

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

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

На правах рукописи

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»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Доцент, кандидат технических наук
Лисунец Николай Леонидович

Москва, 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ РАЗРАБОТОК В ОБЛАСТИ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	11
1.1 Объект исследования.....	11
1.2 Анализ современных процессов изготовления цилиндрических заготовок	12
1.3 Предмет исследования.....	20
1.3.1 Ножевые плавкие предохранители	20
1.3.2 Существующая технология изготовления контакта	23
1.4 Возможности использования операций холодной штамповки для изготовления полуфабриката контакта процессом отрезка – осадка- выдавливание.....	28
1.4.1 Штамповка осадкой.....	28
1.4.2 Штамповка выдавливанием.....	29
1.5 Современные методы исследования процессов ОМД	30
1.5.1 Экспериментально-аналитический метод	30
1.5.2 Инженерный метод	30
1.5.3 Энергетический метод.....	31
1.5.4 Метод верхней оценки.....	31
1.5.5 Метод математического планирования экспериментов	32
1.5.6 Метод конечных элементов	32
Выводы из аналитического обзора.....	33
ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ	36
2.1 Теоретическое исследование процесса осадки в закрытой матрице	36

2.1.1 Силовые и геометрические параметры закрытой поперечной осадки в цилиндрической матрице	38
2.1.2 Силовые и геометрические параметры процесса поперечной осадки в квадратной матрице	39
2.2 Силовые параметры прямого выдавливания ножевой части контакта	42
Выводы по главе 2.....	51
ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОТРЕЗКИ – ШТАМПОВКИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕ	53
3.1 Построение диаграмм истинных напряжений алюминиевого сплава АД1 ..	53
3.2 Исследование влияния формы сечения и соотношения размеров проката на силовые и геометрические параметры штамповки заготовок.....	56
3.3 Исследование влияния параметра незаполнения (сегментной фаски) на давление осадки.....	62
3.4 Исследование влияния относительной высоты осаженных заготовок на величину давления	64
3.5 Имитационное моделирование процесса отрезки – штамповки.....	66
3.5.1 Физическое и компьютерное моделирование способа осадки для последующего выдавливания	70
3.5.2 Компьютерное моделирование процесса отрезки – штамповки.....	72
3.6 Компьютерное моделирование штамповки выдавливанием для изготовления полуфабриката контакта.....	76
Выводы по главе 3:	79
Глава 4. ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ	81
4.1 Методика проектирования процесса изготовления осесимметричных полуфабрикатов отрезкой - штамповкой.....	81

4.2. Разработка конструкции опытно-промышленного штампа	86
Выводы по главе 4:	89
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	90
ПРИЛОЖЕНИЕ А	99
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	100
ПРИЛОЖЕНИЕ В	124

ВВЕДЕНИЕ

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 (ТИ) 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 (ПОШ) 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.

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 ПОШ 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 (КИМ).

Новая ресурсосберегающая ТИ 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.

Цель и задачи

Целью данной работы является исследование ПОШ цилиндрических заготовок из алюминиевых прутков и разработка устройства, обеспечивающих безотходное изготовление осесимметричных полуфабрикатов из алюминиевых прутков за одну операцию в одном штампе.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ современных способов изготовления (СИ) 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, а также сокращение технологических операций;

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 совмещенного ПОШ, обеспечивающих изготовление цилиндрических заготовок и осесимметричных полуфабрикатов из алюминиевых прутков;

7. Провести экспериментальное опробование безотходного ПОШ и разработать устройство для изготовления детали «контакт силового

предохранителя»).

Научная новизна

Новый технологический процесс - отрезка с последующей штамповкой – находится в стадии экспериментальных исследований. Диссертация является одной из немногих современных работ 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;
- Разработана научно - обоснованная методика расчёта технологических параметров совмещенного ПОШ, обеспечивающих безотходное изготовление цилиндрических заготовок и осесимметричных полуфабрикатов из алюминиевых прутков;

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» ПОШ.
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 дисциплине

«Деформационная обработка легких сплавов» и «Технология конструкционных материалов».

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 (ОМД), в том числе – МКЭ, 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, АД31).

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 (ОПД) 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.

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>).

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 124 страницах и включает 58 рисунков, 10 таблиц и 3 Приложений.

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ РАЗРАБОТОК В ОБЛАСТИ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Объект исследования

Цилиндрические заготовки можно разделить на 4 большие группы: длинные - $\bar{H} > 2.5$, компактные - $1 < \bar{H} < 2.5$, короткие $0.1 < \bar{H} < 1$ и тонкие $\bar{H} < 0.1$ ($\bar{H} = H/D$, H – высота заготовки, D - диаметр, мм).

Такие заготовки применяются для изготовления изделий листовой и объемной штамповки вырубкой, вытяжкой, чеканкой, рельефной формовкой, прямым и обратным выдавливанием.

Объектом исследования являются тонкие и короткие цилиндрические заготовки из листового и сортового проката (рисунок 1), предназначенные для последующего изготовления осесимметричных полуфабрикатов холодной штамповкой (рисунок 2).

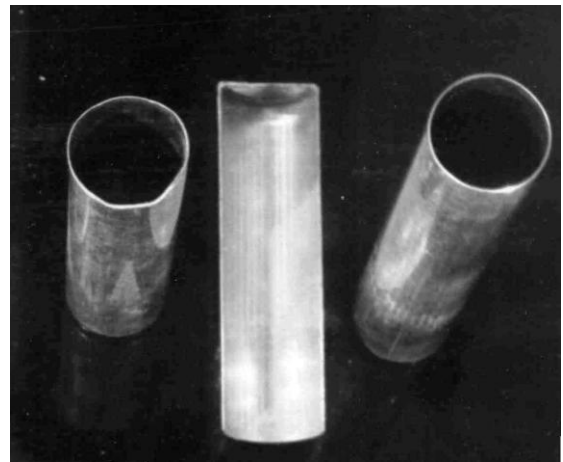


Рисунок 1 – Цилиндрические заготовки для холодной штамповки

Материалом заготовок являются пластичные сплавы цветных металлов на основе алюминия АД1, АД31. Размеры заготовок ограничены пределами: $10 \text{ мм} \leq D \leq 50 \text{ мм}$.



а)



б)

Рисунок 2- Полуфабрикаты, изготовленные комбинированным (а) и обратным выдавливанием (б) из цилиндрических заготовок

Заготовки, как правило, используются для штамповки осесимметричных полуфабрикатов, в том числе – для медалей и памятных знаков, изделий типа труб и тубиков, а также деталей радиотехнической промышленности – контактов предохранителей, корпусов конденсаторов, экранирующих элементов и прочее.

Исходным материалом для производства таких заготовок является прокат – полосовой, квадратный, а также прутки стандартных размеров круглого и прямоугольного профилей сечения. Классификация исходных материалов и получаемых из них заготовок приведена выше, в таблице 1.

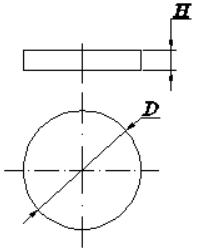
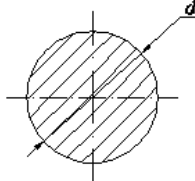
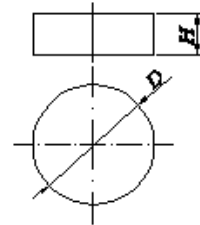
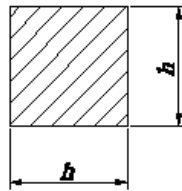
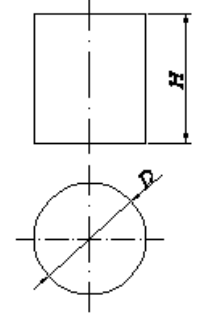
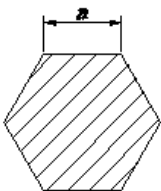
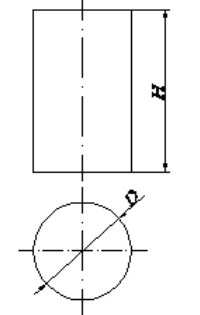
1.2 Анализ современных процессов изготовления цилиндрических заготовок

В настоящее время для изготовления длинных, компактных, коротких и тонких цилиндрических заготовок применяются разные процессы металлообработки. Основными из них являются:

- 1) Отрезка на металлорежущем оборудовании
- 2) Вырубка из листового проката
- 3) Отрезка на ножницах и на прессах в штампах из сортового проката
- 4) Совмещенная отрезка от полосового или круглого проката с последующей

штамповкой осадкой, выдавливанием, или их сочетанием.

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

Рассмотрим достоинства и недостатки различных методов. Главным достоинством отрезки цилиндрических заготовок от прутков на металлорежущих станках является универсальность оборудования и инструмента, позволяющая из одного типоразмера проката получать заготовки разного диаметра и длины.

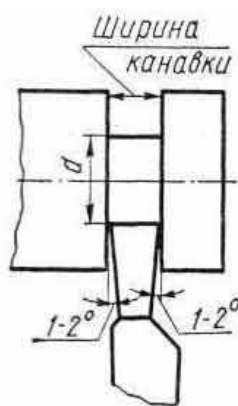


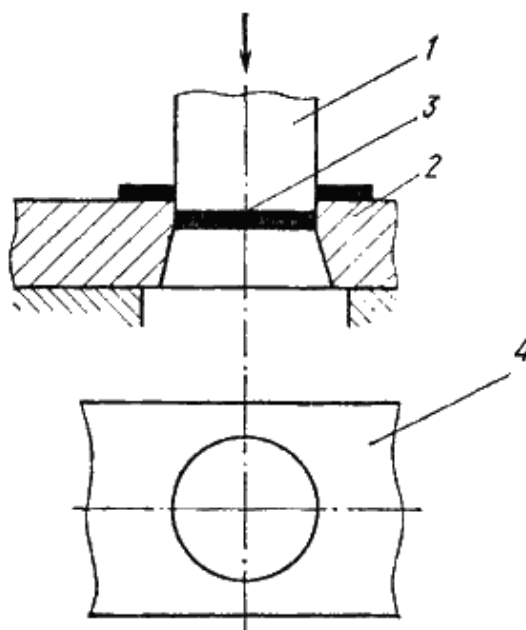
Рисунок 3 – Отрезка цилиндрической заготовки от прутка резцом

Главным недостатком процесса является низкая производительность и большой отход металла в виде стружки, достигающий для тонких и коротких заготовок 80-90% и, соответственно, низкий КИМ, ($\text{КИМ} = 0,2-0,1$), что предопределяет его использование для получения малых партий изделий с единичной программой выпуска.

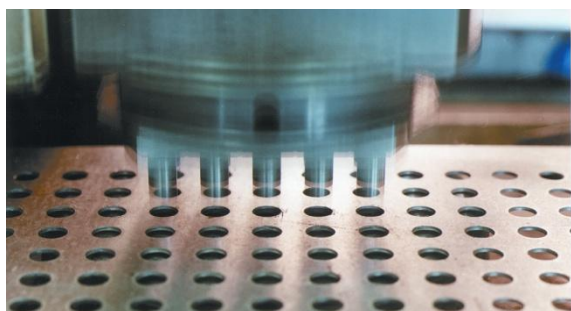
Вырубка заготовок из листового проката на прессах (рисунок 4, а) относится к высокопроизводительным процессам, однако при штамповке из полосы КИМ не превышает 0,3-0,4. А в случае использования многоступенчатого штампа (рисунок 4,б, 6 позиций) КИМ не может достигнуть значения 0,69 [1].

Максимальный КИМ, близкий к 1, обеспечивается применением безотходной отрезки квадратной карточки от полосового проката с последующей осадкой в цилиндрической матрице [2] (рисунок 5).

Перспективным является также дальнейшее развитие технологии изготовления тонких цилиндрических заготовок диаметром до 50 мм и высотой до 5мм из прямоугольных карточек, отрезанных от полосы с толщиной от 3 до 10 мм без отхода с последующей осадкой в цилиндрической матрице (рисунок 6)[3].



а)



б)



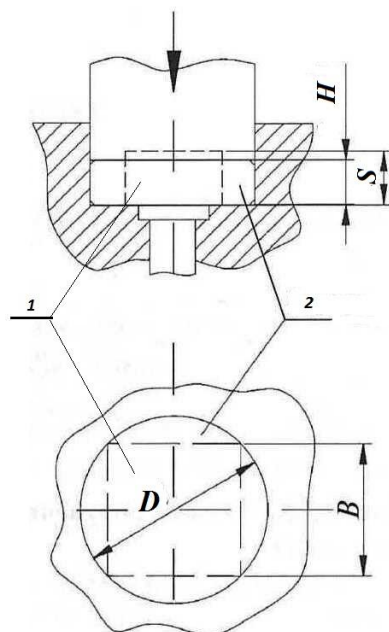
в)

1- пуансон; 2 – матрица; 3 – заготовка; 4 – отход из полосы

Рисунок 4 - Схема вырубki цилиндрической заготовки (а), вырубка в многопозиционном штампе на прессе (б) и вырубленные заготовки (в)

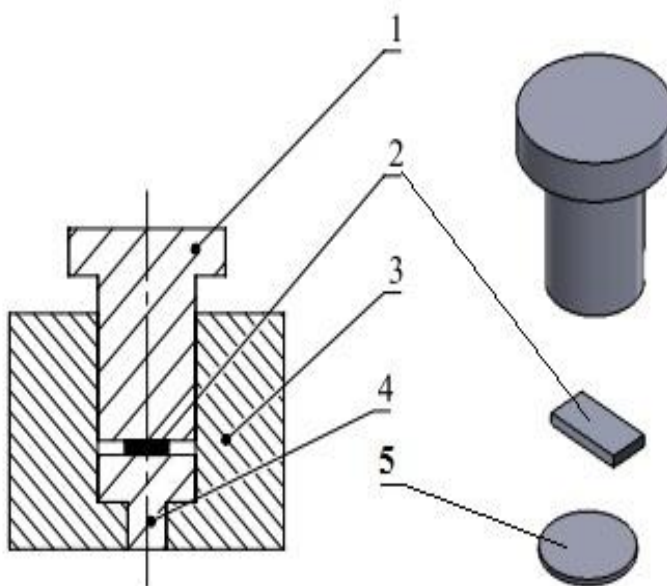
Проанализируем процесс отрезки заготовок от прутков на прессовом оборудовании. Отрезка сдвигом на прессах и ножницах является наиболее высокопроизводительным процессом изготовления заготовок из сортового проката.

Применение разрезки проката на ножницах (рисунок 7) целесообразно только для длинных ($\bar{H} > 2,5$) заготовок, разделение которых происходит без искажений формы. Полученные искажения устраняются механической обработкой или калибровкой.



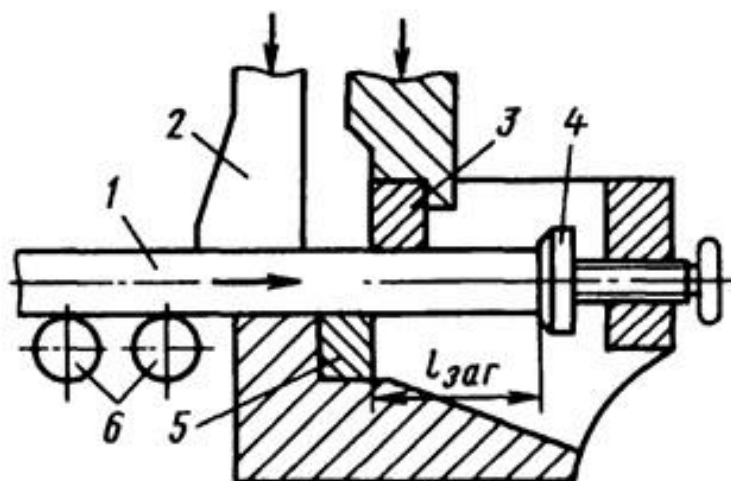
1 – квадратная карточка из полосы; 2 – цилиндрическая заготовка

Рисунок 5 - Схема изготовления заготовки из квадратной карточки



1 – пуансон, 2 - карточка , 3 – матрица, 4 – выталкиватель, 5 - заготовка

Рисунок 6 – Схема штампа для осадки прямоугольной карточки в цилиндрической матрице



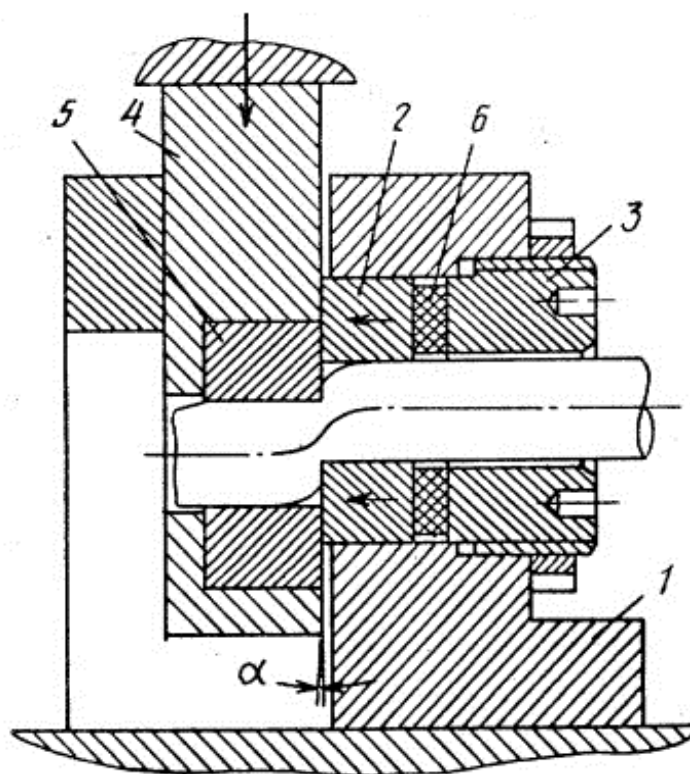
1 – исходный прокат; 2 – прижим; 3 – подвижный нож; 4 – регулируемый упор;
5 – неподвижный нож; 6- направляющий ролик

Рисунок 7 – Схема разрезки проката на ножницах

Компактные заготовки ($1 < \bar{H} < 2,5$) обычно изготавливаются отрезкой от проката в штампах, устанавливаемых на кривошипных прессах (рисунок 8). Геометрическая точность размеров и качество отрезаемых заготовок определяется схемой отрезки, конструкцией штампа, механическими свойствами обрабатываемых материалов [4].

При отрезке заготовок от проката в штампе, представленном на рисунке 8, в ходе перемещения подвижного ножа 4 изменяется схема напряженно-деформированного состояния в зоне разделения. Наличие упругого элемента 6 способствует более плотному прилеганию подвижных ножей 2 и 5 и их взаимному повороту на угол α , что приводит к повышению качества и геометрической точности отрезанной заготовки.

Для коротких заготовок ($0,1 < \bar{H} < 1$) из пластичных металлов и сплавов можно использовать штампы, реализующих комплексные процессы отрезки – закрытой осадки [5]. В таких процессах в штампе отрезается компактная заготовка ($1 < \bar{H} < 2,5$) и осаживается до размеров короткой ($0,1 < \bar{H} < 1$).

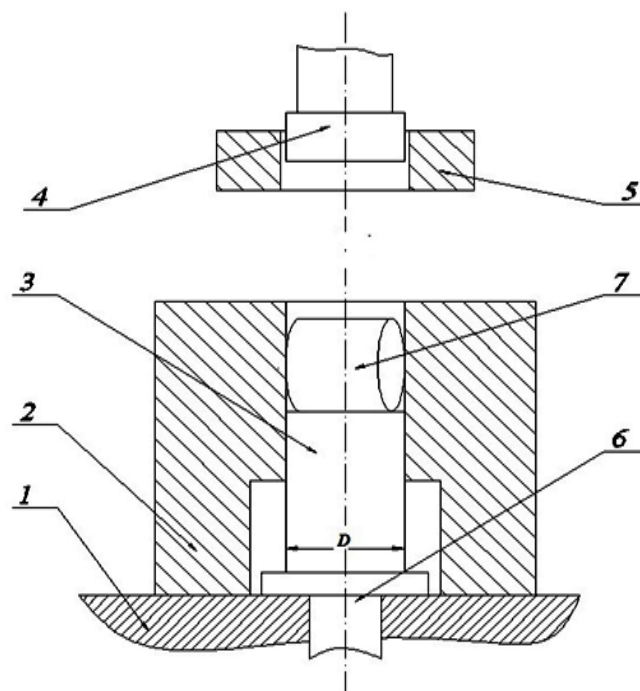


1 – корпус; 2 – неподвижный нож; 3 - резьбовая втулка; 4 – ползун; 5 – подвижный нож; 6 - упругий элемент; α - самоустанавливающийся угол

Рисунок 8- Схема штампа для отрезки компактных заготовок от проката

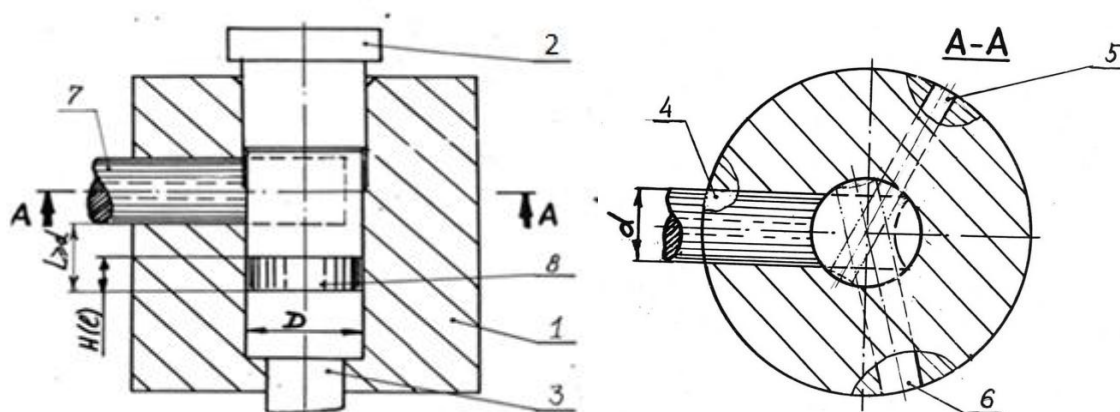
Технологический процесс закрытой поперечной осадки в цилиндрической матрице был предложен в работе [6], где в качестве исходного полуфабриката использовалась заготовка, отрезанная от круглого проката (рисунок 9).

Ограничением применения данной технологии является жесткая зависимость размеров заготовки и осаживаемого полуфабриката. Это было устранено в работе [7] тем, что в матрице для каждого прутка выполняется свое радиальное отверстие, выполняющее роль неподвижного ножа, а пуансон является подвижным ножом и инструментом для осадки. Размеры диаметров прутков d рассчитываются из условия постоянства объема для получения цилиндрической заготовки требуемой высоты $H(l)$ (рисунок 10).



1 – плита, 2 – матрица, 3 – выталкиватель, 4 – пуансон, 5 – съемник, 6 - толкатель

Рисунок 9 – Схема штампа для изготовления заготовок из круглого проката поперечной осадкой [6]



1 – матрица, 2 – пуансон, 3 – выталкиватель, 4-6 – радиальные отверстия различных диаметров, 7 – разрезаемый пруток, 8 – осаженная заготовка

Рисунок 10 – Схема штампа для изготовления цилиндрических заготовок различной высоты из прутков разных диаметров.

