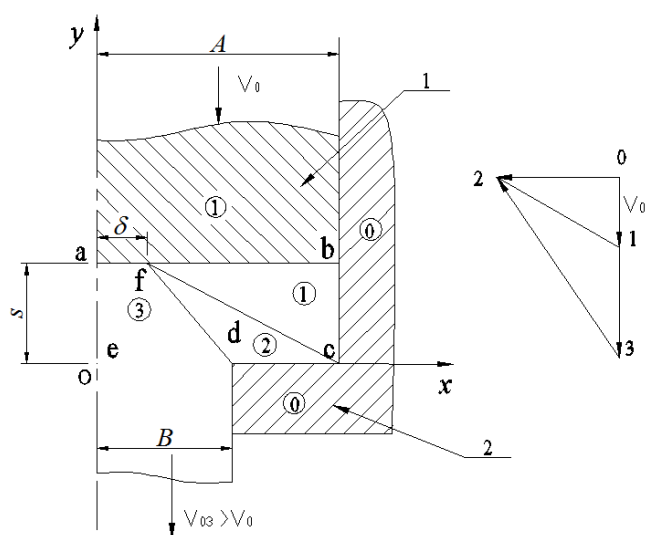


Рисунок 2 – Схема модели из жестких блоков и годографы скоростей при выдавливании с учетом максимального трения

Подставляя геометрические размеры с чертежа контакта и степень вытяжки в это выражение, получим $S < 3,67$. Таким образом, в заключительной стадии выдавливания при максимальном трении пуансон находится в зоне очага пластической деформации с высокой вероятностью образования утяжины, что найдет подтверждение при физическом и компьютерном моделировании, описанном в главе 3.

В завершении сделаны выводы по второй главе.

Третья глава посвящена экспериментальным исследованиям процесса отрезки – штамповки в цилиндрической матрице. На первом этапе выполнялось исследование влияния формы сечения и соотношения размеров проката на силовые и геометрические параметры осадки заготовок.

Форма поперечного сечения (круг, квадрат, полоса) и соотношение геометрических размеров исходных заготовок существенно влияют на условия деформирования в закрытой цилиндрической матрице при осадке. Это связано с особенностями формоизменения заготовок, условиями контактного трения и различным напряженно-деформированным состоянием (НДС) в процессе осадки и в ее завершающей стадии.

Для исследования влияния формы сечения и размеров исходных заготовок на НДС заготовки в процессе осадки в цилиндрической матрице диаметром 25 мм выбраны заготовки, параметры которых приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Размеры и форма сечения заготовок

Форма сечения	Размер сечения, мм	Длина заготовки, мм	Относительная длина	Относительная высота
Круг	11	22	2	0,17
	17	17	1	0,4
Квадрат	11 x 11	22	2	0,01
	17 x 17	17	1	0,51
Полоса	11 x 22	22	2	0,01
	22 x 11	11	0,5	0,43

Выбор типоразмеров данных заготовок обусловлен тем, формоизменение длинных, компактных, коротких и тонких заготовок происходит по различным закономерностям. Было установлено, что давление поперечной осадки зависит от величины параметра незаполнения (относительной сегментной фаски δ/R) и формы поперечного сечения исходной заготовки (рисунок 3).