Описанная технология позволяет изготавливать цилиндрические заготовки отрезкой - поперечной осадкой. Её существенным недостатком являются

значительные давления при осадке тонких (коротких) заготовок ($H(l)=0,1 \dots 0,15D$), достигающих в завершающей стадии осадки $8-10\sigma_s$ (где σ_s – напряжение течения, МПа). Это приводит к значительным нагрузкам на инструмент (пуансон 2 и матрицу 1, рисунок 10), достигающим 1,5-2 ГПа и низкой стойкости штамповой оснастки.

1.3 Предмет исследования

Предметом исследования является технология изготовления осесимметричных полуфабрикатов, изготавливаемых методом холодной штамповки из прутковой заготовки и, в частности - детали «контакт предохранителя». Данная деталь имеет широкое распространение в силовых электрических установках и выпускается в значительной номенклатуре массового производства (рисунки 11-14) .

1.3.1 Ножевые плавкие предохранители

Наиболее широко используемыми типами предохранителей, выпускаемых для электрических цепей с большими токами (до 1000 А), являются ножевые плавкие предохранители. Они являются источником повышенной опасности, так как их применение предусматривает установку в держатель с неизолированными губками. По этой причине ножевые предохранители стараются применять только в тех местах, где обслуживание электроустановки предусматривается высококвалифицированным персоналом, обладающим и необходимым оборудованием, и соответствующими навыками техники безопасности.

Корпусы плавких вставок обычно изготавливаются из высокопрочных сортов специальной керамики (фарфор, стеатит или корундо-муллитовая керамика).

Корпусы плавких вставок с малыми номинальными токами изготавливаются из специальных стекол. Корпус плавкой вставки обычно выполняет роль базовой



Рисунок 11 – Типоразмерный ряд ножевых предохранителей

детали, на которой укреплен плавкий элемент с контактами плавкой вставки, указатель срабатывания, свободные контакты, устройства для оперирования плавкой вставкой и табличка с номинальными данными. Одновременно корпус выполняет функции камеры гашения электрической дуги (рисунок 12).



Рисунок 12 - Ножевой плавкий предохранитель в керамическом корпусе

Конструкция плавкого предохранителя: Плавкие вставки, вне зависимости от конструктивных особенностей, включают в себя два основных элемента:

- Плавкий элемент - токопроводящий элемент из металла, сплава нескольких металлов или специально подобранных слоёв нескольких металлов, соединенный пайкой с держателем и ножевым контактом;

- Корпус - механизм или систему крепления плавкого элемента к контактам, обеспечивающим включение плавкого предохранителя в целом, как устройства, в электрическую цепь



Рисунок 13 - Плавкая вставка с держателем (основанием) и ножевым контактом

Известно также исполнение основания контакта круглой формы (рисунок 14).

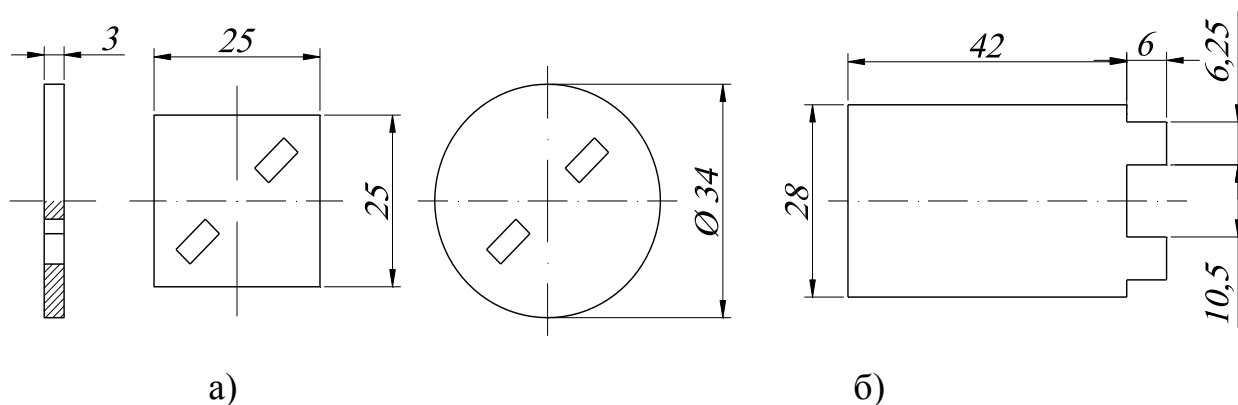


Рисунок 14 - Ножевые плавкие предохранители с круглым основанием

Надо отметить, что по существующей технологии основание и нож контакта изготавливаются отдельно, вырубкой из полосы с последующим соединением расклейкой выступающих элементов.

1.3.2 Существующая технология изготовления контакта

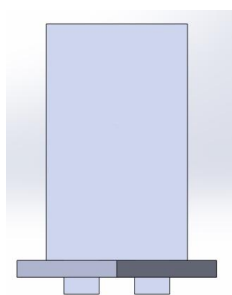
По этой технологии деталь «контакт» с квадратным или круглым основанием собирается из двух заготовок - основания и ножа. Обе заготовки являются пластинами, отрезанными от полосы, полученной из листового проката (рисунок 15). Для сборки этих заготовок в изделие в заготовке ножа (рисунок 15,б) дополнительно вырубается два прямоугольных выступа, а в заготовке основания дополнительно пробивается два прямоугольных отверстия под выступы (рисунок 15,а). Затем следует операция сборки с расчеканкой избыточного объема металла. Твердотельная модель сборного контакта, выполненная в *SOLIDWORKS* [25], представлена на рисунке 16.



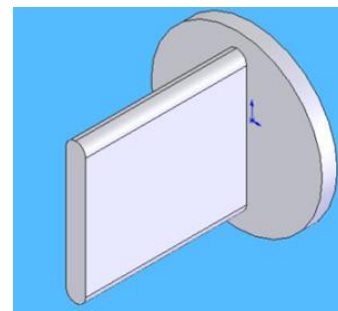
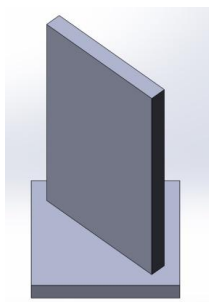
а) – основание ; б) - нож

Рисунок 15 – Чертеж разъемных заготовок контакта

Контакт изготавливается из алюминиевого сплава АД1 (63А-250А) или АД31 (400А-1000А) по ГОСТ 4784-74 (Таблица 2)



а)



б)

Рисунок 16 – Твёрдые модели контакта с квадратным (а) и круглым (б) основанием

Таблица 2- Химический состав сплавов [8]

Марка сплава	Химический состав, %							
	Al	Примеси						
		Fe	Si	Cu	Zn	Mg	Cr	Ti
АД1	не менее 99,5	0,3	0,3	0,02	0,07	-	-	-
АД31	97.65 - 99.35	до 0.5	0,2- 0,6	до 0.1	0,10	0.45 - 0.9	до 0.1	до 0.15

Механические характеристики сплавов АД1 и АД31 приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Механические свойства алюминиевых сплавов [9].

Марка сплава	Предел прочности σ_B , МПа	Предел текучести σ_T , МПа	Относительное удлинение, δ , %	Относительное Сужение, Ψ , %
АД1 (1100)	100	50	40	80
АД31(6063)	240	200	10	50

1.3.3 Раскрой листа для изготовления полос по базовому варианту

Стандартный размер поставляемого листа 1420×710 мм (рисунок 17). Такой лист сначала режется на полосы шириной 25 мм, так как основание и нож имеют

ширину 25 мм. Затем эту полосу режут на заготовки, под основание и нож, длиной 25 мм и 48 мм соответственно. При этом для ножа учитывается припуск на пробивку пазов. Для заготовки типа «основание» на таком листе в ширину поместятся 28 штук, а в длину 56 штук. На одном листе получится вырубить 1568 заготовок. Площадь такой заготовки с учетом пробитых отверстий равна 587.5 мм². КИМ будет равен:

$$\text{КИМ} = \frac{S_{\text{заг.}} \times N}{S_{\text{листа}}},$$

$$\text{КИМ}_{\text{осн}} = (1568 \times 587.5) / (1420 \times 710) = 0.9 \text{ (для основания)}$$

Для вырубки заготовки типа «нож», из такого же листа, 28 штук помещается по ширине и 29 по длине, всего 812 штук. Площадь заготовки с учетом отхода на пробивку пазов 975 мм².

$$\text{КИМ}_{\text{нож}} = (812 \times 975) / (1420 \times 710) = 0.78 \text{ (для ножа)}$$

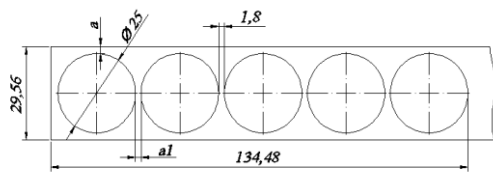
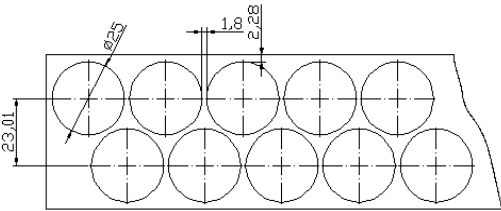
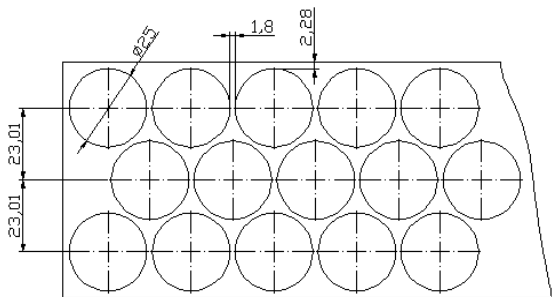
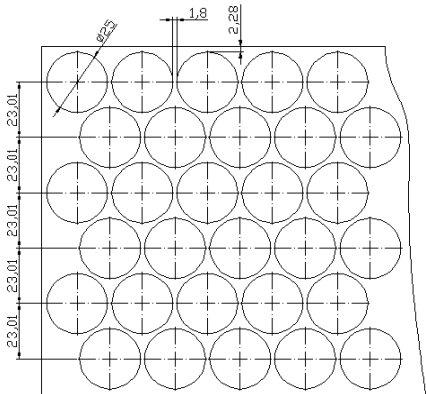
Получается общий КИМ = $0,9 \times 0,78 = 0,7$.

Для контакта с круглым основанием даже в случае применения шестирядной вырубки (таблица 4) КИМ не превышает 0,69 .

Из схем раскроя видно, сколько получается лишнего металла после резки заготовок для ножа и основания. К отходу также относится металл от пробивки отверстий и вырубки выступов.

Принципиально возможно применение последовательной вырубки заготовки из листа, а затем вырубки в ней либо выступов, либо отверстий под них. Учитывая массовость производства необходимо предусмотреть механизмы, перемещающие заготовки из штампа в штамп. Возможно применение штампа специальной усложненной конструкции, при котором за один ход сначала вырубается заготовка из листа, а затем в ней пробиваются два отверстия (под выступы на ноже). При этом требуется еще одна операция окончательной сборки двух заготовок в одну деталь.

Таблица 4 – Зависимость КИМ при вырубке цилиндрических заготовок от вида раскроя материала

№	Вид процесса	Наименование процесса	Коэффициент Исползования металла
1		Однорядная вырубка	0,62
2		Двухрядная вырубка	0,63
3		Трехрядная вырубка	0,66
4		Шестирядная вырубка	0,69

Таким образом, для производства детали «контакт» выше описанным методом потребуется две операции вырубки на одном оборудовании, одна операция сборки на другом оборудовании, и транспортировка заготовки между участками.

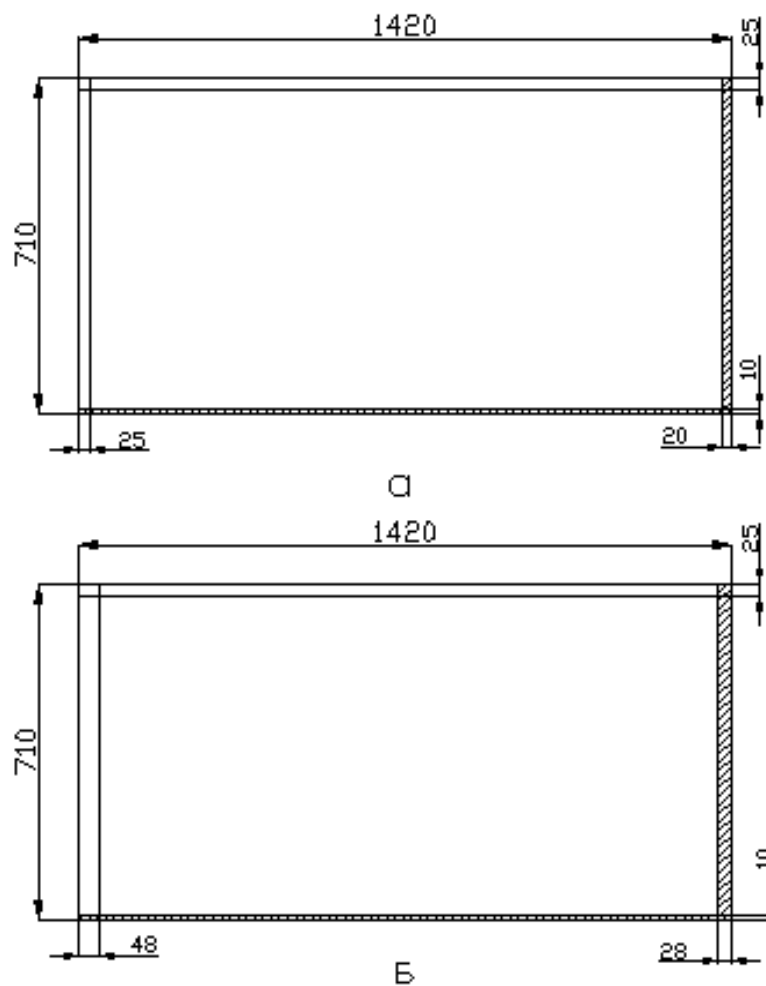


Рисунок 17 - Схемы раскроя: а) для квадратного основания; б) для ножа.

Выводы.

Данный базовый вариант производства контакта плавкого предохранителя обладает рядом недостатков:

- Слишком низкий КИМ (0.7), что ведет к неэкономичному расходу металла и внедрению дополнительных операций по сборке и утилизации отходов.
- Высокая трудоемкость производства с точки зрения технологических переходов и операций, требующихся для окончательной сборки.
- Для производства контакта этим методом потребуется несколько штампов.

Таким образом, учитывая массовый характер производства, базовый процесс становится неэффективным.

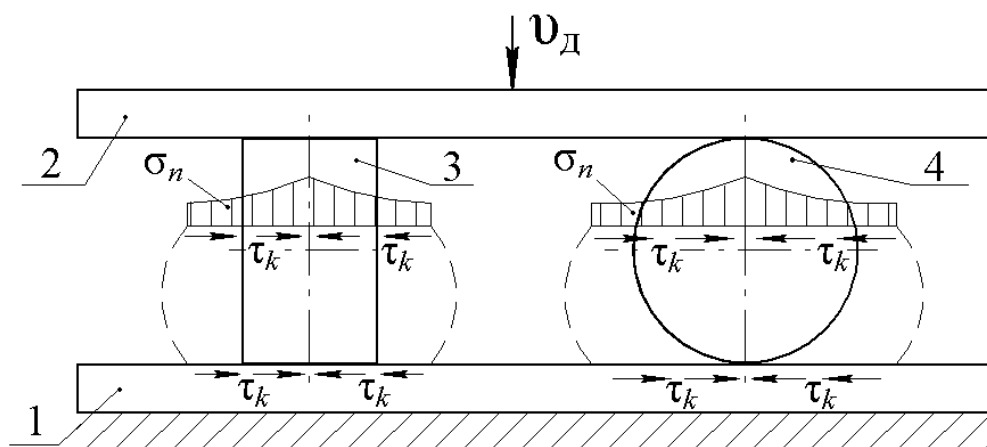
1.4 Возможности использования операций холодной штамповки для изготовления полуфабриката контакта процессом отрезка – осадка-выдавливание

В настоящее время в металлообрабатывающей промышленности приоритетным направлением является внедрение ресурсосберегающих технологий, обеспечивающих экономию материалов и снижение трудоемкости за счет сокращения числа технологических операций. При этом, очень важно обеспечить устойчивое протекание технологических процессов с обеспечением надежности, долговечности и получением требуемых показателей качества. Для этого требуется проведение дополнительных исследований силовых и технологических параметров процессов с целью оптимизации и выбора соответствующего оборудования. С целью снижения расхода металла и уменьшения трудоемкости производства контакта за счет сокращения числа операций предлагается изготавливать его цельным, используя безотходную отрезку заготовки от прутка в штампе с последующей осадкой и выдавливанием.

1.4.1 Штамповка осадкой

Существуют два вида осадки - продольная и поперечная (рисунок 18). В первом случае приложение силы деформирования осуществляется в направлении оси заготовки, во втором случае – перпендикулярно оси.

Продольной осадкой изготавливаются длинные и компактные заготовки. Процесс осадки длинных заготовок ограничивается возможностью потери устойчивости при относительной высоте $\bar{H} > 2,5$. А главным недостатком этого процесса при штамповке в закрытой матрице является необходимость точной фиксации заготовки по её оси для недопустимости неравномерной деформации и неполному заполнению углов матрицы. Процесс поперечной осадки лишен этих недостатков, так как заготовка четко фиксируется в полости матрицы.



1- нижняя плита; 2- верхняя плита;

2- 3- заготовка для продольной осадки; 4 – заготовка для поперечной осадки

Рисунок 18 – Схемы продольной и поперечной осадки

1.4.2 Штамповка выдавливанием

Основным достоинством штамповки выдавливанием по сравнению другими процессами является получение изделий высокой точности и низкой шероховатости поверхности. При штамповке выдавливанием невозможна перегрузка оборудования в случае избыточного объема заготовки. Поковки, изготовленные выдавливанием, отличаются высоким качеством поверхности отсутствием внутренних трещин по объему, пустот и других дефектов, залечиваемых при деформации в условиях всестороннего неравномерного сжатия.

Среди недостатков необходимо отметить следующие:

- 1) Высокие энергозатраты и большие силы деформирования, увеличивающие нагрузку на штампы и снижающие их стойкость, из-за чего возникает необходимость в использовании высокопрочных инструментальных материалов;
- 2) Высокая неоднородность деформации по длине и объему приводит к различию в прочностных свойствах детали, что приводит к неравномерному износу штамповой оснастки.

1.5 Современные методы исследования процессов ОМД

1.5.1 Экспериментально-аналитический метод

Немногим более полувека назад для выбора наиболее оптимального варианта технологии обычно использовалось большое число предварительных физических экспериментов. Но, в настоящее время, с появлением на рынке большого числа компьютерных программ, реализующих моделирование процессов, появилась возможность сокращения сроков и стоимости подготовки производства. Экспериментальные данные используются для установления взаимосвязей между факторами и параметрами процесса, а математические модели процессов создаются в результате аналитических решений, например, полной системы уравнений теории пластического течения Леви–Мизеса [10].

1.5.2 Инженерный метод

Инженерный метод (ИМ) может быть использован для определения нормальных напряжений только на контактной поверхности заготовки и инструмента. Это позволяет решать всего одно уравнение равновесия и заменять в нём частные производные полными. Иногда, вместо использования классического уравнения, выводят упрощённое уравнение равновесия, заменяя бесконечно малый элемент конечным в определённом направлении (метод тонких сечений). ИМ является наиболее распространённым благодаря своей простоте и наглядности. Однако простота метода во многих случаях не оправдывает присущие ему недостатки, приводящие к непредсказуемой надёжности получаемых результатов и ограничениям задач, решаемых теоретическим исследованием [10,11]. ИМ не может использоваться для получения формул распределения напряжений, скоростей течения и накопленных деформаций по объёму деформируемого тела.

1.5.3 Энергетический метод

Его иногда называют методом баланса работ или мощностей. Он основан на экстремальных принципах механики деформируемого твёрдого тела[12,13]. Его достоинствами являются сравнительная простота и то, что он позволяет использовать вариационное исчисление для определения скоростей течения, формы и границ ОПД, а также формоизменения заготовки. Особенно полезна инженерам-технологам и производственникам получаемая ЭМ верхняя оценка, поскольку она позволяет быстро и просто оценить нагрузку, требуемую для реализации процесса деформации.

В классическом виде (то есть при использовании лишь основного энергетического уравнения без последующего дополнения его уравнениями равновесия и уравнениями связи между напряжениями и деформациями) метод не позволяет также определить напряжённое состояние в ОПД и, соответственно, найти распределение напряжений как по объёму заготовки, так и на контактных поверхностях между заготовкой и инструментом.

1.5.4 Метод верхней оценки

МВО является разновидностью ЭМ исследования операций ОМД с помощью кинематически возможных полей скоростей. Кинематически возможным называется поле скоростей, которое удовлетворяет в каждой точке условию несжимаемости среды и граничным условиям для скоростей [12].

МВО может быть использован не только для определения энергосиловых параметров, но и при построении полей скоростей с варьируемыми параметрами на основе принципа минимума мощности пластической деформации позволяет уточнять полученные результаты, а также решать некоторые задачи дефектообразования. Например, определение размеров зоны пластической деформации, условий образования утяжины и других дефектов, связанных с

течением металла в очаге деформации, Для этого исследуется функция мощности пластической деформации на экстремум (определяется минимум) по варьируемым параметрам.

1.5.5 Метод математического планирования экспериментов

Основан на использовании методов планирования экспериментов для получения математической модели процесса в аналитическом виде. С использованием методов математической статистики и обработки результатов методами регрессионного анализа получается математическая модель в виде уравнения регрессии [14,15].

Планирование экспериментов является составной частью имитационного моделирования на основе данных физического эксперимента (опытных данных), выполненного по результатам априорного ранжирования факторов, наиболее значимых для достижения требуемых параметров исследуемого процесса и выбора уровня их варьирования. Большим преимуществом метода является то, что для построения математической модели не требуется проводить полный факторный эксперимент, а использовать дробный факторный эксперимент с центром плана и звездными точками. Это существенно сокращает общее число опытов и трудоемкость моделирования.

1.5.6 Метод конечных элементов

Главная идея МКЭ, представляющего собой численную реализацию вариационного энергетического метода, заключается в моделировании сплошной деформируемой среды путём разбиения на области (конечные элементы), имеющие произвольную форму (треугольник, прямоугольник, ромб, разносторонний четырёхугольник и тому подобное), которые определяются удобствами расчёта [16,17]. При этом суммарная энергия деформируемой среды

вычисляется как сумма энергий, относимых к соответствующему элементу, ограниченному линиями, соединяющими узлы. Поведение среды элемента характеризуется с помощью отдельного набора выбранных функций, представляющих перемещения и напряжения в выделенной области. В том числе, принимается наиболее простое предположение о линейной зависимости перемещений от координат рассматриваемой точки. После этого неизвестные коэффициенты функций перемещений выражаются через перемещения узловых точек элемента с помощью соответствующей системы уравнений. Используя соотношения для перемещений, выражают деформации, а затем и напряжения, которые будут, таким образом, являться функцией смещения узловых точек элемента.

Затем полученные зависимости подставляют в выражения для потенциальной энергии деформации, представляя её как функцию узловых смещений. Минимизируя функцию энергии, то есть беря частные производные от энергии по соответствующим узловым перемещениям, получают систему линейных уравнений, определяющих искомые перемещения узлов, что и приводит к решению поставленной задачи.