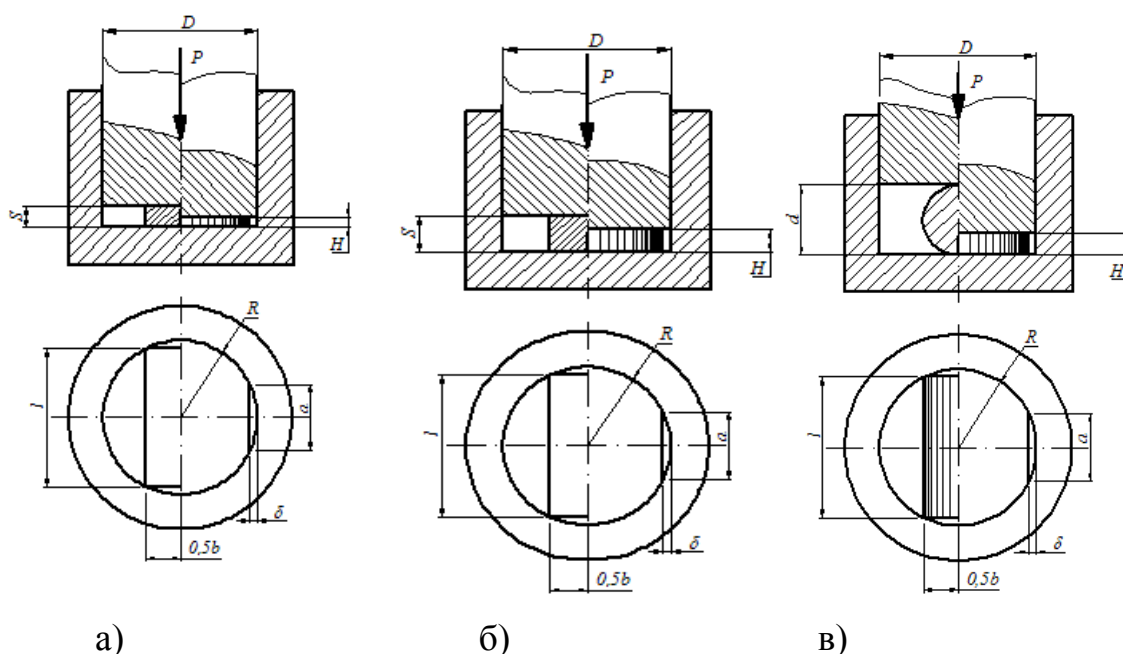


Рисунок 3 - Схемы закрытой поперечной осадки в цилиндрической матрице заготовок из полосового (а), квадратного (б) и круглого (в) в проката в исходном положении (слева) и в завершающей стадии (справа)

На основе обработки результатов физического моделирования, приведенных в работах [1-4], математическая модель для давления поперечной осадки представлена в виде уравнения регрессии:

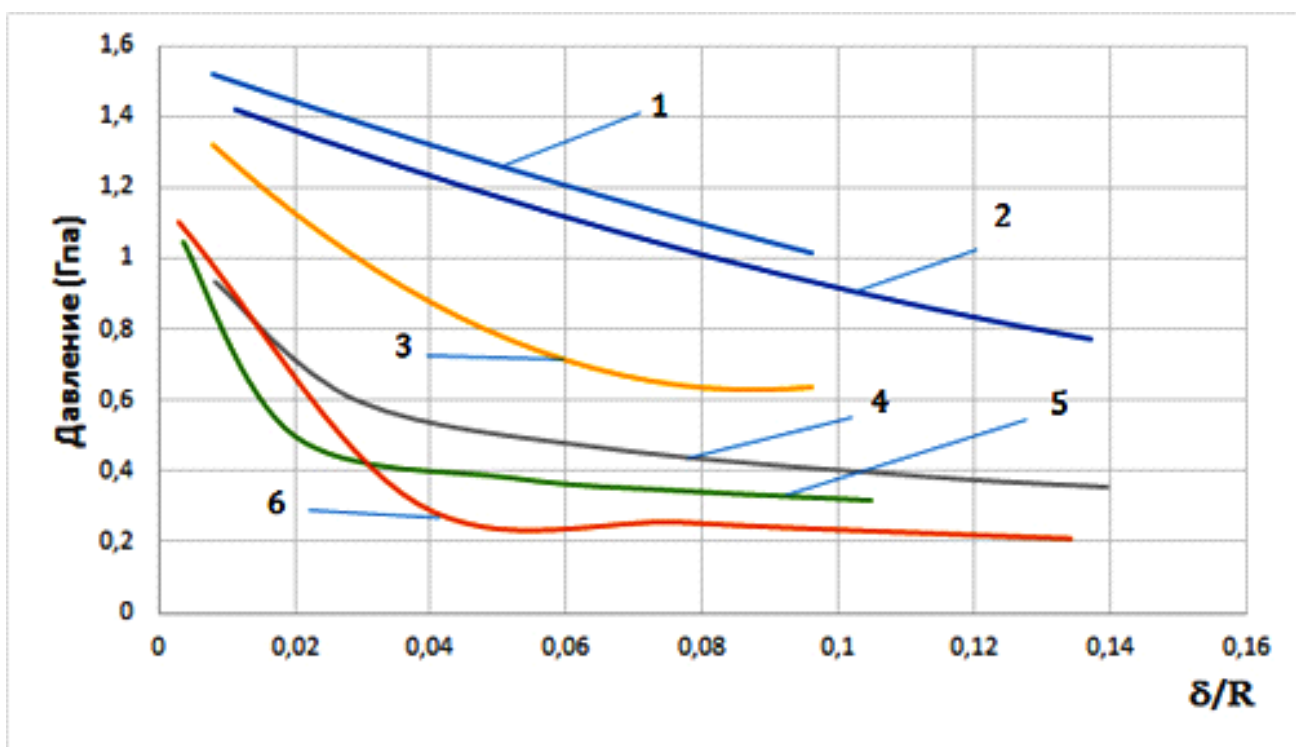
$$q, [\text{ГПа}] = 1,728 - 4,813 \frac{\delta}{R} - 1,348 \frac{H}{R} - 1,656 \frac{\delta H}{R^2} - 4,463 \frac{\delta^2}{R^2} + 0,213 \frac{H^2}{R^2} + 12 \frac{\delta H^2}{R^3} + 109,5 \frac{\delta^2 H}{R^3}$$

где δ – величина сегментной фаски, мм;

R – радиус матрицы, мм;

H – высота осажженной заготовки, мм.

В результате были получены зависимости давления поперечной осадки q от параметров относительной высоты H/D и относительной фаски δ/R (рисунок 4).



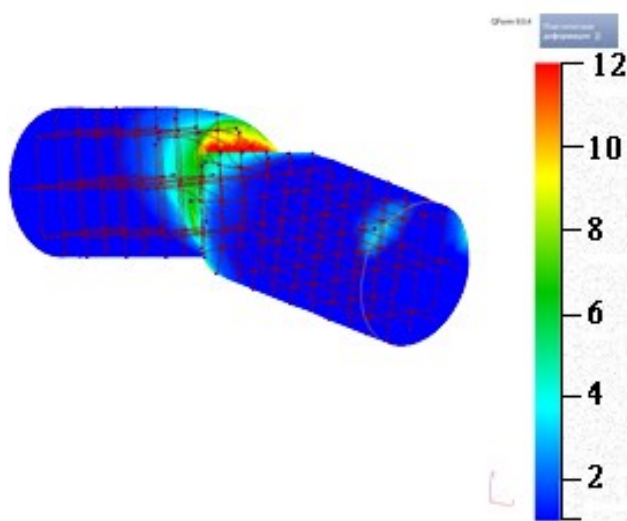
1, 2, 3 – по уравнению регрессии: 1-($H/D=0,06$); 2-($H/D=0,08$); 3-($H/D=0,1$)
 4, 5, 6 – по результатам моделирования в *DEFORM*: 4-($H/D=0,06$); 5-($H/D=0,08$);
 6-($H/D=0,1$)

Рисунок 4 – Взаимосвязи давления осадки и относительной сегментной фаски

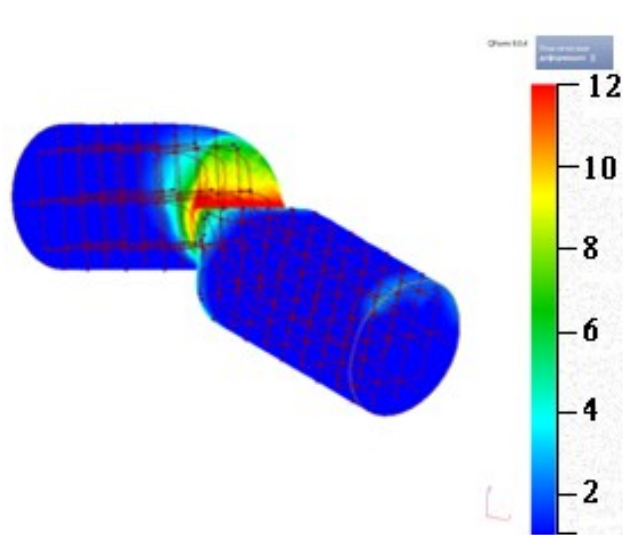
На следующем этапе выполнялось компьютерное моделирование процесса отрезки заготовок от прутков плоским пуансоном. На рисунке 5 представлены поля распределения интенсивности напряжений.

На рисунке 5,б выявлена локализация очага деформации с напряжениями, соответствующими стадии разрушения при отрезке.

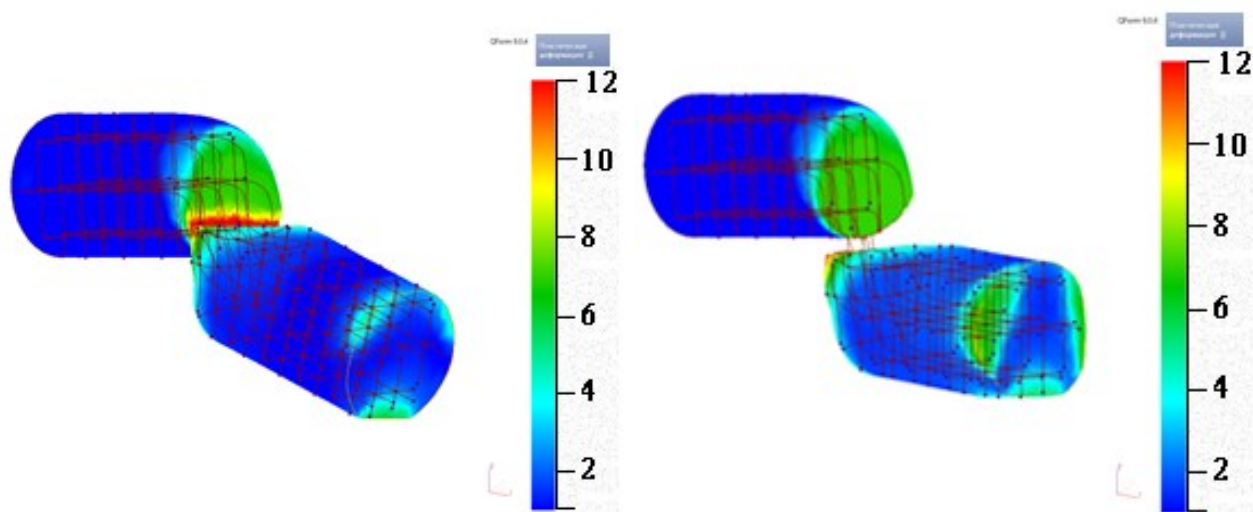
Как следует из выводов главы 2, минимальные давления и, соответственно, силы штамповки возникают при использовании проката круглого сечения, а максимально нагруженным является деформирование полосы. Поэтому, исследовалась штамповка прутковых заготовок, отрезанных плоским пуансоном.