Выводы из аналитического обзора

Проведённый обзор известных литературных источников позволяет сделать следующие основные выводы:

1. Цилиндрические заготовки, из которых изготавливаются детали электро- и радиотехнической промышленности такие как контакты предохранителей, экраны, корпуса конденсаторов, рондели, тьюбики и тубы, являются широко распространёнными изделиями металлообработки.

2. Известные технологии получения вышеупомянутых изделий, такие как обработка резанием, листовая штамповка вырубкой, пробивкой и сборкой, отрезка от сортового проката в штампах и на ножницах не позволяют удовлетворить

современным требованиям, особенно, с учётом минимального числа переходов в массовом производстве.

3. Установлено, что наиболее эффективным способом производства цилиндрических заготовок является совмещённый процесс отрезки - закрытой поперечной осадки, а для детали контакт – отрезки - штамповки (осадкой с последующим прямым выдавливанием).

4. В известной литературе полностью отсутствует методика расчёта параметров заготовки, гарантирующих после отрезки одновременное начало осадки и выдавливания, а также методика расчёта геометрических и силовых параметров реализации совмещенного процесса за один переход.

5. Среди современных методов теоретического исследования прикладных задач пластической деформации на первом этапе для определения напряженно-деформированного состояния целесообразно использовать метод верхней оценки с построением кинематически возможных полей скоростей и определения безразмерных давлений.

6. Дальнейшее уточнение кинематических, силовых и геометрических параметров можно выполнять методом конечных элементов, реализуемых в современных вычислительных системах.

Цель и задачи исследования

Результаты изучения современной информации по производству цилиндрических заготовок и осесимметричных полуфабрикатов радио- и электротехнической промышленности позволяют сформулировать цель и задачи диссертационной работы.

Целью данной работы является исследование ПОШ цилиндрических заготовок из алюминиевых прутков и разработка устройства, обеспечивающих безотходное изготовление осесимметричных полуфабрикатов.

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 МВО и МКЭ установить напряжённо - деформированное состояния отрезанной заготовки в процессе её штамповки осадкой и выдавливанием;

4. Исследовать зависимость силы и безразмерного давления от 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 совмещенного ПОШ, обеспечивающих изготовление цилиндрических заготовок и осесимметричных полуфабрикатов из алюминиевых прутков;

7. Провести экспериментальное опробование безотходного ПОШ и разработать устройство для изготовления детали «контакт силового предохранителя».

ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Для изучаемого совмещенного ПОШ известны многочисленные исследования, в том числе - С. С. Соловцова [2,4,7], посвященные теоретическим исследованиям разделительного перехода, а именно – анализу напряженно-деформированного состояния, силовых и технологических параметров. В связи с этим, теоретические аспекты разделительного перехода в данной работе не рассматриваются. Важнейшим выводом из вышеуказанных работ является тот, что пластичные алюминиевые сплавы разделяются путем пластического сдвига, без образования поверхности разрушения и высоким качеством поверхности, что облегчает использование отрезанных заготовок в дальнейших технологических переходах штамповки, без доработки.

Анализ разделительного перехода в данной работе выполнен на основе физического и компьютерного моделирования. Результаты моделирования приводятся ниже, в главе 3.

Наиболее важными параметрами исследуемого процесса являются силовые и геометрические параметры закрытой штамповки осадкой и выдавливанием.

2.1 Теоретическое исследование процесса осадки в закрытой матрице

Процесс продольной осадки можно разделить на три этапа: 1) открытая осадка, 2) закрытая (начинается с момента касания боковой поверхностью матрицы), 3) заполнение углов. Все три этапа деформирования закрытой осадкой достаточно полно изучены и описаны в работах С. И. Губкина, И. Я. Тарновского, Л. А. Шофмана, О. А. Ганаго, А. З. Журавлева, М. С. Эдуардова [10-17, 26,27].

Все авторы выделяют следующие особенности первого этапа открытой осадки: бочкообразование в вертикальной плоскости, частичный переход боковой поверхности на контактные, образование зон прилипания и затрудненной деформации на контактных поверхностях.

На втором этапе происходит образование боковой поверхности осаживаемой заготовки и увеличение давления за счет роста площади контактного трения и развивающегося в металле упрочнения.

Наиболее ответственным является третий этап - заполнение угловых элементов, так как помимо их оформления возможно вытекание металла в торцовый заусенец при неправильной наладке штампа.

Теоретическому и экспериментальному исследованию закрытой поперечной осадки цилиндрической заготовки в прямоугольной матрице посвящена работа Ф. И. Антонюка [18].

Автор, используя традиционные параметры формоизменения при закрытой штамповке - соотношение величины радиуса скругления кромок заготовки у пуансона (r_b) и матрицы (r_n), установил взаимосвязь степени заполнения угловых элементов с относительной высотой деформируемой заготовки для осадки в прямоугольной матрице в условиях минимального и максимального трения и их влияние на величину удельного усилия. Он установил, что при уменьшении относительной высоты заготовки до $\bar{H} = 0,1$ удельное усилие убывает, однако при этом резко возрастает влияние контактного трения и дальнейшее уменьшение $\bar{H}$ приводит к существенному увеличению удельного усилия осадки.

Анализ силового режима закрытой поперечной осадки выполнен им же методом верхней оценки. Задача решена путем оптимизации треугольных блоков и определения их параметров из условия минимизации функционала мощности. Однако, решения получены для случая плоскодеформированного состояния и не могут быть распространены для исследования поперечной осадки прутковой заготовки в цилиндрической матрице, которая происходит в условиях объемной деформации.

Таким образом, можно заключить, что характер формоизменения на стадии открытой поперечной осадки достаточно полно изучен. Исследованными также являются силовой режим и формоизменение цилиндрической заготовки при закрытой поперечной осадке в прямоугольной матрице в условиях плоскодеформированного состояния.

2.1.1 Силовые и геометрические параметры закрытой поперечной осадки в цилиндрической матрице

Экспериментальные и теоретические исследования поперечной осадки призматической заготовки выполнены Н. Лисунцом в работе [19]. Для теоретического анализа силового режима закрытой осадки использован МВО. Исследовались стадии открытой осадки (начало процесса, модель из двух пар жестких блоков, рисунок 19, а), касание торцами боковой стенки (закрытая осадка, модель из трех пар жестких блоков, рисунок 19, б) и завершающая стадия (образование сегментной фаски с размерами $a \times \delta$, являющихся параметрами формоизменения, рисунок 19, в). В результате расчетов МВО были получены выражения для силы деформирования и безразмерного давления в зависимости от параметра формоизменения – сегментной фаски с размерами $a \times \delta$.

Для завершающей стадии поперечной осадки, характеризующейся заполнением цилиндрической формы матрицы с образованием на заготовке в угловых зонах сегментных фасок с размерами $a \times \delta$ выражение для давления осадки q , полученное энергетическим методом из условия равенства мощностей внешних и внутренних сил имеет вид:

$$q = 4\sigma_s R^2 \left\{ \left[\varphi_{13} + 2 + \frac{\varphi_{13}}{\varphi_3} + \left(\frac{\varphi_{13}}{\varphi_3} + \sqrt{3} \right) \frac{\sin 2\varphi_3}{2} \right] \frac{1}{\sqrt{3}} + \mu \varphi_{13} \bar{H} \left(1 + \frac{0,17\varphi_{13}}{\bar{H}^2} \right) + 0,5\mu\pi \left(1 - \frac{\delta}{R} \right) \right\} \frac{1}{S_\delta}, \quad (1)$$

где σ_s - напряжение течения материала заготовки, МПа;

φ_{13}, φ_3 - углы блочной модели в завершающей стадии, рад;

μ - коэффициент контактного трения;

$\bar{H}$ - относительная высота заготовки;

S_δ - площадь поверхности деформирования, мм², $S_\delta = 2R^2 (\sin 2\varphi_{13} + \sin 2\varphi_3)$.

R – радиус закрытой матрицы, мм

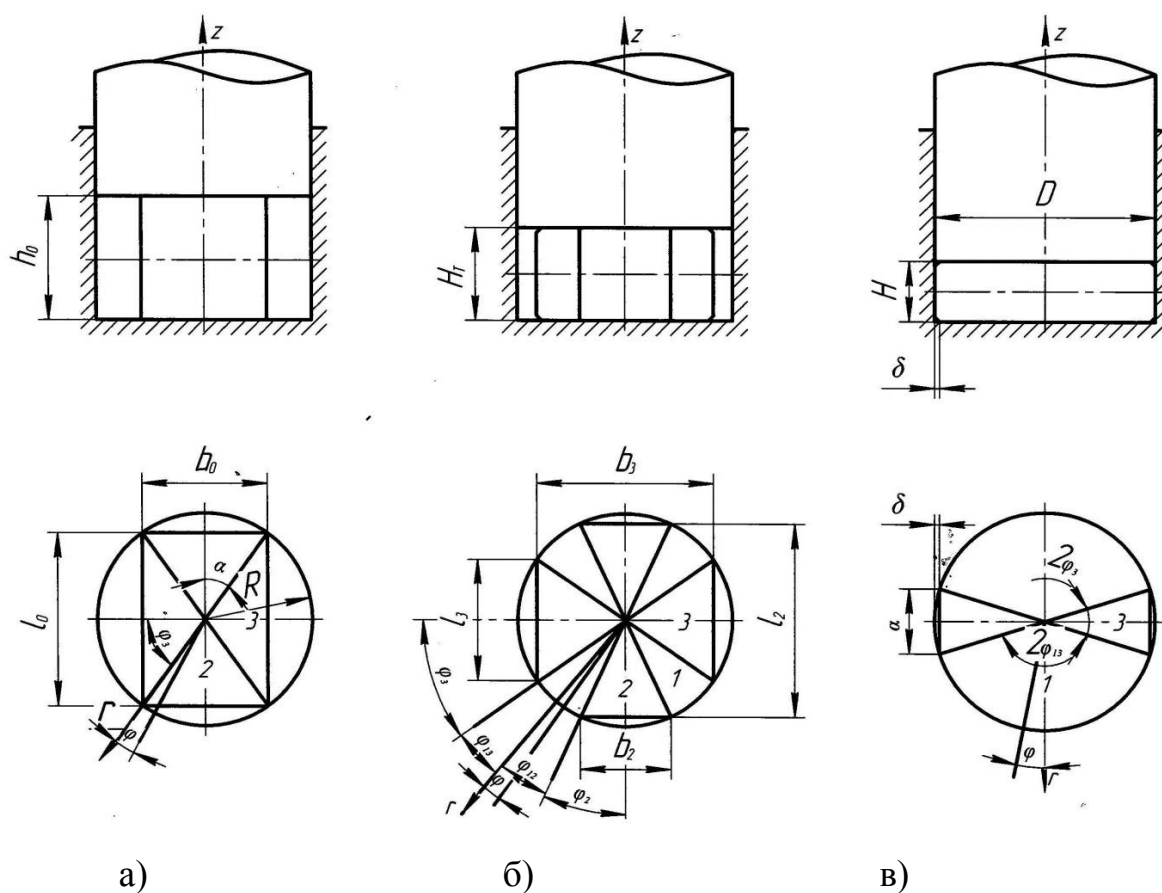


Рисунок 19 - Кинематически возможные модели деформирования призматической заготовки с исходными размерами $b_0 \times h_0 \times l_0$ в цилиндрической матрице: а) начало осадки; б) стадия развитых пластических деформаций; в) завершение осадки

2.1.2 Силовые и геометрические параметры процесса поперечной осадки в квадратной матрице

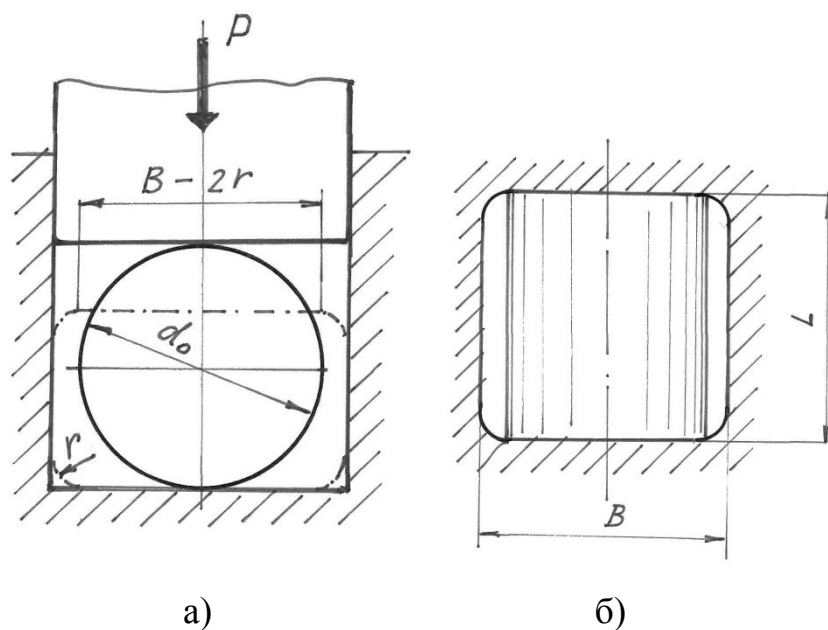
Сила поперечной осадки P_0 согласно рисунку 20 определяется по формуле

$$P_0 = qL(B - 2r),$$

где q – давлением осадки, МПа

L, B - длина и ширина контактной поверхности заготовки, мм

r - радиус скругления угловой кромки, мм



а) – осевой разрез; б) – вид в плане

Рисунок 20 – Расчетные схемы для определения силы при осадке в квадратной матрице

Для определения давления поперечной осадки заготовки в закрытой матрице могут быть использованы выражения, полученные ИД Л. Прандтля, Г.Я. Гуна а также рассчитанные А.З.Журавлевым методом линий скольжения [20], либо из выражения, предложенные Ф.И.Антонюком на основе расчетов МВО [18]. Исследования А.Л. Воронцова [21] показали, что высота ОПД зависит от величины радиусов в углах закрытого штампа, поэтому во всех выражениях давление является функцией радиуса. Кроме того, существенное влияние оказывают условия контактного трения. ИД предназначен для определения нормальных напряжений только на контактной поверхности заготовки и инструмента. Это позволяет использовать всего одно уравнение равновесия и заменять в нём частные производные полными. Иногда вместо использования классического уравнения выводят упрощённое уравнение равновесия, заменяя бесконечно малый элемент конечным в определённом направлении (метод тонких сечений). Однако, по мнению А.Л.Воронцова, ИД позволяют получить нижнюю оценку усилия осадки.

А.З. Журавлев разделил все поковки в зависимости от их относительной высоты на низкие ($H < 0,2$) и высокие ($H > 0,2$), и с учетом такого критерия предложил формулы. Формулы А.З.Журавлева для определения давления на пуансоне в зависимости от радиуса заполнения угловой кромки заготовки имеют вид:

- При отсутствии трения на стенке матрицы ($\mu = 0$)

$$q = \sigma_s \left(1 - \frac{H}{8r} - \frac{3r}{H} \right)$$

где σ_s - напряжение течения, МПа;

С учетом упрочнения напряжение течения определяется по формуле

$$\sigma_s = \sigma_B (1 + \varepsilon),$$

где σ_B - предел прочности, МПа

ε - степень деформации при поперечной осадке, $\varepsilon = \frac{d_0 - H}{d_0}$

H - высота заготовки после осадки, мм.

- для случая наличия контактного трения на стенке матрицы

$$q = \sigma_s \left[1 + \frac{H}{8r} - \frac{3r}{H} - \mu \left(\frac{H}{4r} + \frac{4r}{H} - 1 \right) \right]$$

- для случая максимального трения ($\mu = 0,5$)

$$q = \sigma_s \left(0,5 + \frac{H}{4r} - \frac{r}{H} \right).$$

Ф.И.Антонюк [18] предлагает следующую обобщенную формулу для определения давления закрытой поперечной осадки, полученную им на основе решения уравнения баланса мощностей всех внешних и внутренних сил на кинематически возможных скоростях:

$$q = \sigma_s \left(1 - 2 \frac{r}{B} \right) \left[2 + \mu \frac{B - 2r}{H} + \frac{H}{8r} - \frac{3r}{H} + \mu \left(\frac{H}{4r} + \frac{4r}{H} - 1 \right) \right]$$

В более поздних работах Ф.И.Антонюк [22], обобщая результаты экспериментов, получает выражение для безразмерного давления q/σ_s с учетом диаметра заготовки:

$$q/\sigma_s = 1,15(2 + \frac{\mu}{2H}(D-2r) + \frac{H(1+2\mu)}{8r})$$

Наиболее точные данные по определению давления при закрытой поперечной осадке дают современные расчетные методы, основанные на методе конечных элементов (МКЭ) с использованием вычислительных систем типа *Q-FORM* [23] и *DEFORM* [24]. Результаты расчетов в этих системах приведены ниже, в Главе 3.

2.2 Силовые параметры прямого выдавливания ножевой части контакта

При изготовлении ножевой части контакта используется операция штамповки выдавливанием в щелевую полость. Для выполнения теоретического анализа рассмотрим стадии выдавливания [25-27].

На первой стадии, называемой *распрессовкой*, происходит осадка (заполнение всех зазоров между инструментом и заготовкой, и заготовка полностью по всему контуру принимает форму рабочего инструмента). В конце распрессовки (рисунок 21, б), заканчивается формирование очага деформации (показан пунктиром ABCD), а усилие по окончании первой стадии достигает максимального значения. На второй стадии процесса, называемой установившейся (или стационарной), усилие выдавливания несколько уменьшается, что связано в основном с уменьшением высоты оставшейся в матрице заготовки, а, следовательно, и с уменьшением усилия, затрачиваемого на преодоление трения. По мнению Ю. А. Алюшина [28], на установившейся стадии безразмерное давление q/σ_s численно равно накопленной деформации. Это предположение позволяет сопоставлять результаты теоретических расчетов, выполненных аналитическими методами, в том числе – методом верхней оценки (МВО) с расчетами методом конечных элементов (МКЭ [29-34]. При дальнейшем движении пуансона начинается третья заключительная стадия, называемая нестационарной, которая сопровождается резким увеличением относительных скоростей перемещения металла в

центральной зоне с образованием утяжины (рисунок 21, г). Поэтому процесс выдавливания останавливают до момента образования утяжины.

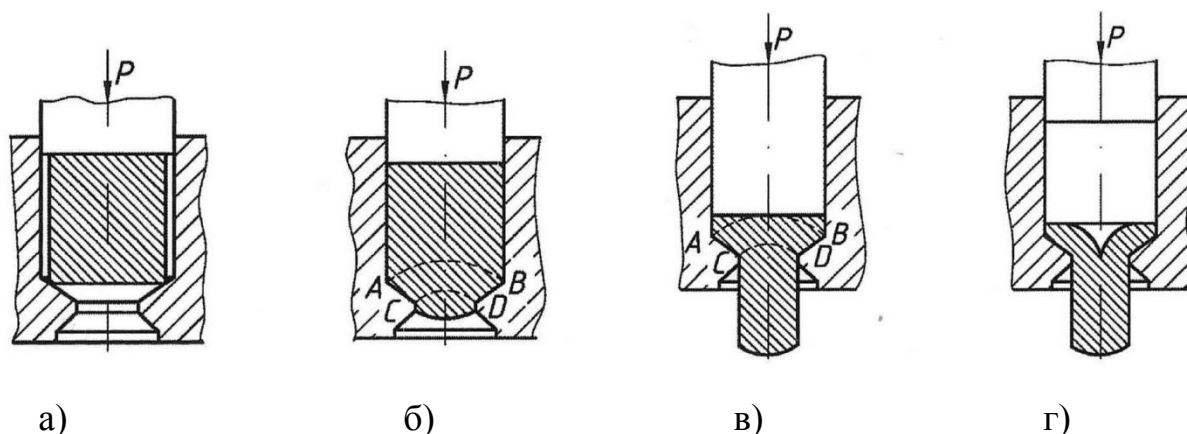


Рисунок 21 – Стадии прямого выдавливания: а – загрузка заготовки; б – распрессовка; в – переход от установившейся стадии к неуставившейся; г- образование утяжины

При изготовлении контакта предохранителя за счет совмещения операций осадки и прямого выдавливания в одном штампе наблюдается значительная неравномерность деформации, особенно в зоне перехода основания контакта в ножевую часть. При определенных соотношениях размеров исходной заготовки, формы ее сечения и граничных условий может происходить образование дефекта в виде утяжины. Это становится возможным, когда компоненты скоростей течения в ножевой области превышают соответствующие компоненты скоростей в основании контакта.

Проанализируем возможность образования утяжины методом верхней оценки (МВО) [11-14]. Простота и удовлетворительная точность МВО позволяют его рекомендовать для первого этапа решения технологических задач ОМД. Дальнейшее снижение погрешности расчетов может быть достигнуто за счет более точного описания полей скоростей, траекторий и применения вариационных принципов, например, минимума мощности пластической деформации.

Для решения задачи теоретического определения силовых параметров выдавливания и условий образования утяжины в основании контакта воспользуемся энергетическим методом прикладной теории пластичности, в

котором расчет нагрузок в процессах пластического деформирования 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 трения между инструментом и материалом, мм².

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

$$W_i = k \int V_{ij} d f_{ij},$$

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

f_{ij} – площадь поверхностей разрыва, мм².

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:

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

Решение задач с применением МВО выполняется в следующей последовательности:

- Формулировка задачи с указанием известных данных и (или) варьируемых параметров,
- Изображение схемы процесса с разбивкой очага деформации на треугольные жесткие блоки,
- Формулировка граничных условий в скоростях и закона контактного трения,
- Построение годографа скоростей КВПС (кинематически возможного поля скоростей) в соответствии со схемой исследуемого процесса,
- Расчет отрезков треугольных блоков по заранее найденным координатам,
- Расчет скоростей блоков на основе схемы процесса и годографа скоростей,
- Вычисление мощности очага деформации ,
- Расчет мощности внешних сил или безразмерного (среднеинтегрального) давления q/σ_s ,
- Расчет варьируемых параметров из условия минимума q/σ_s ,
- Анализ полученных зависимостей.

При выборе КВПС из жестких блоков предполагается, что внутри блока деформация отсутствует, а по контактными поверхностям происходят сдвиги. Для сохранения сплошности среды нормальные компоненты скоростей смежных блоков одинаковы, а разрыв скоростей на контактных поверхностях блоков постоянен.

Если исследуемая деталь – контакт предохранителя будет получена методом прямого выдавливания, тогда согласно формул по определению длин отрезков на основе координат и значениям скоростей получена формула расчета параметра

q/σ_s . После минимизации q/σ_s по варьируемому параметру может быть получена высота очага деформации при выдавливании.

Результаты исследования предельных условий выдавливания могут быть использованы для объяснения причин образования дефекта – утяжины на торцевой поверхности при выдавливании контактов. Кинематически возможные поля скоростей, соответствующие минимальной мощности формоизменения процессов ОМД, отражают действительный характер течения металла в процессе деформации.