а)



б)



в)

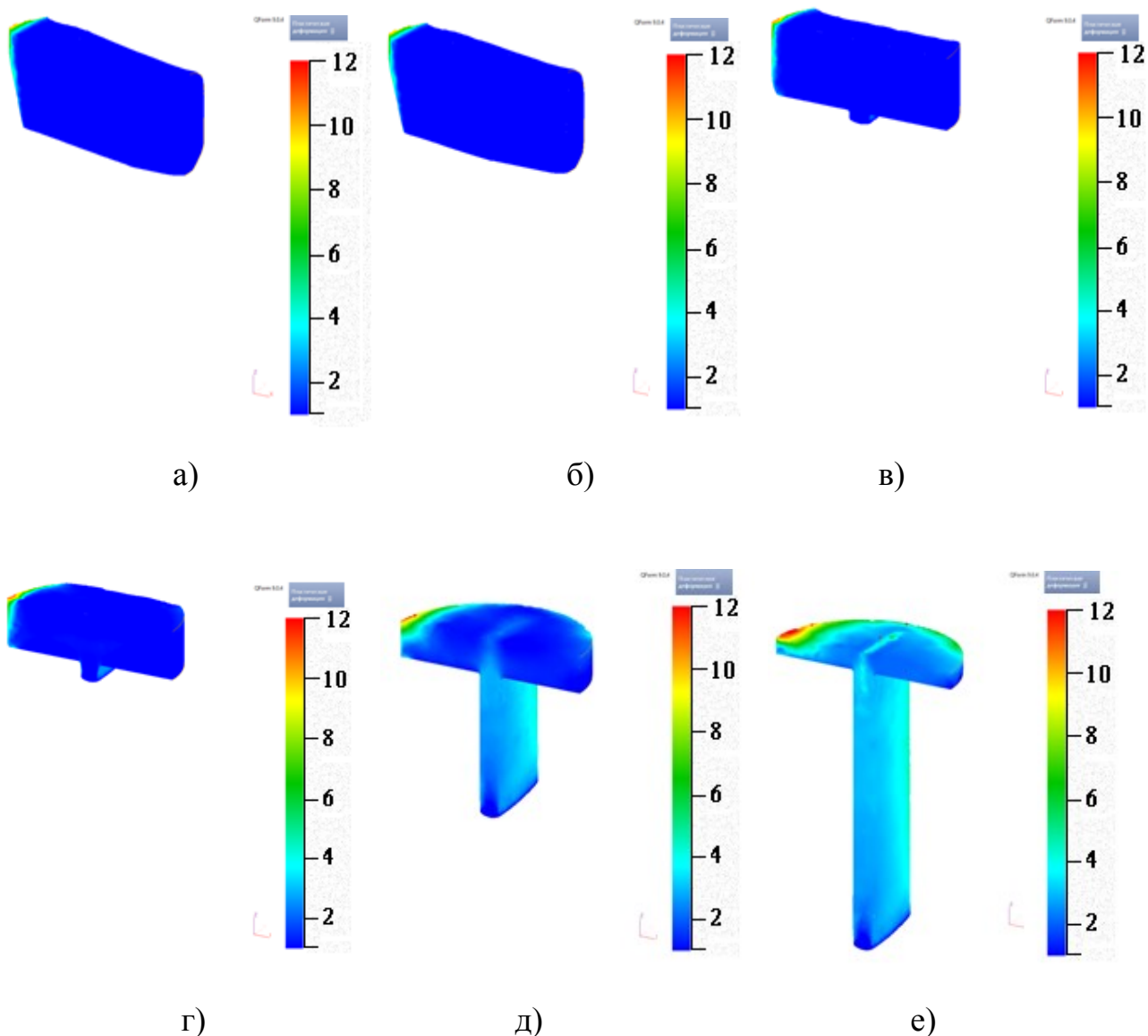
г)

а) – внедрение плоского пуансона; б) – при максимальной силе отрезки; в) – на стадии пластического сдвига; г) – завершение отрезки

Рисунок 5 – Поля распределения интенсивностей деформаций на разных стадиях отрезки и в начале штамповки

На рисунке 6 представлены результаты расчетов величины накопленной деформации на разных стадиях штамповки. Из рисунка видно, что у левого торца заготовки, отрезанного от прутка (а) с накопленной деформацией 3-4, на завершающей стадии выдавливания она достигает значения 12, но разрушения не происходит.