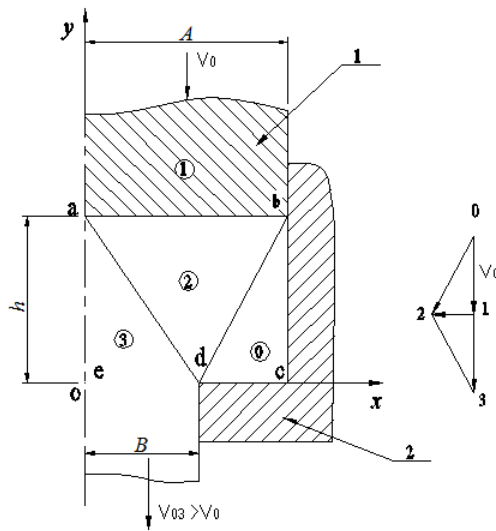
Поэтому мощность необходимо представить как функцию неизвестных параметров. После исследования ее на экстремум можно определить величину неизвестных параметров. К таким параметрам можно отнести при выдавливании высоту очага пластической деформации (S) или толщину деформируемых образцов (h), при которых возможно образование утяжины на торцевой поверхности.

На основе анализа полей скоростей в работах [26-30] показано, что размеры очага деформации определяются формой, размерами, условием трения на поверхностях деформирующего инструмента. При минимальных относительных обжатиях деформация концентрируется вблизи рабочей поверхности инструмента, что приводит к образованию утяжины.

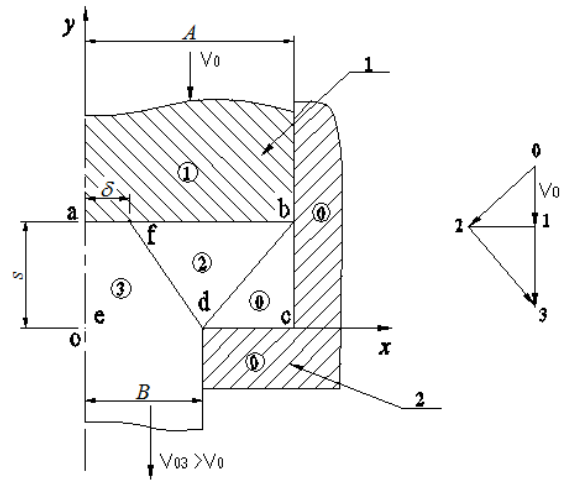
Для выявления условий образования утяжины при осадке заготовки с последующим выдавливанием рассмотрены три стадии процесса формоизменения на основе анализа блочной модели формоизменения и построения годографа КВПС: установившейся стадии (рисунок 22, а), неустановившейся стадии без трения (рисунок 22, б) и образования утяжины с трением (рисунок 23). Длину отрезков определим через известные координаты их концов (таблица 5).

Таблица 5 – Координаты точек к расчетной схеме блочной модели выдавливания

Координаты	a	b	c	d	e
$X, мм$	0	A	A	B	0
$Y, мм$	h	h	0	0	0



а)



б)

Рисунок 22 - Схемы моделей из жестких блоков и годографа скоростей при выдавливании без учета трения (а - стационарная стадия, б - неустойчивая стадия)

На первой стадии из годографа скоростей (рисунок 22, 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:

$$V_{1,2} = V_0 (A-B)/h,$$

$$V_{2,3} = V_0 (A-B)/B,$$

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

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:

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

где ε – степень вытяжки, $\varepsilon = 1 - B/A$

В случае выдавливания контакта с учетом его геометрических размеров имеем:

$$\varepsilon = 1 - 2/17 = 0,88,$$

$$(q/\sigma_s)_{\min} = 3,83.$$

Высота очага деформации, которая соответствует минимальной мощности формоизменения через размеры матрицы и щелевого паза равна (рисунок 22):

$$h = S = \sqrt{2B(A-B)} = 7,75 \text{ мм.}$$

Для определения причины образования утяжины представим эту стадию в виде схемы. Если $h > S$, формоизменение идет без образования утяжины (стадия стационарная, рисунок 22,а). Если $h < S$, образуется утяжина. Поле скоростей (трение отсутствует) представлено на рисунке 22,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:

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

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

Следовательно, образуется утяжина.

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

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

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 равна 3 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.

С учетом деформационного разогрева при выдавливании до температур 190-200°C (как показало дальнейшее моделирование) и максимального контактного трения ($\mu = 0,5$) между поверхностью инструмента и выдавливаемой ножевой частью контакта поле скоростей представлено на рисунке 23.

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

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

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

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

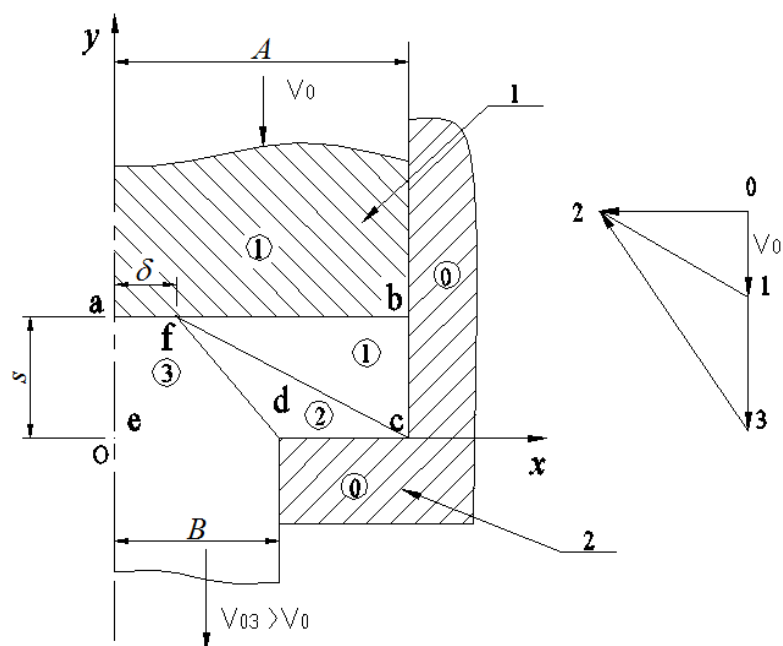


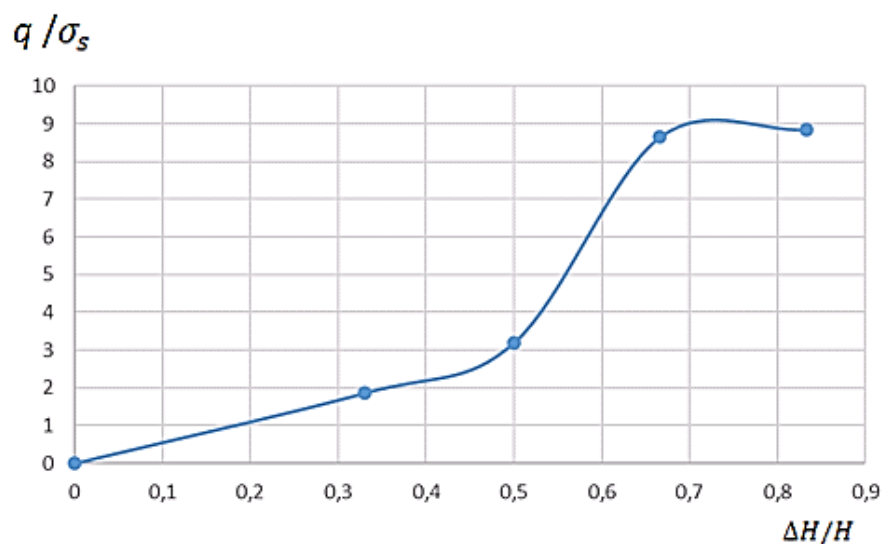
Рисунок 23 – Схема модели из жестких блоков и годографы скоростей при выдавливании с учетом максимального трения

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.

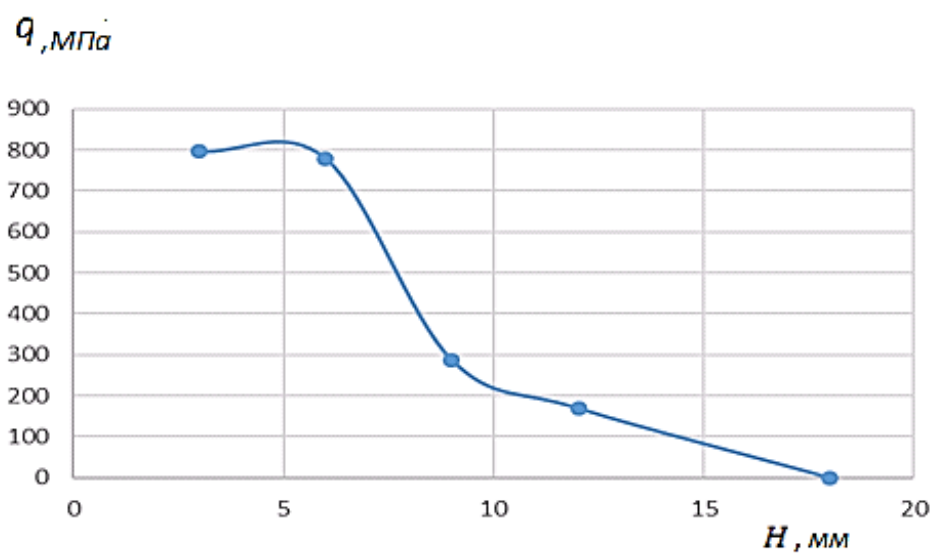
С учетом геометрических размеров контакта максимальное безразмерное давление q/σ_s , вычисленное по формуле (1) будет равно:

$$q/\sigma_s = 15/3 + \frac{3}{4} = 5,75$$

По результатам расчетов построены зависимости безразмерного давления от относительной деформации и давления осадки от высоты заготовки, приведенные на рисунке 24.



а)



б)

Рисунок 24 - Зависимости безразмерного давления от относительной деформации (а) и давления осадки от текущей высоты заготовки (б).

Выводы по главе 2

1. Проведенный теоретический анализ технологий изготовления контакта предохранителя показывает, что штамповку необходимо проводить за два технологических перехода поперечной осадкой отрезанной заготовки для

формирования основания и последующего прямого выдавливания с получением ножевой части.

2. Благодаря наличию щелевого паза в матрице сила и давление не возрастают до значений, характерных для данных степеней деформации при осадке, а наоборот, снижаются, так как начинается выдавливание ножевой части и снижается трение за счет уменьшения высоты осаживаемой части.

3. Устойчивость процесса при выдавливании ножевой части контакта предохранителя зависит от степени вытяжки ε , высоты очага пластической деформации S и условий контактного трения (μ). 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.

4. Для предотвращения образования утяжины необходимо обеспечивать минимальное трение между заготовкой инструментом за счет повышения чистоты его обработки и применения смазок.

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОТРЕЗКИ – ШТАМПОВКИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕ

3.1 Построение диаграмм истинных напряжений алюминиевого сплава АД1

Для построения диаграмм сопротивления деформации (истинных напряжений) обычно используют один из трёх методов: испытания на растяжение, сжатия или на кручение.

В данной работе испытания проведены с помощью испытательной машины на растяжение/сжатие DEVOTRANS GP D NN (Рисунок 25, а) методом растяжения стандартных образцов (рисунок 26). При этом, на каждой стадии фиксировали изменение длины рабочей части образца, а также соответствующее этому изменению значение растягивающей силы P . Затем определяли напряжение текучести σ_T , временное сопротивление разрыву σ_B , логарифмическую степень деформации ε и относительное удлинение δ по известным формулам:

$$\sigma_T = \frac{P}{F_0}; \sigma_B = \frac{P_{max}}{F_0}; \varepsilon = \ln \frac{l}{l_0}; \delta = \frac{l-l_0}{l_0} 100\%$$



а)



б)

Рисунок 25 – Универсальная машина DEVOTRANS GP D NN (а) и печь Nabertherm (б) для высокотемпературных испытаний

В целях проведения высокотемпературных испытаний образцы помещали в печь Nabertherm B180 при помощи дополнительного захвата (рисунок 25,б). Затем печь доводилась до заданного температурного режима, после чего привод включался и проверялась прочность на разрыв. При этом фиксировались изменения параметров мощности и деформации с помощью специального экрана.

Результаты испытаний записывались на компьютере в виде протокола и отображались в виде документа на устройстве печати.

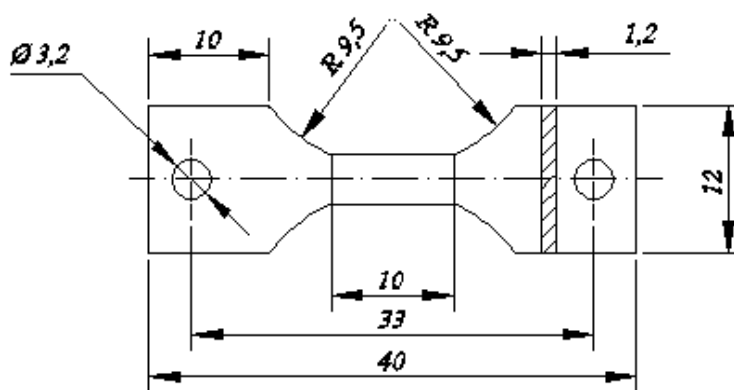
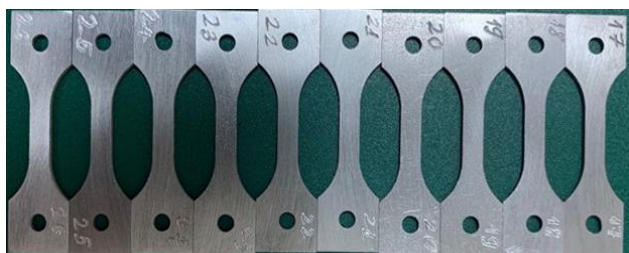


Рисунок 26 – Чертежные образцы

Испытательные образцы (Рисунок 26) в соответствии со стандартами для испытания при комнатной температуре (ГОСТ 1497–84)[31] и при повышенных температурах (ГОСТ 9651–84)[32].



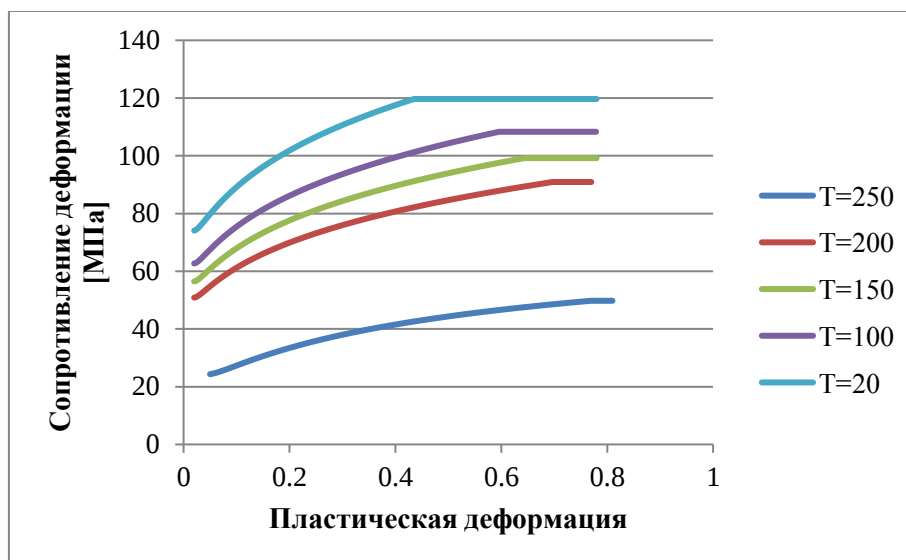
а)



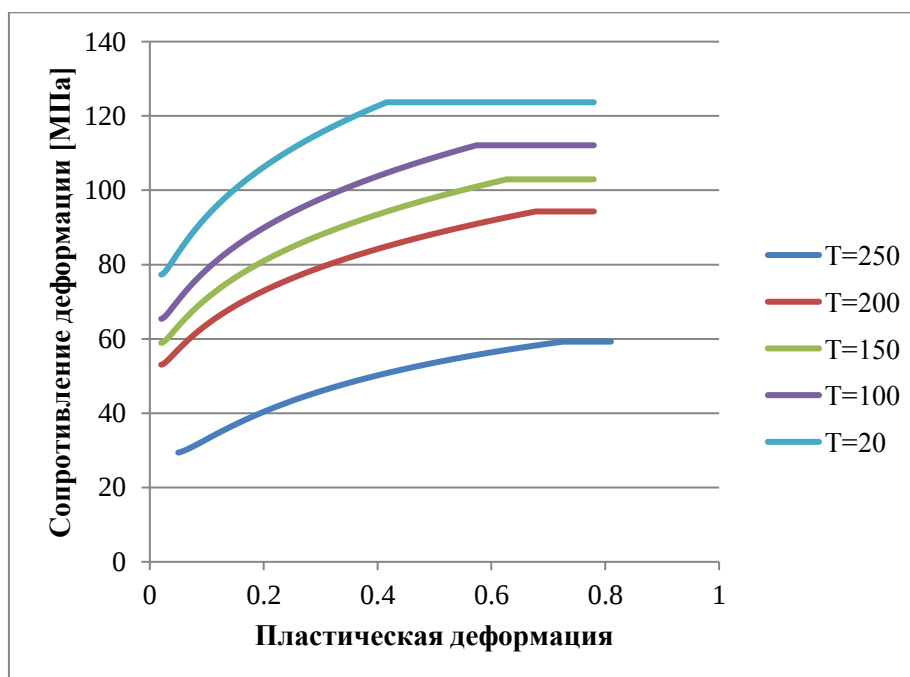
б)

Рисунок 27 – Образцы для испытаний (а) и образцы после разрушений (б)

На рисунке 28 представлены результаты испытаний.



а) Скорость деформации $\dot{\epsilon} = 0,01$



б) Скорость деформации $\dot{\epsilon} = 0,1$

Рисунок 28 – Зависимости сопротивления деформации от величины пластической деформации при различных температурах

Выводы:

При температурах около 250°C сопротивление деформации уменьшается вдвое по сравнению с 20°C. При учете результатов испытаний образцов в реальных

условиях выдавливания полуфабриката контакта напрашивается вывод, что в зоне деформационного разогрева - в месте перехода основания в ножевую часть имеется интенсивное пластическое течение металла, что является неременным условием для образования утяжины. Повышение скорости деформации благоприятно влияет на уменьшение пластичности в этой зоне, что приводит к необходимости применять в производственных условиях более быстроходное оборудование, например, кривошипный пресс.

3.2 Исследование влияния формы сечения и соотношения размеров проката на силовые и геометрические параметры штамповки 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 6.

Таблица 6 – Размеры и форма сечения заготовок

Форма сечения	Размер сечения, мм	Длина заготовки $l, мм$	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
	11 x 22	22	2	0.01
Полоса	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. В ходе предыдущих исследований [19] было установлено, что наименьшие давления и наиболее благоприятные условия для деформирования возникают при поперечной осадке прутковых заготовок. Этот вывод будет подтвержден ниже.

На рисунке 25 приводится схема обозначений точек на поверхности полосовой заготовки для определения давлений и средних напряжений в процессе поперечной осадки в цилиндрической матрице в зависимости от текущего радиуса. Расчеты выполнены в *BC DEFORM-3D* [24].

Расчеты выполнялись для технического алюминия АД1 в указанных точках (1-9) при значении параметра незаполнения $\delta/R = 0,04$ (рисунок 29). На основе расчетов построены зависимости давления и средних напряжений от текущего радиуса R . Как следует из рисунка 29, при осадке квадратной в плане заготовки давления значительно (почти в два раза) ниже аналогичных величин для полосовой заготовки (точки $P2-P6$) и близки в периферийных зонах (точки $P1$ и $P7$).

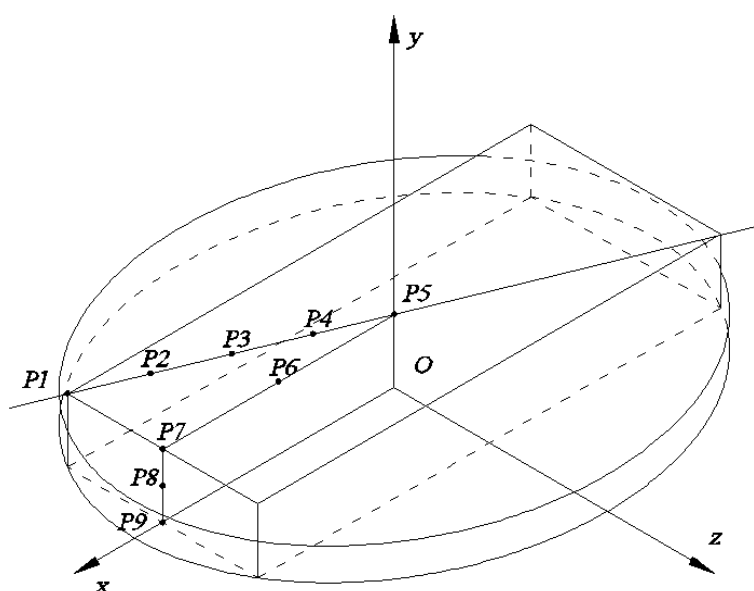
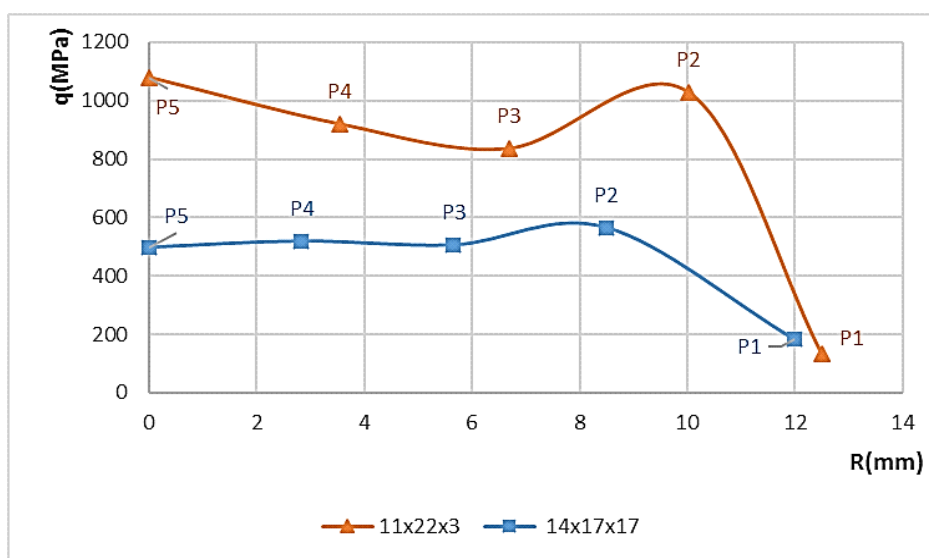


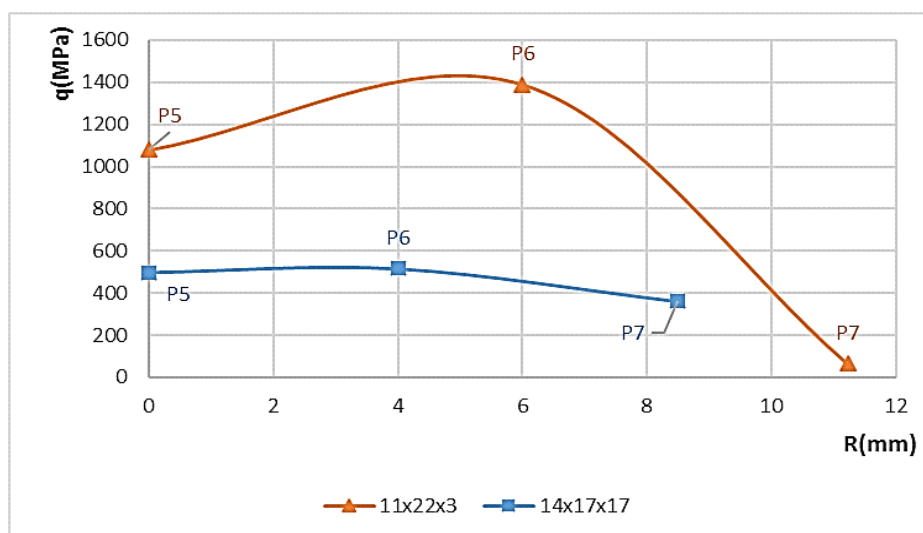
Рисунок 29 – Схема обозначения точек на поверхности заготовки прямоугольного профиля сечения при осадке в цилиндрической матрице

А средние напряжения в периферийной зоне (точки *P1* и *P7*, рисунок 30) имеют близкие значения и несколько различны в осевой зоне (точки *P2-P6*). Это приводит к выводу, что квадратные в плане (компактные) заготовки более предпочтительны по сравнению с длинными (прямоугольными в плане) заготовками, так как их осадка происходит при значительно меньших давлениях

Из форм поперечного сечения проката наиболее целесообразно использовать заготовки круглого сечения, так как при их осадке трение минимально, что вызывает наименьшую неоднородность деформации.