В завершающей стадии выдавливания ножевой части наблюдается значительная неравномерность деформации. Так, в зоне перехода основания в ножевую часть накопленная деформация достигает 4 – 7, в то время как в основном объеме основания она не превышает 2 – 3.



а) – после отрезки; б) – начало осадки; в) – начало выдавливания; г) – завершение осадки и выдавливание; д) – стационарная стадия выдавливания; е) – завершение выдавливания и зарождение утяжины

Рисунок 6 – Изменение величины накопленной пластической деформации в процессе штамповки полуфабриката контакта из прутковой заготовки

Для выбора прессового оборудования выполнен расчет силовых параметров процесса отрезки – штамповки в конечно-элементных программах *Q-FORM-3D* и *DEFORM-3D*. Зависимость силы в процессе отрезки – штамповки контакта от хода ползуна пресса представлена на рисунке 7.

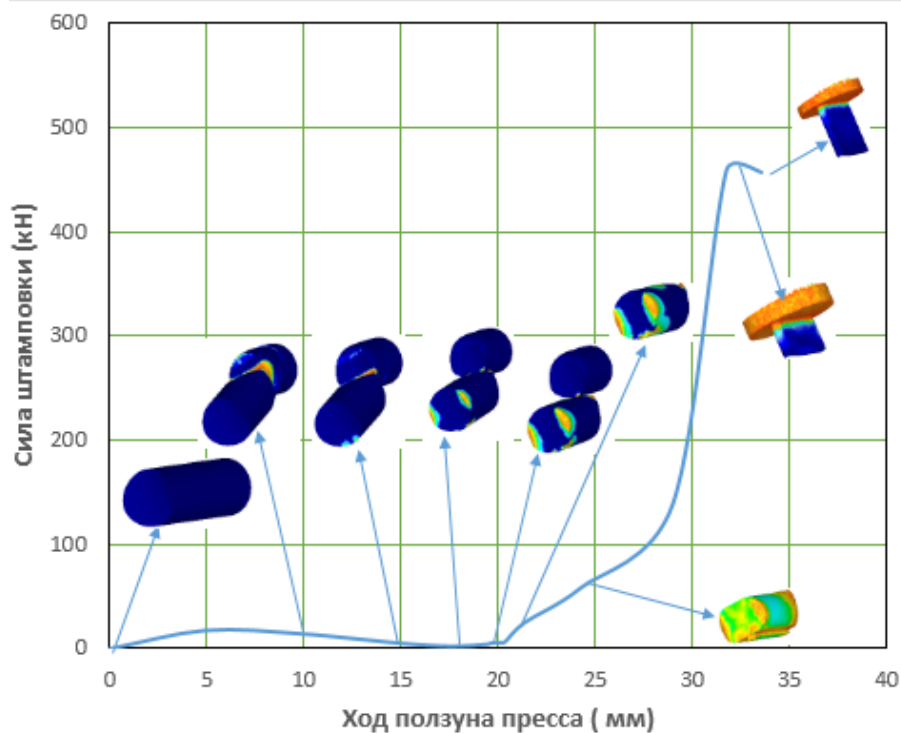


Рисунок 7 - Зависимость силы от перемещения при отрезке – штамповке полуфабриката контакта

Стадии формоизменения при физическом моделировании штамповки контакта приведены на рисунке 8.



Рисунок 8 – Стадии формоизменения штамповки осадкой и выдавливанием отрезанной прутковой заготовки

Возможность образования дефекта в виде утяжины, выявленная в теоретическом анализе выше (глава 2), подтверждена экспериментально. Зарождение, развитие и разрушение утяжины были установлены в ходе

экспериментов с полосовой заготовкой при отсутствии смазки и максимальном трении (рисунок 9).



а)

б)

в)

Рисунок 9 – Общий вид основания отштампованных контактов с зарождением (а), развитием (б) и разрушением (в) дефекта утяжина

На основании экспериментов был сделан вывод о нецелесообразности использования полосовой заготовки для изготовления полуфабриката контакта.

В четвертой главе представлены практические рекомендации по использованию ресурсосберегающего процесса отрезки – штамповки в промышленности, а именно: разработана методики проектирования технологического процесса отрезки – штамповки цилиндрических заготовок из алюминиевых прутков и разработана конструкция штампа для изготовления осесимметричного полуфабриката контакта силового предохранителя за одну операцию.

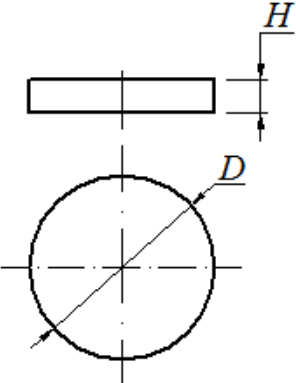
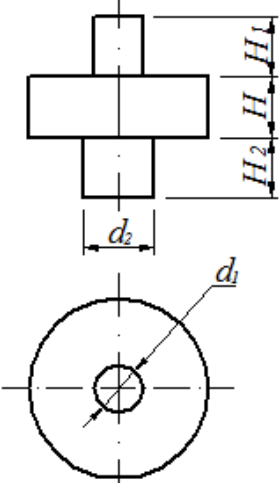
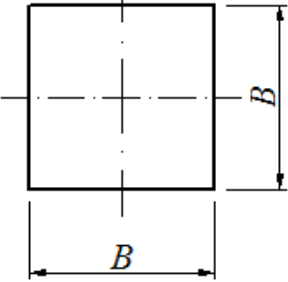
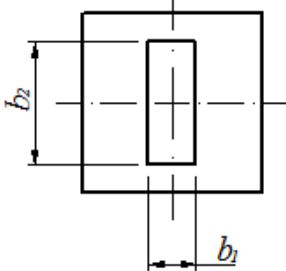
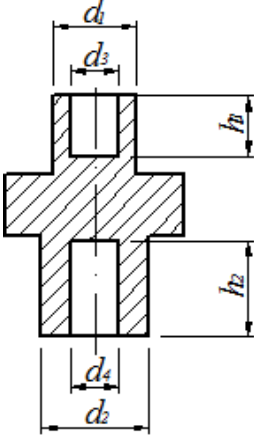
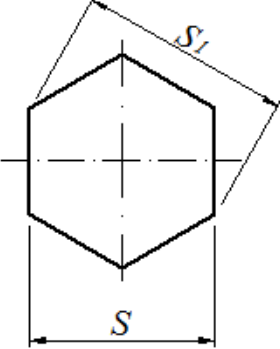
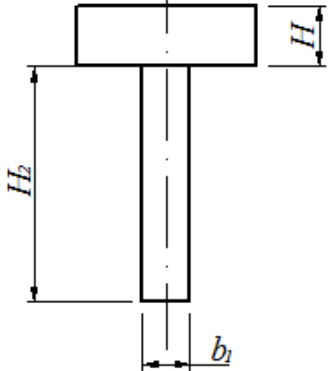
При разработке методики проектирования процесса отрезки – штамповки цилиндрических заготовок из алюминиевых прутков использована созданная автором классификация осажённых заготовок, отрезанных от прутков, включающая также геометрические параметры осесимметричных полуфабрикатов, изготовленных отрезкой – штамповкой (таблица 4).

Разработанная методика включает:

1. Ввод исходных данных:

- Геометрических параметры ($D, H, B, S, S_1, d_1 \dots d_n, H_1 \dots H_n, h_1 \dots h_n$)
- Характеристики материала и его механические свойства ($\sigma_s, \sigma_b, \Psi, \delta$);

Таблица 4 - Классификация осаженных заготовок, отрезанных от прутков и геометрические параметры осесимметричных полуфабрикатов, изготовленных отрезкой - штамповкой

Вид в плане	Геометрия детали		
	Плоские	С выступами	С выступами и отверстиями
Круглые			
Квадратные			
Шестигранные			

2. Определение объема заготовки:

$$V_{заг} = f(D, H, B, S, S_1, d_1 \dots d_n, H_1 \dots H_n, h_1 \dots h_n).$$

3. Определение диаметра исходного прутка (из условия несжимаемости):

$$d = f(D, H, B, S)$$

4. Расчет силовых параметров $q, q/\sigma_s, P$ (по формулам, полученным в главе 2)

5. Анализ напряженно-деформированного состояния: полей перемещений, скоростей, деформаций, напряжений, повреждаемости
6. Вывод о возможности изготовления осесимметричной заготовки из сортового проката.

На основании анализа результатов теоретических расчетов (глава 2) и экспериментальных исследований (глава 3) была разработана конструкция опытно-промышленного штампа, представленного на рисунке 10.