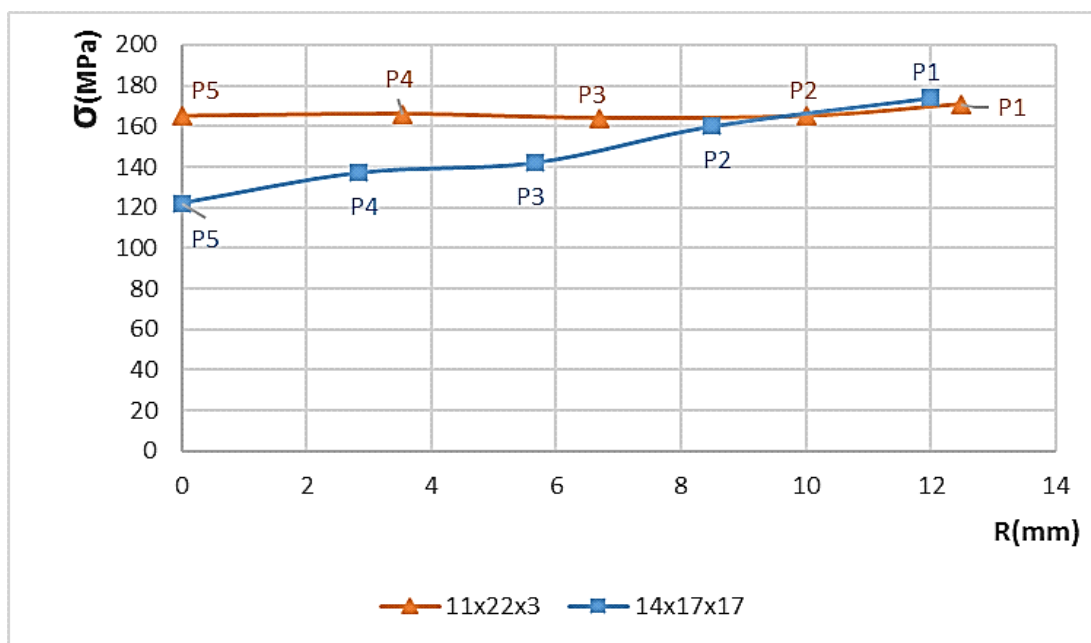


Точки 1-5

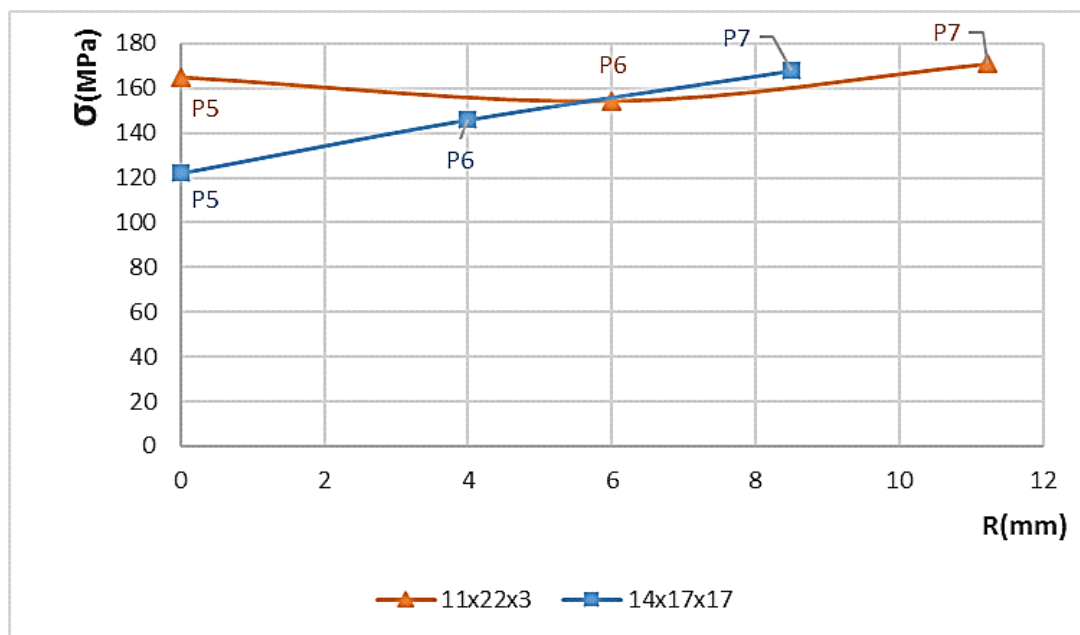


Точки 5-7

Рисунок 30 – Зависимость давления поперечной осадки полосовой и квадратной заготовки в зависимости от текущего радиуса



Точки 1-5



Точки 5-7

Рисунок 31 – Зависимость средних напряжений на поверхности квадратной и полосовой заготовки в зависимости от текущего радиуса

Для приведенных в таблице типоразмеров заготовки выполнены расчеты силовых параметров, результаты которых приведены на рисунках 32 – 35.

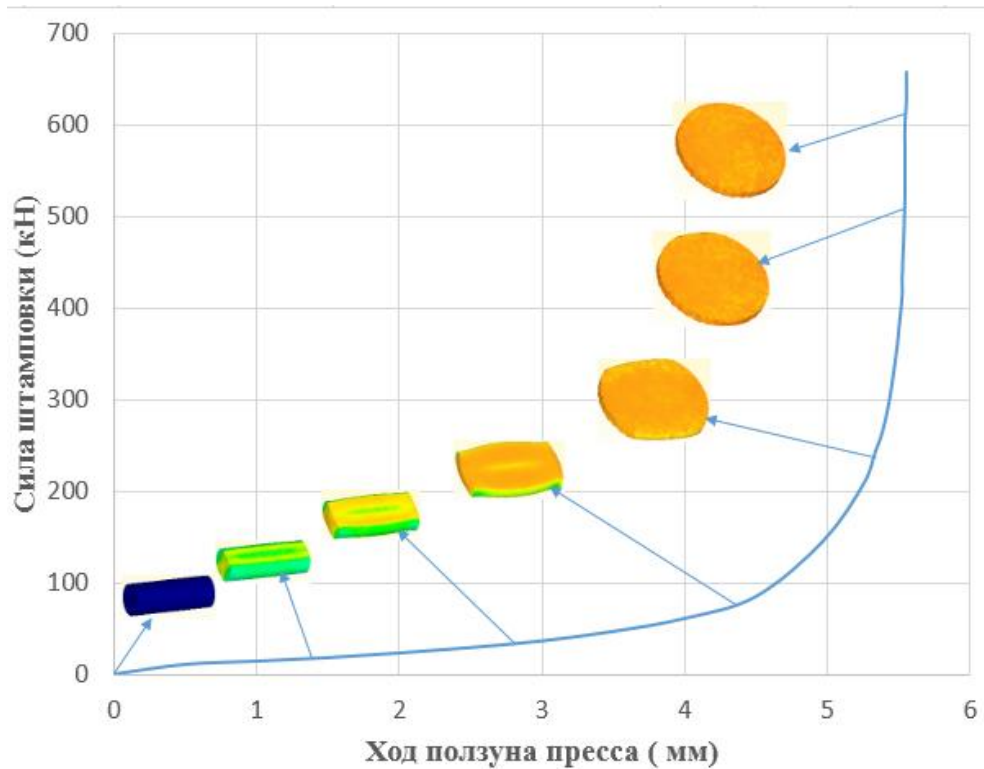


Рисунок 32 – Зависимость силы штамповки от перемещения пуансона для длинной прутковой заготовки $\varnothing 11 \times 22 \text{ мм}$

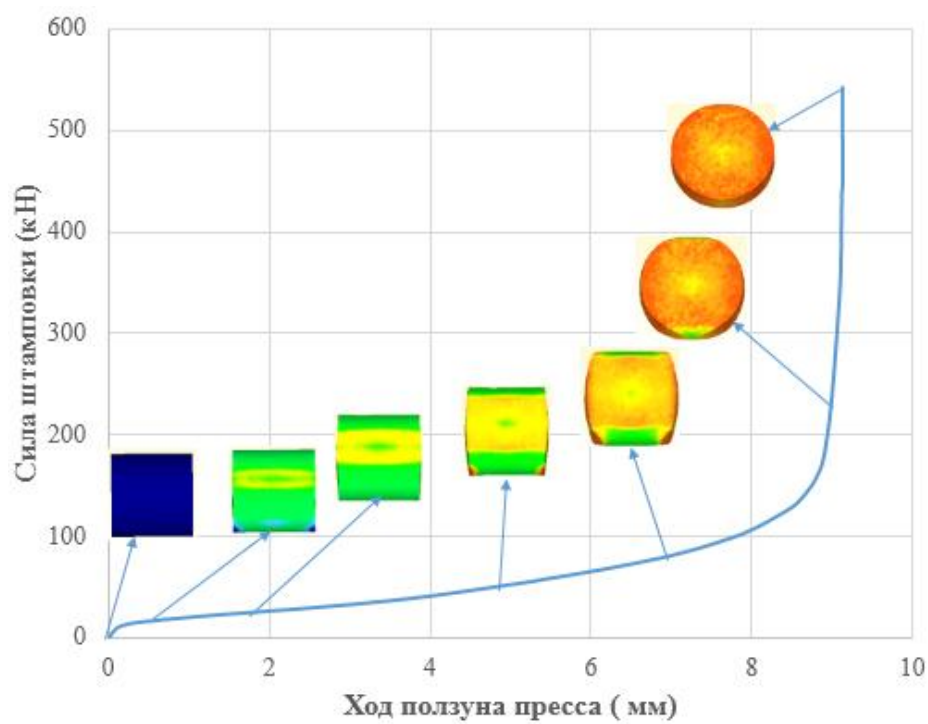


Рисунок 33 – Зависимость силы штамповки от перемещения пуансона для компактной прутковой заготовки $\varnothing 17 \times 17 \text{ мм}$

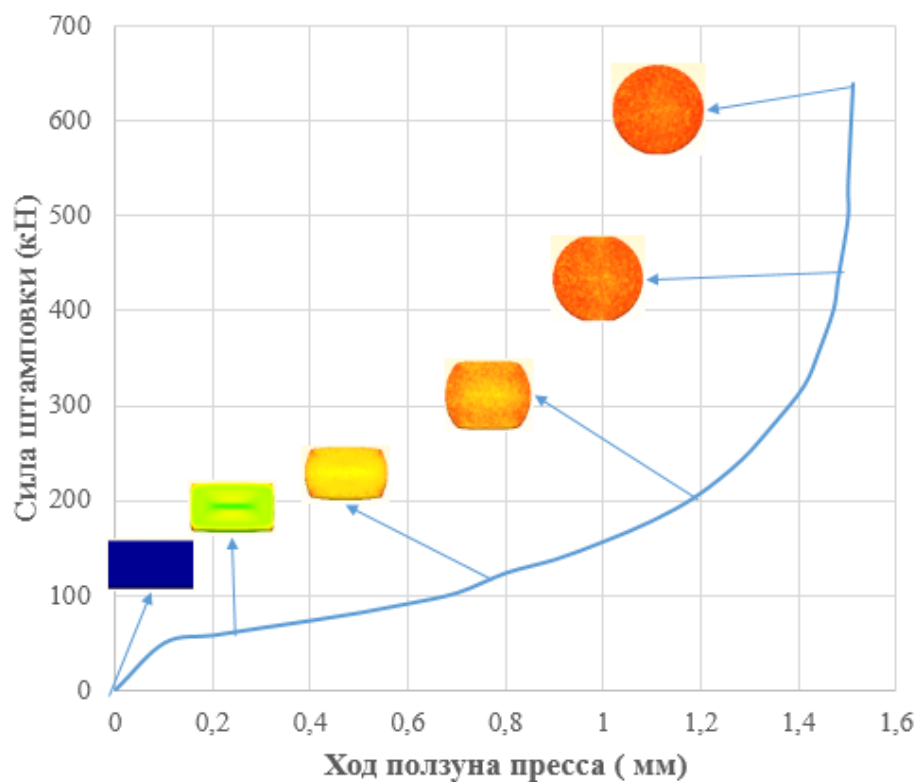


Рисунок 34 – Зависимость силы штамповки от перемещения пуансона для компактной прямоугольной заготовки $11 \times 22 \times 3$ мм

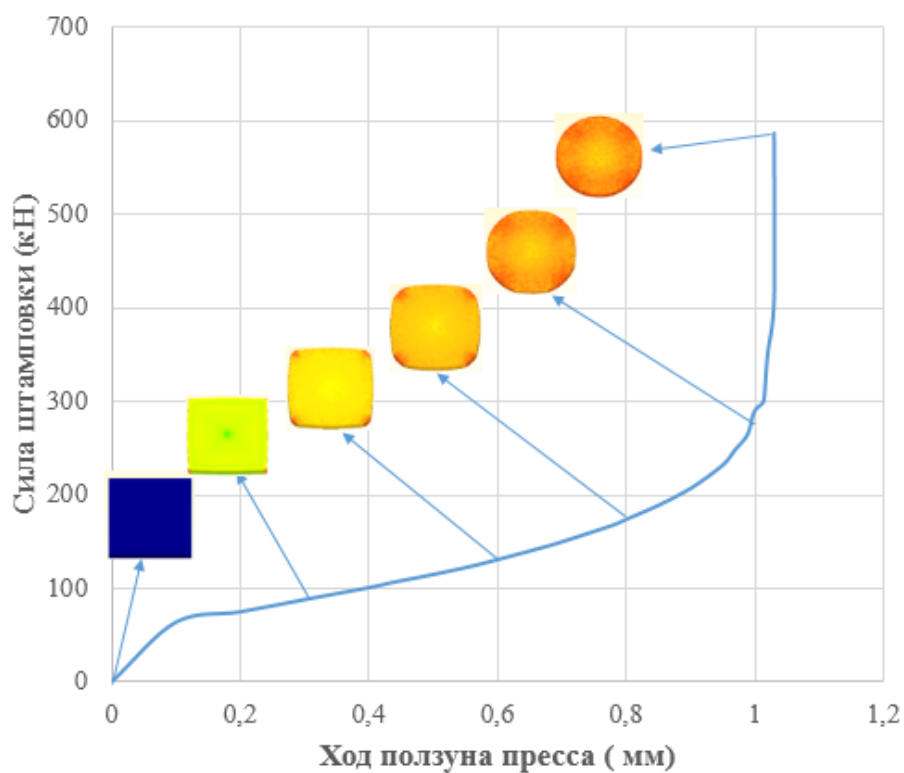


Рисунок 35 – Зависимость силы штамповки от перемещения пуансона для компактной квадратной заготовки $17 \times 17 \times 3$ мм

Как следует из рисунков 32-35, в завершающей стадии поперечной осадки сила штамповки имеет близкие значения для всех типов заготовок, так как она определяется прежде всего площадью проекции в плане для одной и той же матрицы. Значительные расхождения величины давления связаны прежде всего с относительной высотой осаживаемых заготовок и неравномерностью деформации при осадке различных длин и форм поперечного сечения.

3.3 Исследование влияния параметра незаполнения (сегментной фаски) на давление осадки

Как отмечалось выше, в главе 2, давление поперечной осадки зависит от величины параметра незаполнения (относительной сегментной фаски δ/R) и формы поперечного сечения исходной заготовки. На рисунках 36 - 38 приводятся результаты расчетов в виде зависимостей давления осадки от параметров незаполнения для заготовок различной формы поперечного сечения (круг, квадрат, полоса) и соотношения размеров. Анализ приведенных на рисунках зависимостей показывает, что наименьшие давления возникают при осадке компактных заготовок из прутков круглого сечения.

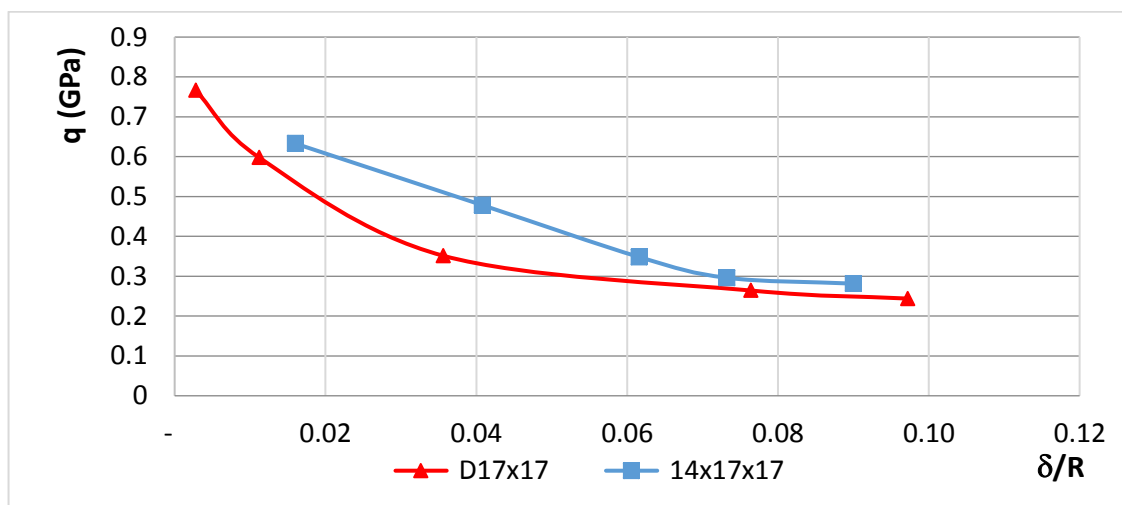


Рисунок 36 – Зависимости давления осадки от параметра незаполнения для компактных заготовок круглого и квадратного сечения

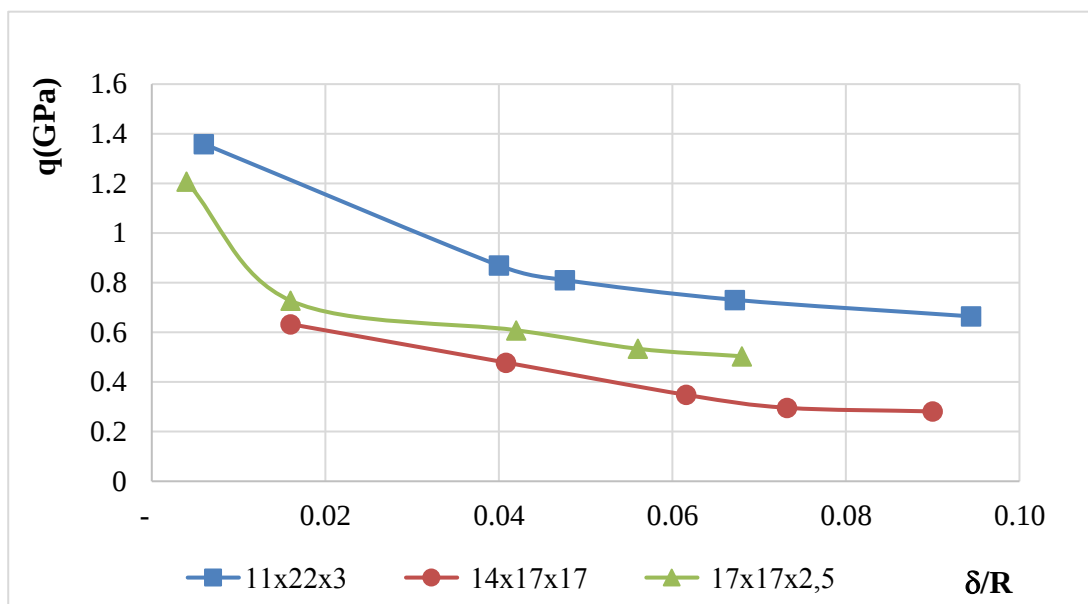


Рисунок 37 - Зависимости давления осадки от параметра незаполнения для длинных, компактных и тонких заготовок из полосового проката

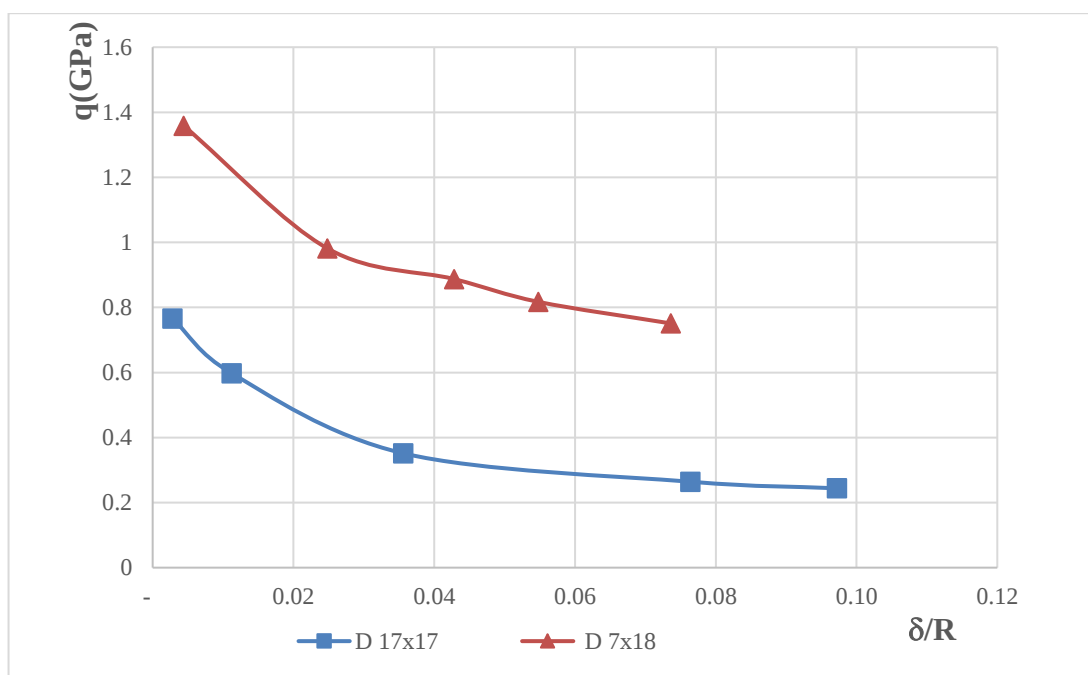


Рисунок 38 – Зависимости давления осадки от параметра незаполнения для компактных и длинных заготовок из прессованных прутков

3.4 Исследование влияния относительной высоты осажённых заготовок на величину давления

Как отмечалось выше, в главе 2, с уменьшением относительной высоты заготовок давление поперечной осадки существенно возрастает. Это связано, в первую очередь с увеличением площади контактной поверхности под пуансоном за счёт перехода объема металла с боковой поверхности. Кроме того, возрастает величина накопленной деформации и усиливается ее неравномерность. Проводилось компьютерное моделирование процесса закрытой осадки в закрытой цилиндрической матрице диаметром 25 мм заготовок из полосового, квадратного и круглого проката с размерами, указанными в таблице и с относительной высотой от $\bar{H}=0,01$ (тонкие заготовки) до $\bar{H}=0,1$ (короткие). На рисунке 39 показаны схемы поперечной осадки указанных профилей сечения.

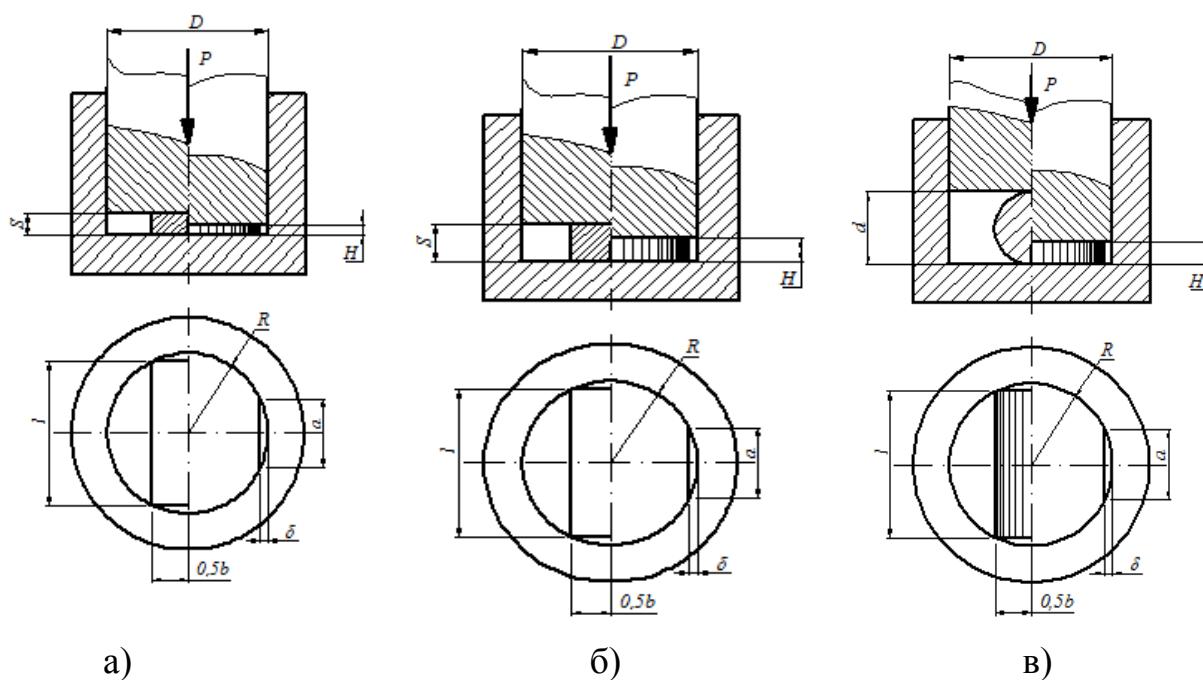


Рисунок 39 - Схемы закрытой поперечной осадки в цилиндрической матрице заготовок из полосового (а), квадратного (б) и круглого (в) в проката в исходном положении (слева) и в завершающей стадии (справа)

На основе результатов физического моделирования, приведенных в работах [3,19], построена математическая модель для давления поперечной осадки в виде

уравнения регрессии:

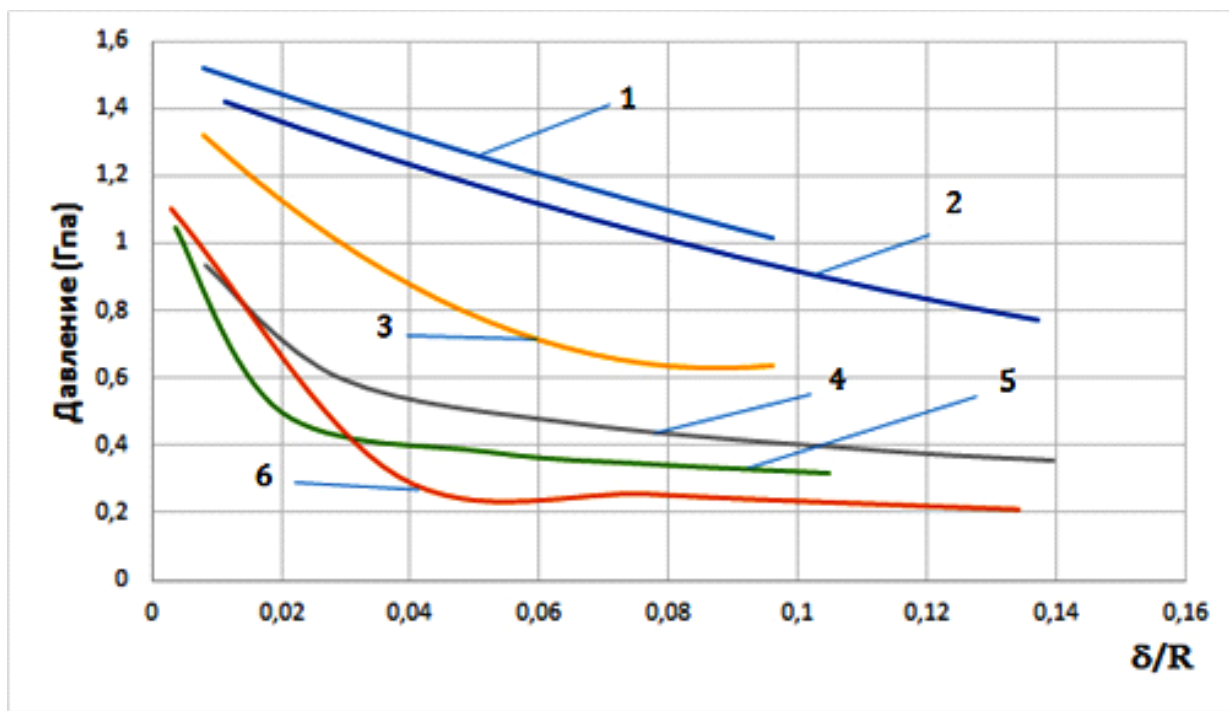
$$q, [\text{ГПа}] = 1,728 - 4,813 \frac{\delta}{R} - 1,348 \frac{H}{R} - 1,656 \frac{\delta H}{R^2} - 4,463 \frac{\delta^2}{R^2} + 0,213 \frac{H^2}{R^2} + 12 \frac{\delta H^2}{R^3} + 109,5 \frac{\delta^2 H}{R^3}$$

где δ – величина сегментной фаски, мм;

R – радиус матрицы, мм;

H – высота осажженной заготовки, мм.

В результате моделирования были получены зависимости давления поперечной осадки q от параметров относительной высоты H/D и относительной фаски δ/R (рисунок 40).



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 40 – Взаимосвязь давления осадки и относительной сегментной фаски

3.5 Имитационное моделирование процесса отрезки – штамповки

Физическое моделирование отрезки заготовок от прутков плоским пуансоном выполнено достаточно давно и подробно описано в [33-35]. В данных работах подтверждены ранее полученные результаты в виде анализа разделительного перехода, схема которого приведена на рисунке 41.

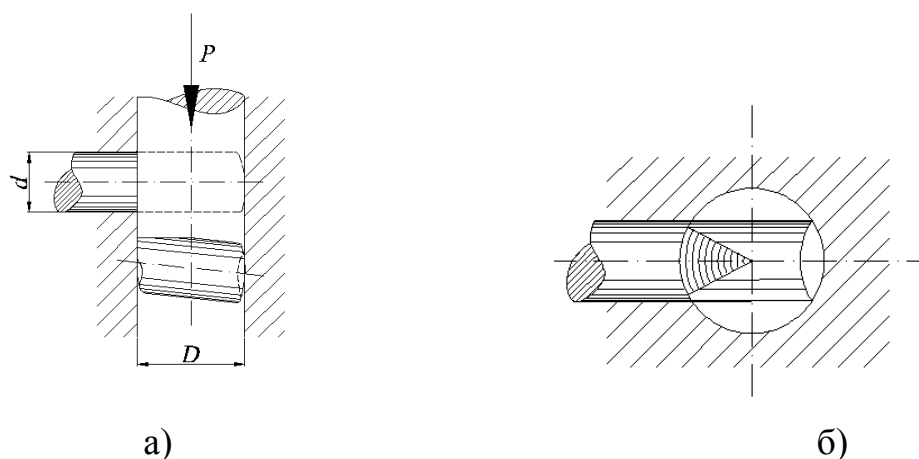
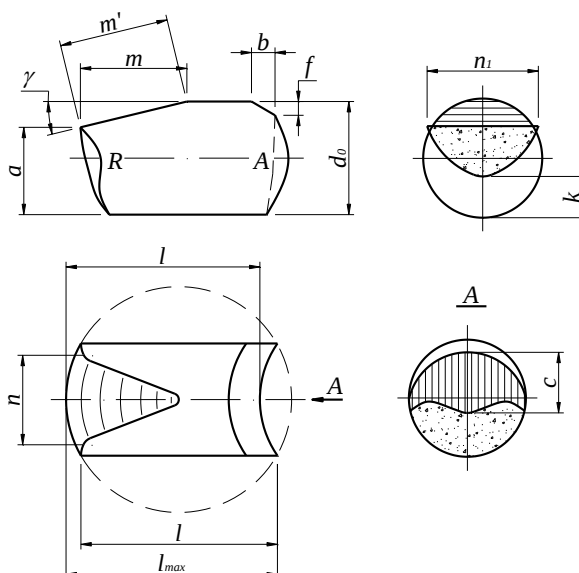


Рисунок 41 – Схема разделительного перехода отрезки прутковой заготовки (а, осевой разрез) и вид в плане (б).



d_0 - диаметр прутка, l_0 - длина отрезанной заготовки, γ – угол скоса, m - продольное смятие, n - поперечное смятие, f - поперечная утяжина, b - продольная утяжина, c - блестящий поясок переднего торца, k - блестящий поясок заднего торца

Рисунок 42 - Схема измерения геометрических параметров заготовки, отрезанной от прутка плоским пуансоном

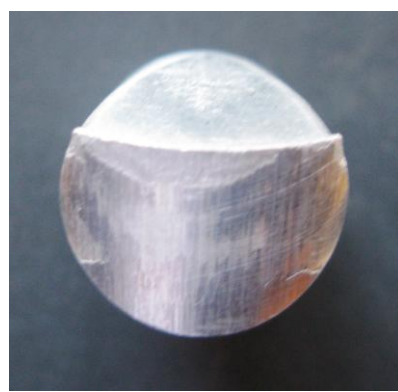
По вышеуказанной схеме разделительного перехода выполнены исследования [36], в результате которых разработана обобщенная схема измерения геометрических параметров данного процесса, представленная на рисунке 42.

В таблице 7 представлены результаты измерений геометрических параметров отрезанных заготовок.

На рисунке 43 изображены виды отрезанных заготовок сбоку (а), заднего торца (б), сверху (в) и переднего торца (г).



а)



б)



в)



г)

Рисунок 43 – Виды заготовок, отрезанных от алюминиевых прутков плоским пуансоном (2^x)

Таблица 7 – Геометрические параметры отрезанных заготовок

№ опыта	Значение геометрических показателей, мм					<i>m</i>
	<i>a</i>	<i>d_o</i>	<i>l</i>	<i>l_{max}</i>	<i>γ(°)</i>	
	1	2	3	4	5	6
1	14	17.8	31.7	35	14.407	14.8
2	14	17.9	32.0	34.5	15.606	13.97
3	14.2	17.9	31.8	34.5	14.19	14.64
Среднее значение $\bar{X}$	14,067	17,87	31,83	34,67	14,73	14,47
Дисперсия S^2	0,00889	0,00223	0,01557	0,05557	0,38777	0,12927
Среднекв.Откл. <i>S</i>	0,09428	0,04726	0,12477	0,23573	0,62271	0,35954

опыта	Значение геометрических показателей, мм						
	<i>n</i>	<i>c</i>	<i>k</i>	<i>n_l</i>	<i>f</i>	<i>b</i>	<i>m'</i>
	7	8	9	10	11	12	13
1	13.5	8.7	10.1	15	0.5	0.8	15.3
2	13.8	8.2	10.4	15	0.7	1.0	14.5
3	14.0	7.6	9.6	15.3	0.6	0.7	15.1
Среднее значение $\bar{X}$	13,77	8,17	10,03	15,1	0,6	0,833	14,97
Дисперсия S^2	0,04223	0,20223	0,1089	0,02	0,00667	0,01556	0,11557
Среднекв.Откл. <i>S</i>	0,35595	0,20551	0,33	0,14142	0,81650	0,12472	0,33995

где: $\bar{X} = \frac{\sum X_n}{n}$ - среднее значение параметра, мм

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n} \quad \text{- Дисперсия}$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n}} \quad \text{- Среднеквадратичное отклонение}$$

Исследования выполнялись в опытном штампе, установленном на гидравлическом прессе (рисунок 44). В этом же штампе проводились физические эксперименты по исследованию процесса осадки – выдавливания полуфабриката контакта из отрезанных заготовок, характерные стадии которого представлены на рисунке 45. Физические эксперименты подтвердили результаты конечно-элементного моделирования и характерные стадии процесса: выдавливание ножевой части контакта начинается уже в начале процесса осадки, так как сопротивление течению в щелевую полость меньше, чем заполнению цилиндрической формы матрицы для осадки.



Рисунок 44 – Опытный для отрезки – штамповки, установленный на прессе

Для исследований использовались прутки из технического алюминия АД1, изготовленные на мини-стане винтовой прокатки учебно-научного центра кафедры ОМД НИТУ «МИСиС» в Теплом стане. Металлографический анализ образцов из прутков показал хорошую проработку структуры прутков после поперечно-винтовой прокатки и повышенную технологическую пластичность при штамповке.



Рисунок 45 – Стадии формоизменения осадки – выдавливания отрезанной от прутка заготовки при изготовлении полуфабриката контакта

3.5.1 Физическое и компьютерное моделирование способа осадки для последующего выдавливания

При выборе схемы закрытой осадки (продольной или поперечной) были выполнены предварительные физические (на алюминиевых заготовках) и компьютерные эксперименты для подтверждения целесообразности той или

схемы. На рисунке представлены результаты экспериментов по закрытой продольной осадке заготовок с последующим выдавливанием ножевой части контакта.

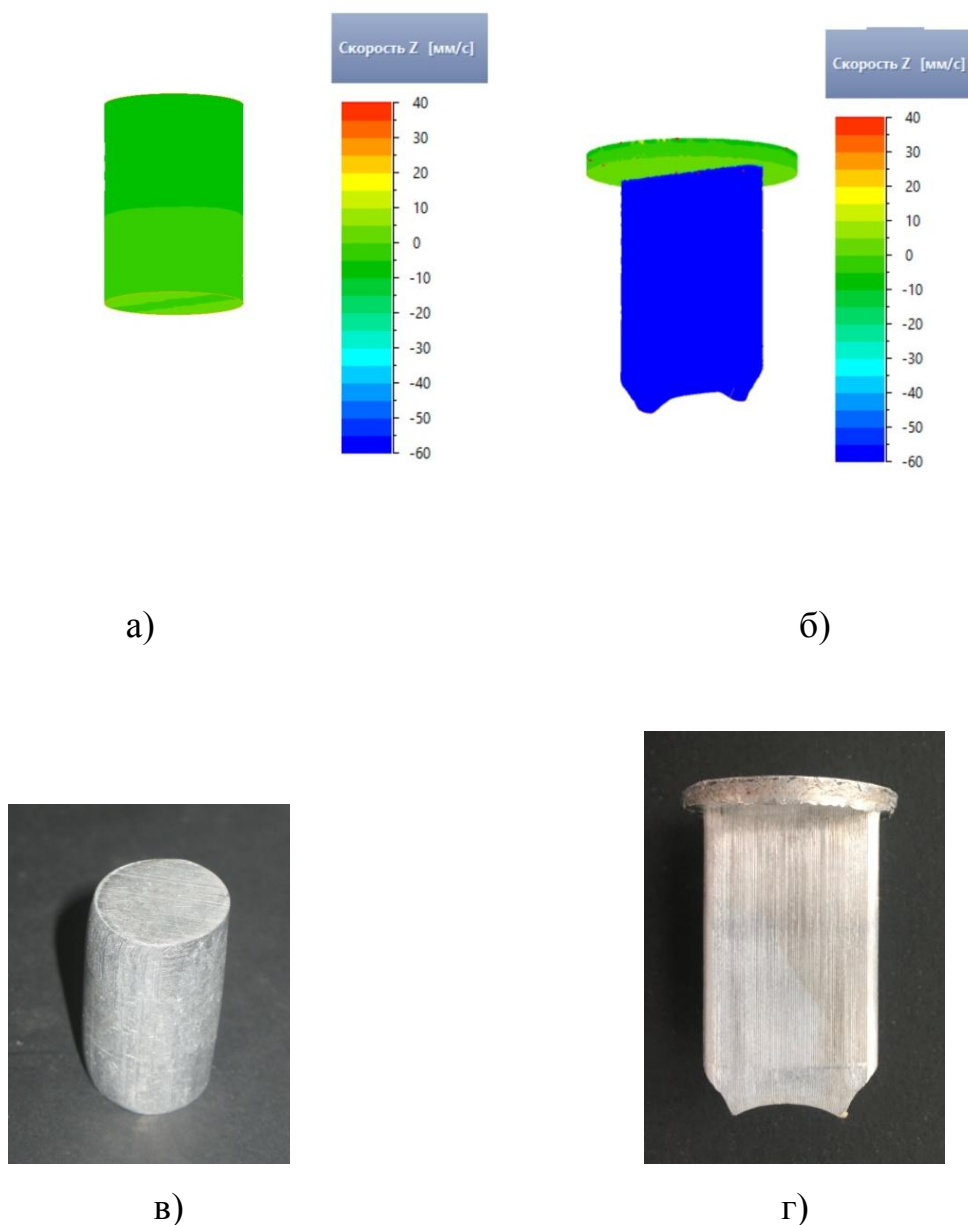


Рисунок 46 – Вид исходных заготовок (а, в) и полуфабрикатов контакта предохранителя (б, г), полученных на основе компьютерного (а, б) и физического (в, г) моделирования

Как следует из результатов компьютерного и физического моделирования, продольная схема закрытой осадки не обеспечивает получения ровной торцевой

части ножа из-за значительной неравномерности скоростей течения и деформации по ширине полуфабриката. В то же время, поперечная осадка позволяет получать ровный торец выдавленного полуфабриката (рисунок 46).

Этот факт стал основанием для окончательного выбора способа поперечной осадки для последующего выдавливания ножевой части контакта.



Рисунок 47 - Вид полуфабрикатов контакта предохранителя, полученных на основе физического (а) и компьютерного (б) моделирования из заготовки, изготовленной поперечной осадкой

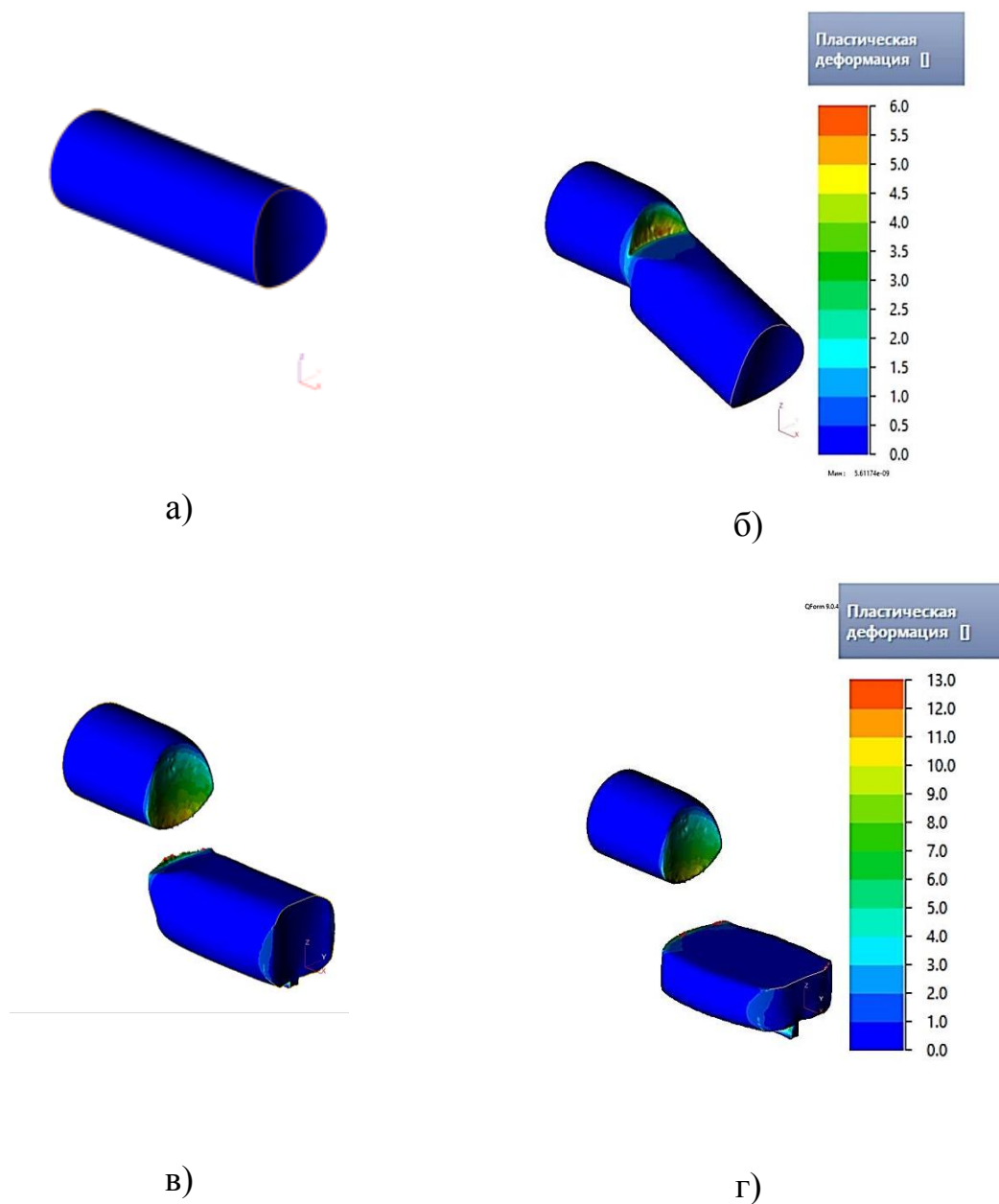
3.5.2 Компьютерное моделирование процесса отрезки – штамповки

Еще несколько десятилетий назад имитационное моделирование на компьютерной технике выполнено не было ввиду низкого быстродействия ЭВМ того поколения и недостаточной оперативной памяти для хранения данных при решении задач с большими пластическими деформациями. В настоящее время оказалось возможным выполнить компьютерное моделирование процесса отрезки заготовок от прутков плоским пуансоном в современных конечно-элементных комплексах *DEFORM-3D* и *Q-FORM-3D*.