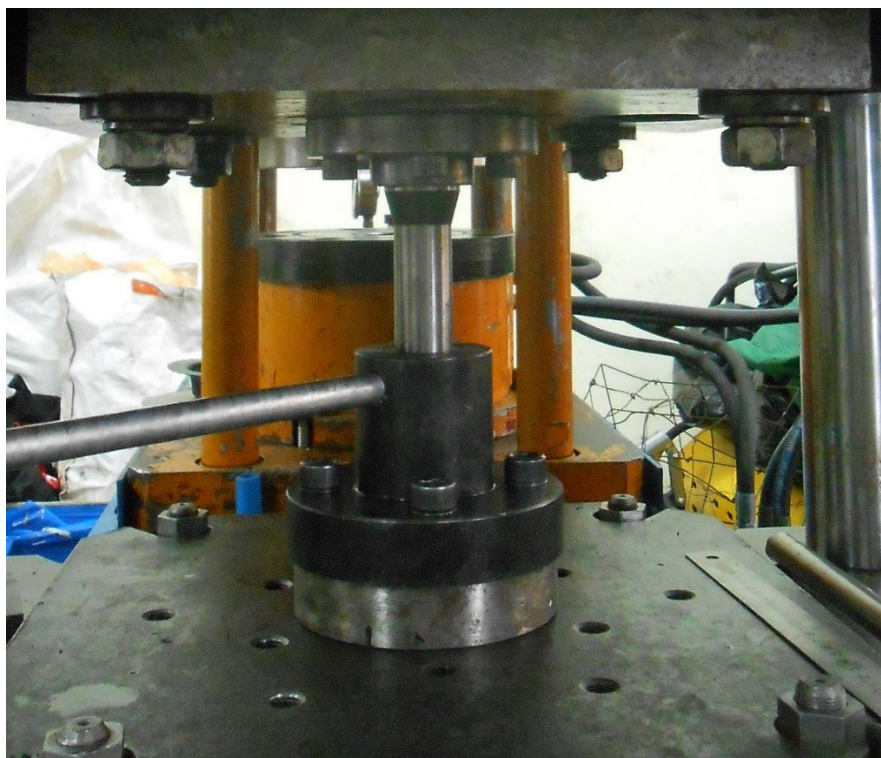


Рисунок 10 – Общий вид штампа для реализации совмещенного процесса отрезки-штамповки, установленный на прессе силой 1 Мн.

Штамп устанавливается на прессе с нижним приводом (выталкивателем или пружинным буфером) и работает следующим образом. В верхнем положении ползуна прессы пуансон выведен из матрицы. Осуществляется подача прутка через радиальное отверстие (неподвижный нож) до упора в стенку цилиндрической матрицы. При ходе ползуна прессы вниз последовательно осуществляется отрезка заготовки пуансоном и ее перемещение до контакта с щелевой вставкой. Происходит закрытая поперечная осадка заготовки в цилиндрической матрице до момента, когда сила осадки меньше силы выдавливания. С увеличением силы осадки начинается выдавливание ножевой

части в щелевой паз до достижения требуемых размеров полуфабриката, определяемого настройкой пресса. После окончания рабочего хода пресса пуансон вместе с ползуном перемещается вверх в исходное положение, а выдавленный полуфабрикат контакта удаляется выталкивателем на зеркало матрицы и убирается из рабочей зоны пресса. В дальнейшем цикл повторяется.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ разработок в области технологии холодной штамповки осесимметричных полуфабрикатов из алюминиевого проката показал актуальность выполненных исследований и позволил разработать конструкторско-технологический классификатор цилиндрических заготовок и выполнить классификацию изготавливаемых из них осесимметричных полуфабрикатов;
2. Для изготовления цилиндрических заготовок и осесимметричных полуфабрикатов из алюминиевых прутков выбран наиболее эффективный технологический совмещенный процесс - штамповки, осуществляемый в одном штампе за одну технологическую операцию, обеспечивающий значительное повышение производительности (в пять раз), снижение числа единиц штамповой оснастки и кузнечно-прессового оборудования (в три раза);
3. Теоретическое исследование совмещенного процесса отрезки – штамповки, выполненное на основе энергетического метода прикладной теории пластичности и метода конечных элементов позволяет определить кинематическое и напряжённо-деформированное состояния отрезанной заготовки в процессе её штамповки осадкой и выдавливанием что дает возможность определить взаимосвязи энергосиловых и геометрических параметров исследуемого процесса для реализации на кузнечно-штамповочном оборудовании;
4. Полученные общие формулы для определения безразмерного давления и деформирующей силы пригодны для расчётов штамповки цилиндрических заготовок и осесимметричных полуфабрикатов, при произвольном соотношении соотношения размеров и формы поперечного сечения заготовки (круг, квадрат, полоса), а также коэффициентов трения на их поверхностях;

5. Определены взаимосвязи геометрических и кинематических параметров штамповки контакта, позволяющие исключить возможность образования дефектов в виде утяжины. Устойчивость процесса зависит от степени вытяжки ε , высоты очага пластической деформации S и условий контактного трения. При выдавливании ножевой части контакта в щелевой паз шириной $2B$ из заготовки с длиной $2A$ и коэффициентом вытяжки $\varepsilon = 0,88$ очаг деформации распространяется на высоту $S = B$, и для предотвращения образования дефекта утяжины толщина основания h должна быть не менее этой величины.
6. Разработана научно - обоснованная методика расчёта технологических параметров процесса отрезки-штамповки, обеспечивающих изготовление цилиндрических заготовок и осесимметричных полуфабрикатов;
7. Эффективность результатов исследования подтверждена успешным опытно – экспериментальным опробованием безотходного процесса отрезки – штамповки и разработкой устройства для изготовления детали «контакт силового предохранителя», позволившего значительно повысить производительность.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