С этой целью построена твердотельная модель процесса в *SOLIDWORKS*, включающая разработку чертежа оснастки и его экспорт в вычислительные конечно-элементные комплексы. На основании компьютерного моделирования

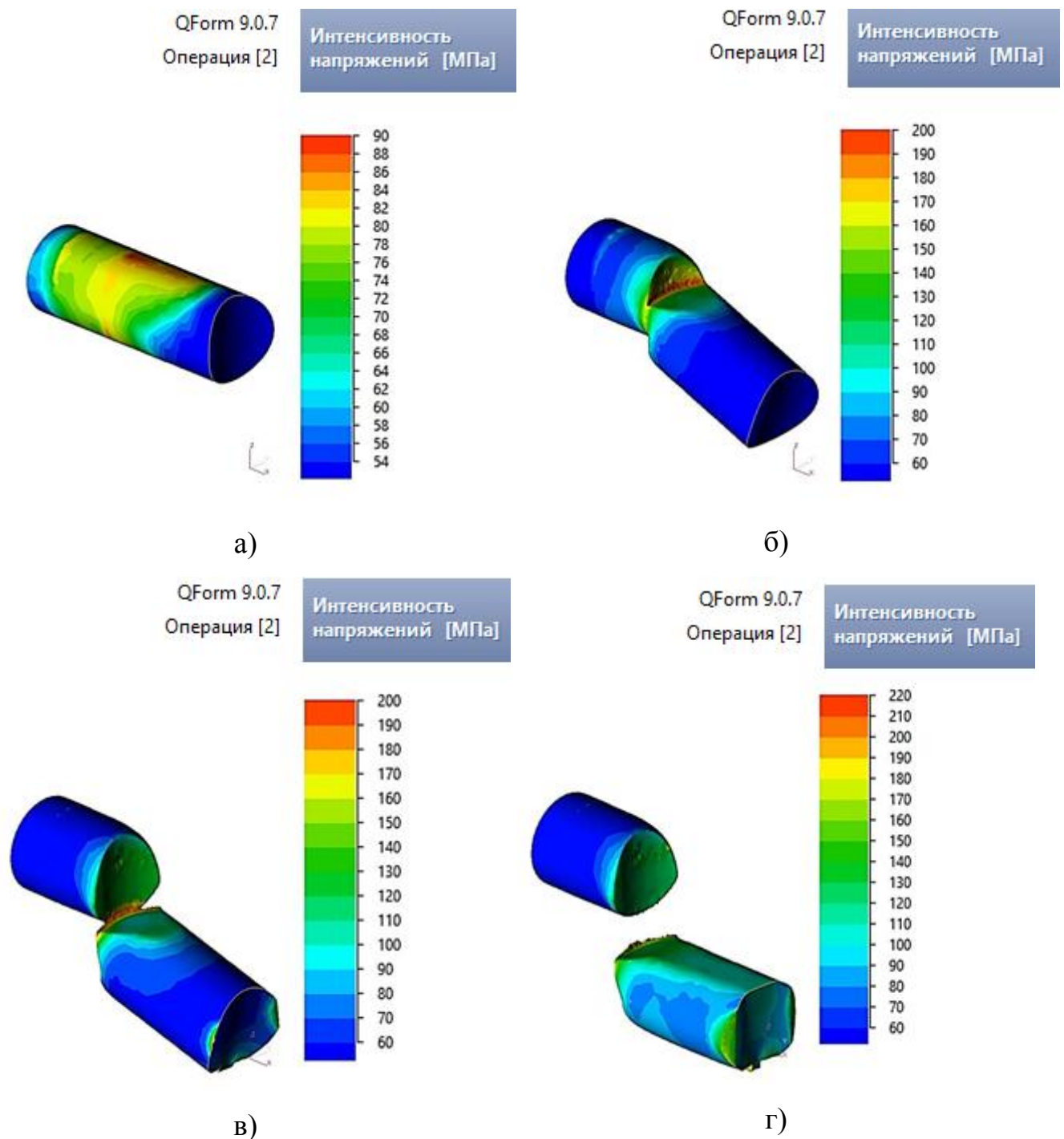
получены результаты расчета силовых параметров и напряженно-деформированного состояния.

На рисунке 48 представлены поля распределения накопленной деформации, на рисунке 49 – поля распределения интенсивности напряжений.



а) – исходное положение; б) – при максимальной силе отрезки; в) – в начале осадки и выдавливания; г) – в установившейся стадии

Рисунок 48 – Поля распределения накопленной деформации на разных стадиях

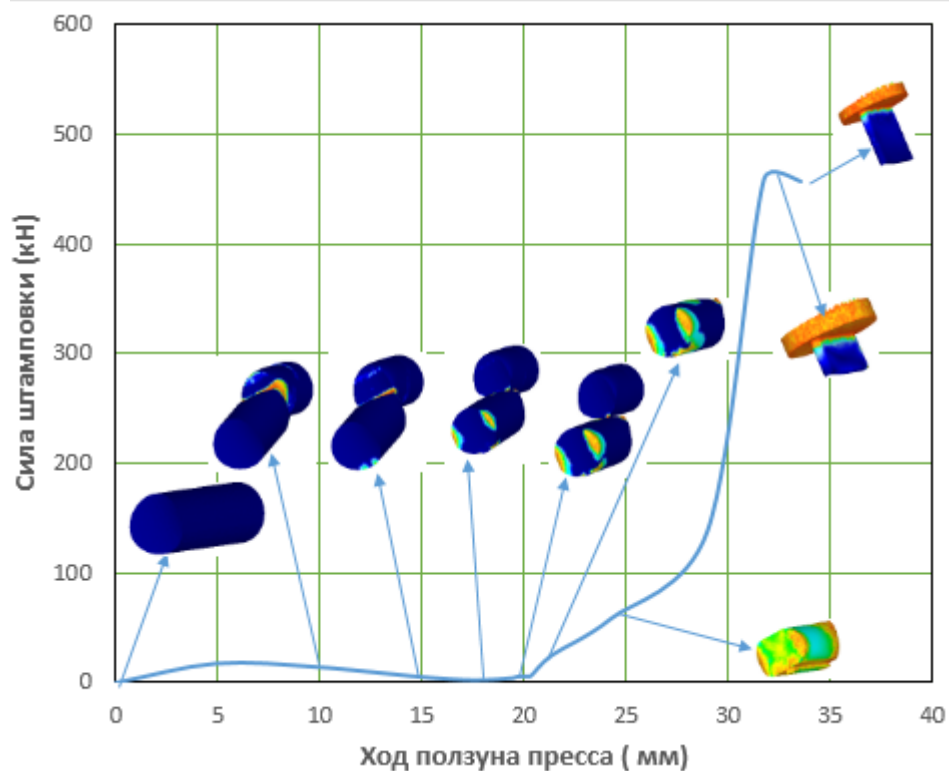


а) – в начале нагружения; б) – при максимальной силе отрезки; в) – в начале осадки и выдавливания; г) – в установившейся стадии

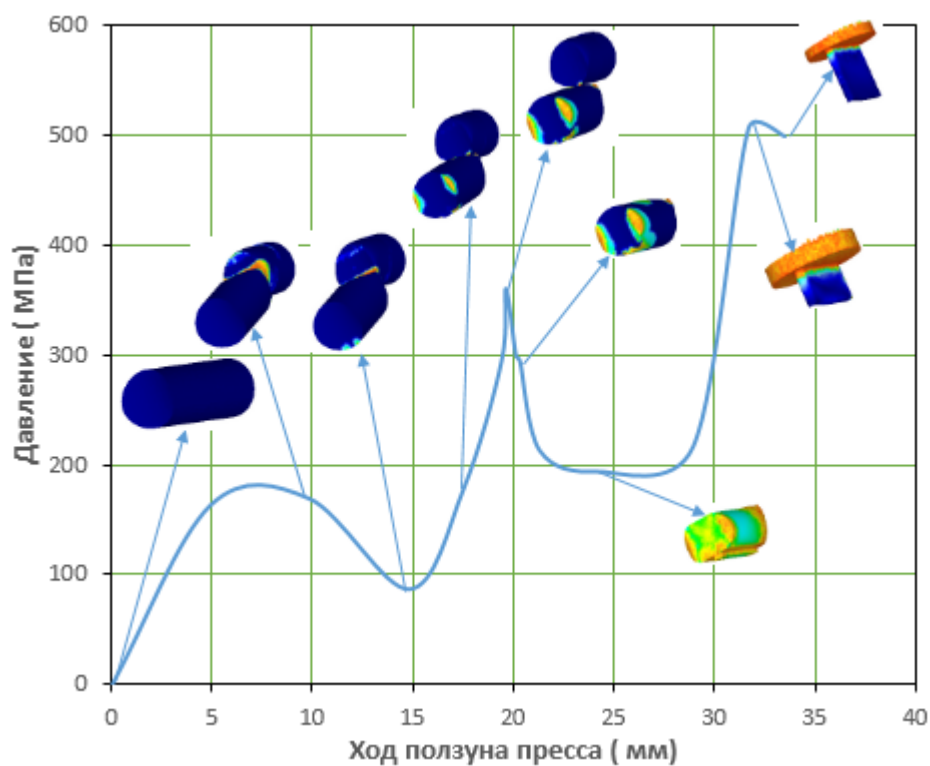
Рисунок 49 – Поля распределения интенсивностей напряжений на разных стадиях отрезки и в начале штамповки

Зависимости силовых параметров процесса отрезки – штамповки полуфабриката контакта от хода ползуна пресса, построенные в результате

расчетов в *DEFORM-3D*, представлены на рисунке 50.



а)



б)

Рисунок 50 - Зависимость силы (а) и давления (б) от перемещения при отрезке – штамповке полуфабриката контакта

3.6 Компьютерное моделирование штамповки выдавливанием для изготовления полуфабриката контакта

На рисунке 51 представлены поля средних напряжений в заготовке в процессе выдавливания полуфабриката контакта

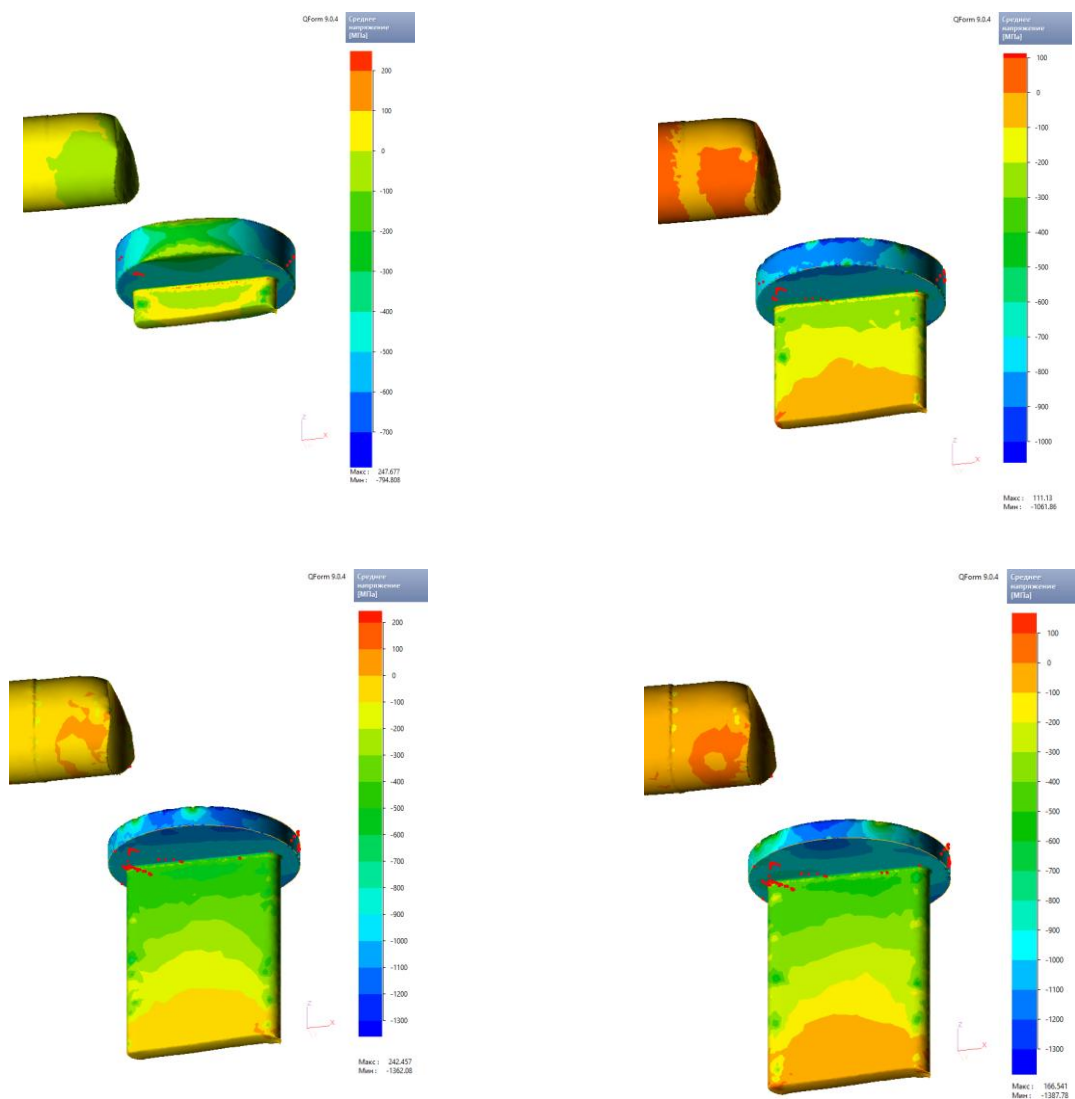


Рисунок 51 - Поля средних напряжений в заготовке в процессе выдавливания полуфабриката контакта

Значительное увеличение средних напряжений наблюдается в заключительной стадии выдавливания ножевой части контакта, но они не превышают предела прочности и не приводят к разрушению.

Результаты теоретических расчетов, описанных в главе 2, были проверены экспериментально, с помощью физического и компьютерного моделирования. Физические эксперименты по штамповке прутковых заготовок осадкой и выдавливанием проводились в экспериментальном устройстве (рисунок 52) на кривошипном прессе УН32-100 силой 1 МН.

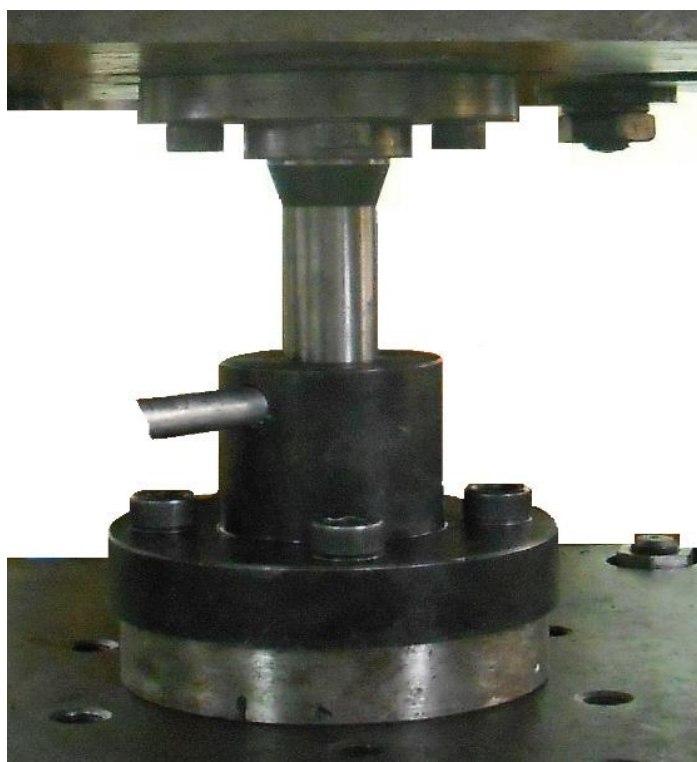


Рисунок 52 – Экспериментальное устройство для выявления условий образования утяжины при выдавливании ножевой части контакта

Возможность образования дефекта в виде утяжины, выявленная в теоретическом анализе выше, подтверждена физическим моделированием. Зарождение, развитие и разрушение утяжины были установлены в ходе экспериментов с полосовой заготовкой при отсутствии смазки и максимальном трении (рисунок 53). В то же время, выдавливание контакта из прутковой заготовки происходило без образования утяжины.

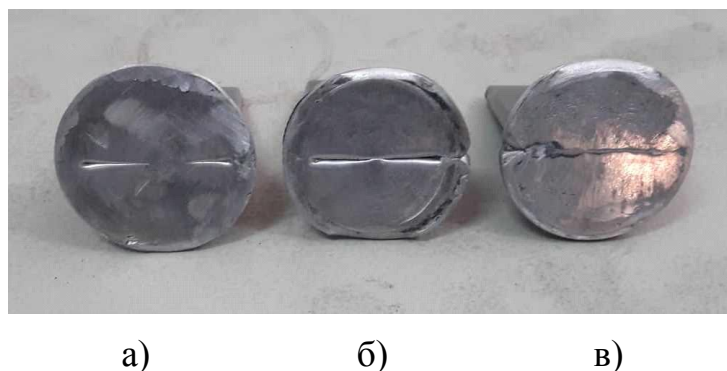


Рисунок 53 – Общий вид основания отштампованных контактов с зарождением (а), развитием (б) и разрушением (в) дефекта утяжина

Исследование макроструктуры выдавленных полуфабрикатов, изготовленных из полосовой заготовки подтвердило наличие утяжины (а) и её отсутствие (б) в осевом сечении контакта, полученного из прутков круглого сечения (рисунок 54).

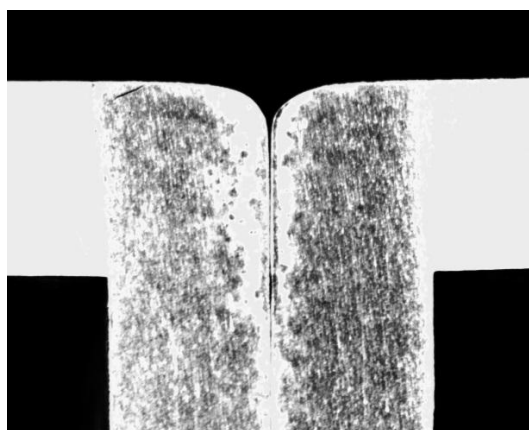


Рисунок 54 - Макрошлифы осевой зоны выдавленной ножевой части контакта с образованием (а) и без образования (б) дефекта - утяжины

Компьютерное моделирование процесса выдавливания ножевой части полуфабриката контакта позволило определить условия зарождения и развития утяжины. Об этом свидетельствует значительная неравномерность скоростей течения и деформаций, а также деформационный разогрев выдавливаемой части и, соответственно, повышенная пластичность в этой зоне. Скриншоты этих

характеристик напряженно-деформированного состояния представлены на рисунке 55.

На основании экспериментов был сделан вывод о необходимости использования круглого проката и нецелесообразности применения полосовой заготовки для изготовления полуфабриката контакта.

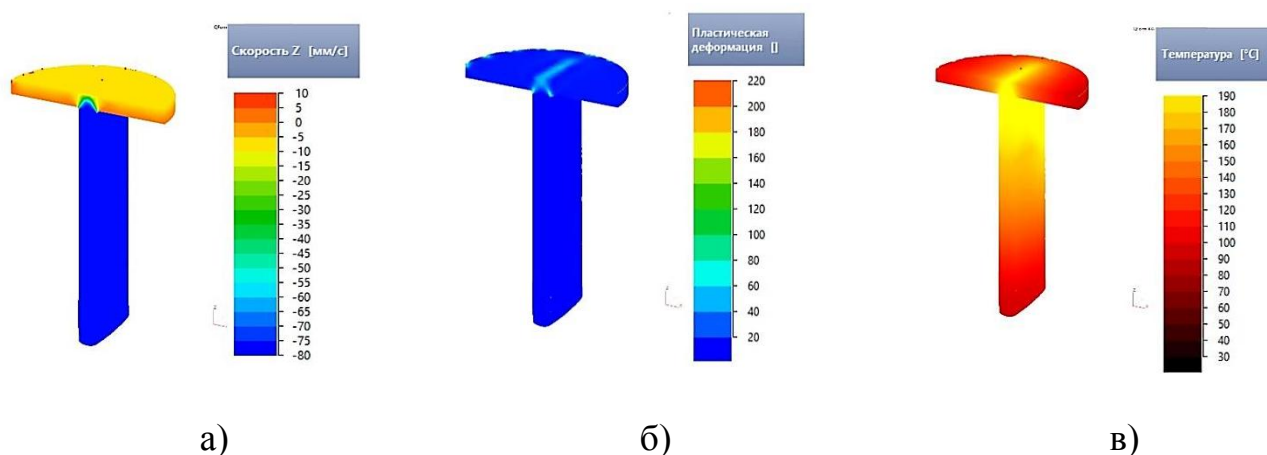


Рисунок 55 – Поля распределения скоростей течения (а), деформации (б) и температур при образовании дефекта – утяжины.

Выводы по главе 3:

1. В завершающей стадии поперечной осадки сила штамповки имеет близкие значения для всех типов заготовок (круг, квадрат, полоса), так как она определяется прежде всего площадью проекции в плане для одной и той же матрицы.

2. Значительные расхождения величины давления связаны прежде всего с неравномерностью деформации при осадке различных длин и форм поперечного сечения. Наименьшие давления возникают при осадке прутков, наибольшие – при деформации полосовой заготовки, из чего следует вывод о целесообразности использования круглого сечения.

3. Основными технологическими факторами, влияющими на силовые параметры являются относительная высота осажённых заготовок величина сегментной фаски. С их уменьшением давление осадки и деформирующая сила

существенно возрастают. При минимальных значениях для тонких заготовок давление может достигать 1,4...1,5 ГПа, что приводит к низкой стойкости штамповой оснастки.

4. Для снижения нагрузки на инструмент осадку целесообразно ограничивать значениями относительной сегментной фаски $\delta/R = 0,04 \dots 0,06$.

5. В процессе выдавливания ножевой части контакта в очаге деформации температура повышается до 200 °С, что приводит к снижению напряжения течения в этой зоне и интенсивной пластической деформации.

6. Для предотвращения образования дефекта в виде утяжины необходимо минимизировать контактное трение между инструментом и заготовкой за счет повышения чистоты поверхности оснастки и применения смазок.

ГЛАВА 4. ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

4.1 Методика проектирования процесса изготовления осесимметричных полуфабрикатов отрезкой - штамповкой

В основу данной методики положена разработанная автором классификация цилиндрических заготовок из алюминиевых прутков и осесимметричных полуфабрикатов (таблица 8).