Статьи в изданиях, входящих в «Перечень периодических изданий, рекомендованных ВАК России для опубликования основных результатов диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук»:

1. Лисунец Н.Л., Хоанг Мань Жой, Деметрашвили И.С. Разработка и исследование процесса изготовления цилиндрических заготовок из сплавов цветных металлов для штамповки на основе моделирования. // Цветные металлы, 2018, №5, с. 82-86. (Scopus, ВАК)
2. Лисунец Н.Л., Хоанг Мань Жой. Исследование процесса осадки в закрытой цилиндрической матрице при производстве заготовок для холодной объемной штамповки. // Заготовительные производства в машиностроении. 2018, т.16. № 6. с. 258-265. (ВАК)

3. Лисунец Н.Л., **Хоанг Мань Жой**. Исследование силового режима закрытой штамповки поперечной осадкой и выдавливанием в прямоугольной матрице. // КШП-ОМД, 2019, №9, с. 8-11. (ВАК)

Статьи в других изданиях:

4. **Хоанг Мань Жой**. Исследование и разработка процесса отрезки – штамповки для изготовления алюминиевых контактов на основе моделирования. // Известия ТулГУ, 2019, выпуск 12, с. 131-135.

5. Лисунец Н.Л., Деметрашвили И.С., **Хоанг Мань Жой**. Разработка и исследование технологии изготовления тонколистовых цилиндрических заготовок для штамповки на основе моделирования. // Вестник МГТУ «СТАНКИН», 2019, № 4, с. 60-64.

6. Лисунец Н.Л., **Хоанг Мань Жой**. Исследование технологических возможностей изготовления из металлопроката цилиндрических заготовок для штамповки на основе моделирования. // Сб. трудов XI Конгресса прокатчиков. Магнитогорск, 2017, т.1, с. 356-360;

7. Лисунец Н.Л., Деметрашвили И.С., **Хоанг Мань Жой**. Совершенствование технологического процесса изготовления тонколистовых заготовок для чеканки и рельефной формовки на основе моделирования. // Сб. научн. Стат. и докладов XIII конгресса «Кузнец-2017», с. 119-126;

8. Лисунец Н.Л., **Хоанг Мань Жой**. Моделирование процесса изготовления коротких цилиндрических заготовок для холодной объемной штамповки закрытой поперечной осадкой. // Сб. научн. Стат. и докладов XIII конгресс «Кузнец-2017 », с. 307 – 310;

9. Лисунец Н.Л., **Хоанг Мань Жой**. Расчеты энергосиловых параметров и формоизменения заготовок при закрытой поперечной осадке на основе физического и математического моделирования. // Сб. трудов XI Конгресса прокатчиков. Магнитогорск, 2017, т.2, с. 407-412;

10. Деметрашвили И.С., **Хоанг Мань Жой**. Совершенствование технологического процесса изготовления тонколистовых заготовок для объемной штамповки на основе моделирования. // Материалы III молодежной научно-практической

конференции. Под редакцией А.Г. Корчунова. 2018. Магнитогорск: МГТУ им. Н. И. Носова, с.106-107;

11. Лисунец Н.Л., **Хоанг Мань Жой**. Разработка технологии изготовления алюминиевых контактов совмещенным процессом отрезки – штамповки на основе моделирования. // Сб. Тр. XII Конгресса прокатчиков (том 1) Сб. статей. Москва: Грин Принт, 2019. – 276, с. 224-228;

12. Лисунец Н.Л., **Хоанг Мань Жой**. Исследование совмещенного процесса отрезки – поперечной осадки - выдавливания для изготовления контактов предохранителей на основе физического и математического моделирования. // Сб. статей и докл. XIV Междунар. Конгресса «Кузнец-2019». Рязань, с. 334-340;

13. Деметрашвили И.С., **Хоанг Мань Жой**, Лисунец Н.Л.. Разработка технологического процесса изготовления тонколистовых заготовок для чеканки и рельефной формовки на основе моделирования. // Труды XX Международной научно-технической конференции «АКТ-2019». Воронеж, 2019, с. 328-334;

14. Лисунец Н.Л., Жигулев Г.П., **Хоанг Мань Жой**, Нгуен Чыонг Ан. Исследование особенностей процесса штамповки контактов предохранителей из алюминиевого проката. // Сб.Тр. XII Конгресса прокатчиков (том 2). Сб. статей. Москва: Грин Принт, 2019, с. 328-337;