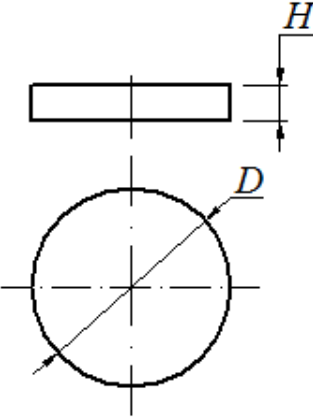
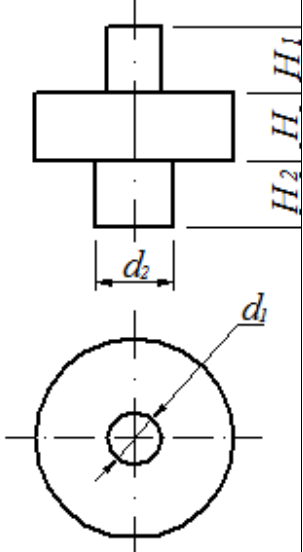
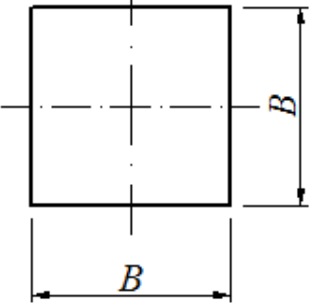
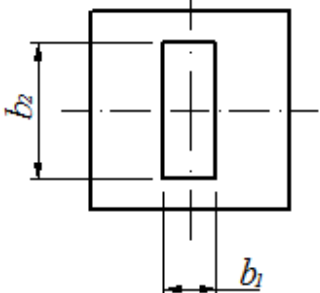
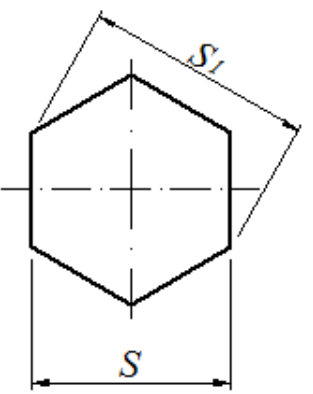
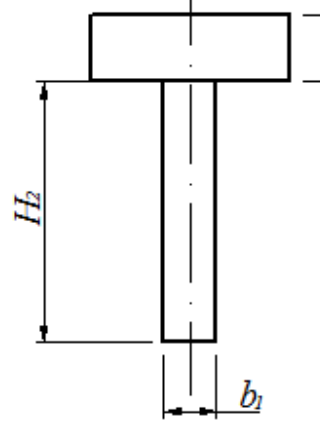
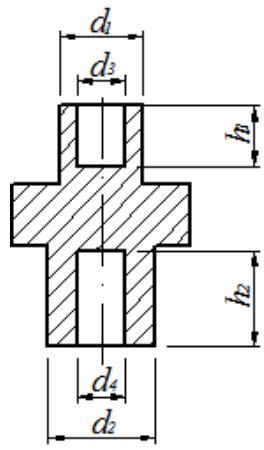
На основании теоретических (глава 2) и экспериментальных исследований (глава 3) была разработана методика проектирования однооперационного технологического процесса изготовления осесимметричных полуфабрикатов из алюминиевых прутков отрезкой с последующей штамповкой осадкой, выдавливанием или их сочетанием. Исходными данными для проектирования являются чертеж полуфабриката, выполненный в одном из графических редакторов – *COMPASS* или *SOLIDWORKS*. На основании чертежа полуфабрикат разбивается на элементарные фигуры, для которых рассчитываются объемы, суммируются и определяется объем исходной заготовки.

В том же графическом редакторе выполняется твердотельное моделирование инструмента и дополнительной штамповой оснастки с возможностью экспорта модели в вычислительную конечно-элементную систему (ВС). Далее чертеж исходной заготовки экспортируется в препроцессор ВС, совмещается с твердотельной моделью оснастки, задаются граничные условия, вводятся механические свойства заготовки, вид оборудования и выполняется расчет основных кинематических и деформационных параметров процесса.

Результаты расчета хранятся в постпроцессоре ВС, и на их основе из интерфейса строятся поля перемещений, скоростей течения, интенсивности скоростей деформации, накопленной деформации, интенсивности напряжений,

распределения вероятностной повреждаемости, средних напряжений на поверхности и в объеме, температуры и давлений.

Таблица 8 - Классификация осесимметричных полуфабрикатов, изготовленных отрезкой - штамповкой

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

Возможно выполнять анализ образования дефектов в виде утяжин, зажимов и складок, которые свидетельствуют о нестабильности процесса.

Ниже представлен алгоритм методики проектирования процесса изготовления осесимметричных полуфабрикатов отрезкой от алюминиевых прутков и последующей закрытой штамповкой.

1) Ввод исходных данных:

- Геометрические параметры $(D, H, B, S, S_1, d_1 \dots d_n, H_1 \dots H_n, h_1 \dots h_n)$
- Материал и его механические свойства $(\sigma_s, \sigma_b, \Psi, \delta)$.

2) Определение объема заготовки

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

$$V_{заг} = V_1 + \dots + V_i$$

3) Определение диаметра исходного прутка

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

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

В таблице 9 приведена идентификация конструктивно-технологических признаков осесимметричных полуфабрикатов для разработанного алгоритма, а на рисунке 56 - алгоритм методики автоматизированного проектирования процесса изготовления осесимметричных полуфабрикатов отрезкой от алюминиевых прутков и последующей закрытой штамповкой.

Данный алгоритм был программно реализован на алгоритмическом языке Visual Basic .NET, и предназначен для работы на компьютере с операционной системой Windows 64 bit на платформой .NET Framework 4.5.

На рисунке 57 представлен интерфейс панели задач ввода исходных данных и результатов расчета.

Таблица 9 - Идентификация конструктивно-технологических признаков

№	Наименование признаков	Размерность	Обозначение
1	Диаметры компонентов детали	мм	$D, D1, D2, D3, D4, D5$
2	Высоты компонентов детали	мм	$H, H1, H2, H3, H4, H5$
3	Размеры матрицы при выдавливании	мм	A, B
5	Радиус матрицы при осадке	мм	R
6	Величина утяжины при выдавливании или величина сегментной фаски при осадке	мм	Del
7	Длина прутка (заготовки)	мм	L_{phoi}
8	Диаметр исходного прутка	мм	D_{phoi}
9	Объем заготовки	мм ³	V_{phoi}
10	Контактная площадь между пуансоном и заготовкой	мм ²	$dTich$
11	Предел текучести	МПа	$SigmaS$
12	Безразмерное давление	-	Q_SigmaS
13	Давление	МПа	Q
14	Усилие	кН	P



Рисунок 56 – Алгоритм методики автоматизированного проектирования

РАСЧЁТ ПРОЦЕССА ОТРЕЗКИ-ШТАМПОВКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ ПРУТКОВ

Геометрия детали

☐ Плоский-Круглый
☐ Плоский-Квадратный
☐ Плоский-Шестигранный
☐ Круглый с выступами
☐ Квадратный с выступами
☐ Круглый с выступами и отверстиями
☒ Круглый со сплюснутым выступом

H1= 3 D= 34
 H2= 36 B= 24
 R= 2 S= 4

* Размеры указаны в миллиметрах

Выбор операции

☒ Выдавливание
☐ Осадка

Длина прутка (заготовки), L [мм] 26
 Предел текучести, σ_s [МПа] 90

Размеры матрицы, [мм] A= 17
 B= 2
 Высота выдавливания, h [мм] 3
 Величина утяжины, δ [мм] 0

РАСЧЁТ

ВЫВОД РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЁТА

Объем заготовки, $V_{\text{заг}}$ [мм³] 6306.45
 Диаметр исходного прутка, d [мм] 17.57
 Безразмерное давление, q/σ_s [-] 5.75
 Давление, q [МПа] 517.5
 Усилие, P [кН] 469.85

OK

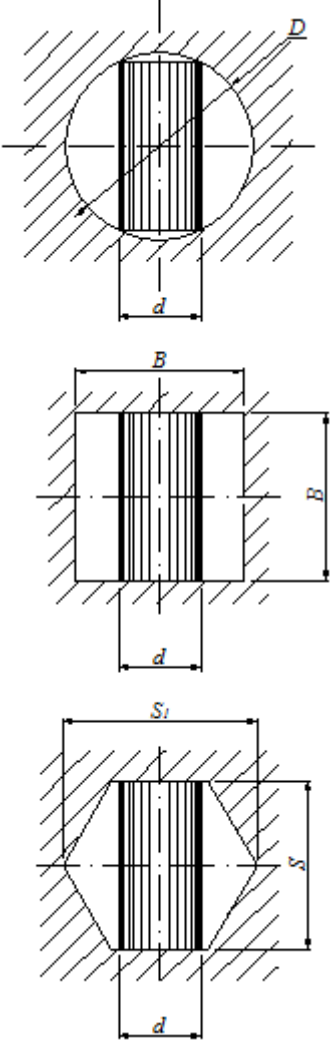
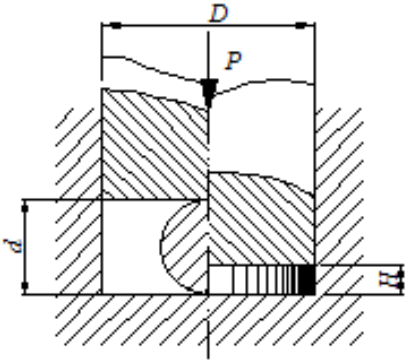
Рисунок 57 – Интерфейс панели задач ввода исходных данных и результатов расчета

В программе расчета использованы соотношения геометрических размеров осесимметричных полуфабрикатов и исходных прутков, определяемые из соотношений таблицы 10.

4.2. Разработка конструкции опытно-промышленного штампа

На основании анализа результатов теоретических расчетов (глава 2) и экспериментальных исследований (глава 3) была разработана конструкция опытно-промышленного штампа, представленного на рисунке 58.

Таблица 10 – К определению размеров исходных прутков при поперечной осадке в закрытой матрице

Вид в плане	Схема процесса – Поперечная осадка	Взаимосвязи размеров
		$H \approx 0,22D$ $l \approx 0,87D$ $D \approx 2d$ $H \approx 0,44D$ $H \approx 0,2B$ $d \approx 0,5B$ $l = B$ $S = L = 1,73d$ $H = 0,52d$

Штамп состоит из нижней (1) и верхней (9) плиты, соединенных между собой двумя парами направляющих колонок (19) и втулок (13). На нижней плите при помощи винтов и штифтов закреплен матрицедержатель (3) с осевым отверстием для установки толкателя (2) и выталкивателя (17). На матрицедержателе установлена бандажированная матрица (5,6) для выдавливания ножевой части контакта. На бандажированной матрице закреплена ножевая матрица (7) с

радиальным отверстием для отрезки заготовки от прутка и осевым отверстием для ее поперечной осадки.

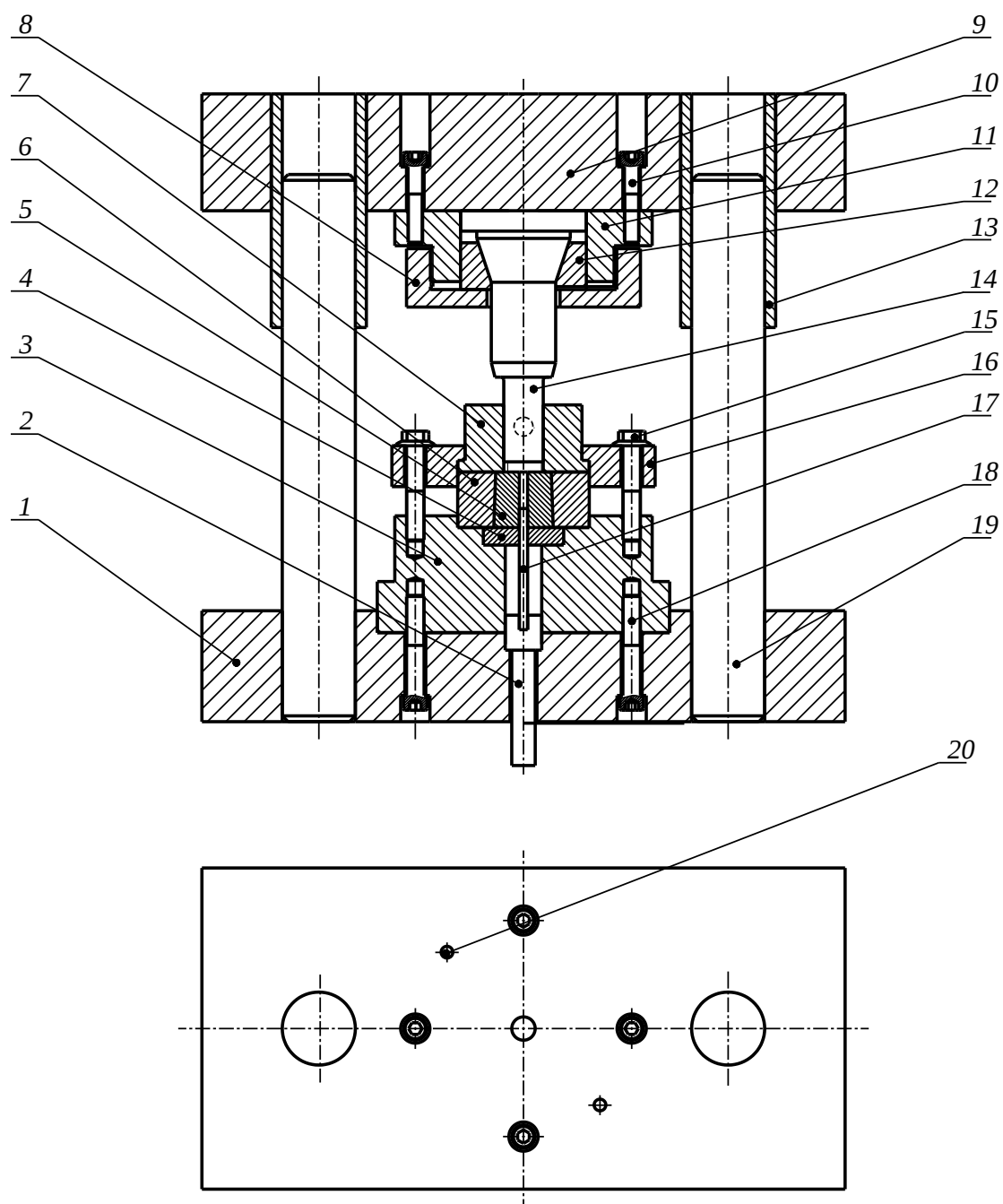


Рисунок 58 – Штамп для изготовления контакта предохранителей

На верхней плите при помощи винтов и штифтов закреплен пунсонодержатель (10) с установленными в нем пуансоном (12), удерживаемым конической втулкой (11) и закрепленной гайкой (8). Для обеспечения соосности пуансона и матрицы их соединяют в рабочем (крайнем нижнем) положении, растачивают два

отверстия и соединяют нижнюю плиту с матрицедержателем при помощи штифтов (20).

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 прессы. После окончания рабочего хода прессы пуансон вместе с ползуном перемещается вверх в исходное положение, а выдавленный полуфабрикат контактом удаляется выталкивателем на зеркало матрицы и убирается из рабочей зоны прессы. В дальнейшем цикл повторяется.

Выводы по главе 4:

- На основе теоретического анализа и экспериментальных исследований разработана научно-обоснованная методика проектирования процесса отрезки-штамповки для изготовления цилиндрических заготовок и осесимметричных полуфабрикатов из алюминиевых прутков;

- Разработано устройство опытно-промышленного штампа для изготовления осесимметричных полуфабрикатов из алюминиевых прутков, в том числе – детали «контакт силового предохранителя», пригодное для практического применения в электротехнической и радиоэлектронной отраслях.

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 целевой 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 экспериментальным опробованием безотходного процесса отрезки – штамповки и разработкой устройства для изготовления детали «контакт силового предохранителя», позволившего значительно повысить производительность.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Константинов И.Л., Сидельников С.Б. Основы Технологических Процессов Обработки Металлов Давлением. Учебник.— Красноярск: СФУ, 2015. - 488 С.
2. Соловцов С.С. Производство точных заготовок отрезкой и вырубкой // КШП-ОМД, 2005, №9, с.22-24.
3. 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.
4. Соловцов С.С. Безотходная разрезка сортового проката в штампах. — М.: Машиностроение, 1985. -176 с.
5. Лисунец Н.Л. Повышение эффективности процессов изготовления полуфабрикатов и заготовок из металлопроката на основе моделирования. Сб. докладов МНТК «ОМД-2014», ч.2-М.: ООО «Белый ветер», 2014, -515 с., с.280-285.
6. Кислый П.Е., Чижик-Полейко В.Б. Способ изготовления изделий круглого сечения. Патент СССР № 110791223, 1982, БИ № 14.
7. Соловцов С.С., Козьмин А.А., Лисунец Н.Л. Устройство для безотходного изготовления из прутков коротких заготовок. Патент СССР № 15322056, 1989, БИ № 48.
8. ГОСТ 4784- 2019. Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки.
9. ГОСТ 21488 – 76. Прутки прессованные из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия.
10. Экспериментальные методы механики деформируемых тел (технологические задачи обработки давлением) / В.К.Воронцов, П.И.Полухин, В.А.Белевитин, В.В.Бринза. М.:Металлургия, 1990. -480 с.

11. Воронцов, А.Л. Анализ методов теоретического исследования процессов обработки металлов давлением // Производство проката. 2003. № 9. с. 6-11.
12. Степанский, Л. Г. Расчеты процессов обработки металлов давлением [Текст]. - Москва : Машиностроение, 1979.- 215 с.
13. Воронцов А. Л. Теория штамповки выдавливанием. М.: Машиностроение. 2004. -721 с.
14. П.И. Золотухин, И.М. Володин. Основные положения теории обработки металлов давлением. Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2013.-240 с.
15. Новик Ф.С., Арсов Я.Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. М.: Машиностроение; София: Техника, 1980.- 304 с.
16. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: МИР, 1975.-543 с.
17. Сегерлинд Л. Применение Метода Конечных Элементов. М.: Мир, 1979.- 392 с.
18. Антонюк Ф.И. Исследование технологических параметров закрытой поперечной осадки.- Дисс.канд.техн.наук: 05.03.05. М.: Станкин, 1975.-164 с.
19. Лисунец Н.Л. Силовой режим закрытой поперечной осадки в цилиндрической матрице // Кузнечно-штаповочное производство, 1990, №6.с.2-3
20. А.З.Журавлев. Основы теории штамповки в закрытых штампах. М.: Машиностроение, 1973.-224с.
21. А.л.воронцов. Теория и расчеты процессов обработки металлов давлением. Учебное пособие. Том 2. М.: мгу, 2014, 448с.
22. Антонюк Ф.И., Логутенкова Е.В. Верхняя оценка удельных сил холодной объемной штамповки низких поковок в закрытых штампах//Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6.; URL: <http://science-education.ru/article/view?id=16123>.
23. QForm / Моделирование процессов обработки металлов давлением - <http://www.qform3d.ru>.
24. DEFORM-3D / Инжиниринговая компания «ТЕСИС» - https://tesis.com.ru/cae_brands/deform/3d.php.

25. Система трехмерного автоматизированного проектирования - <https://www.solidworks.com/ru>.
26. Джонсон В., Кудо Х. Механика процессов выдавливания металла.-М.: Металлургия, 1965. -174 с.
27. Джонсон В., Меллор п.б. Теория пластичности для инженеров. Пер. С англ. А.г. Овчинникова. М.: Машиностроение, 1979.-567 с.
28. Ю.А.Алюшин. Определение удельных усилий и минимальных обжатий при прессовании методом верхней оценки. КШП-ОМД, №4, 1965, с.19-24.
29. Вайсбурд Р.А., Партии А.С. Исследование условий образования утяжины и расчет ее формы при выдавливании материала в щелевую полость. // Известия вузов. Машиностроение. 1999. -№ 1. - С. 30-34.
30. Дмитриев А.М., Воронцов А.Л. Прогнозирование утяжин при штамповке // Справочник инженера. 2004. №11. С. 29-32.
31. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение.
32. ГОСТ 9651-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение при повышенных температурах.
33. Дефектообразование в процессах холодного выдавливания / Л. И. Алиева, Я.Г. Жбанков, Н.С. Грудкина, П.Б. Абхари // Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти. Матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції». – Київ - Херсон: НТУУ «КПІ», 2016. – С. 51–53.
34. Логинов Ю.Н., Ершов А.А. Моделирование в программном комплексе QForm образования пресс-утяжины при прессовании // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2013. – № 7. – С. 42-46.
35. Гончарук К. В., Алиева Л. И., Грудкина Н. С., Таган Л. В., Шкира А. В. Анализ влияния формы инструмента на энергосиловые параметры при комбинированной осадке // Научный вестник ДГМА. № 3 (18Е), 2015, с.71-79
36. N. L. Lisunets. Usage of physical and mathematical simulation for improvement of the process of metal shear cutting. CIS Iron and Steel Review — Vol. 17 (2019), p.34-35

37. Сидельников С. Б. Комбинированные и совмещенные методы обработки цветных металлов и сплавов: монография / С. Б. Сидельников, Н. Н. Довженко, Н. Н. Загиров. – М.: МАКС Пресс, 2005. – 344 с.
38. Алиева Л. И. Процессы комбинированного пластического деформирования и выдавливания /Л. И Алиева // Обработка материалов давлением: сб. науч. тр. – Краматорск: ДГМА, 2016. – № 1 (42). – С. 100–108. – ISSN 2076-2115.
39. Фастыковский А.Р. Развитие научных основ и разработка совмещенных методов обработки металлов давлением, обеспечивающих экономию материальных и энергетических ресурсов. [Текст]: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.05 / А. Р. Фастыковский. - Новокузнецк, 2011. - 38 с.
40. Соловцов С.С., Лисунец Л.Н., Атанасов А.М. Эффективный технологический процесс изготовления коротких заготовок из алюминиевого проката //Кузнечно-штамповочное производство, 1992, №5. с. 10-12.
41. Solomonov K.N., Tishchuk L.I. Review of software for simulation of metal forming processes // Collective monograph on the XV International Scientific Conference «New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering». – Czestochowa (Poland), No 40, 2014. P. 287-291.
42. Конечно-элементное моделирование технологических процессовковки и объемной штамповки : учебное пособие [А. В. Власов и др.] ; под ред. А. В. Власова. – М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019.- 383 с.
43. Ковка и штамповка: Справочник. В 4-х т. 2-е изд., перераб. и доп. / под общ. Ред. Е.И.Семенова.М.: Машиностроение, 2010. Т.3. Холодная объемная штамповка. – 352 с.
44. Зайдес С. А., Исаев А. Н. Технологическая механика осесимметричного деформирования. Иркутск: Иркутский ГТУ. 2007. -432 с.
45. Попов Е. А. Основы теории листовой штамповки. М.: Машиностроение. 1977. -278 с.
46. Романовский В. П. Справочник по холодной штамповке. Л.: Машиностроение. 1979.- 520 с.

47. Сторожев М. В., Попов Е. А. Теория обработки металлов давлением. М.: Машиностроение. 1977. -423 с.
48. Технология конструкционных материалов / А. М. Дальский, Т. М. Барсукова, В. С. Гаврилюк, А. М. Дмитриев и др. М.: Машиностроение. 2005. -592 с.
49. S. Lampman. Cold Extrusion Of Aluminum Alloys. Aluminum Science And Technology. Asm International, Volume 2a, 2018, P.P.311-314
50. Антощенко Ю.М., Таупек И.М. Исследование процесса осесимметричной осадки методами компьютерного моделирования // Изв. ВУЗов. Черная металлургия. – 2015. – №1. – С.49-53.
51. Баранов Г.Л. Определение контактных напряжений при осадке прямоугольной полосы // Изв. ВУЗов. Цветная металлургия. – 2015. – №4. – С.25-31.
52. Solomonov K.N. Classification of the Simulation Methods for Various Applications // Proceedings of the XIII International Scientific Conference «New technologies and achievements in metallurgy and materials engineering». – Czestochowa (Poland), May 29-31, 2012. – P. 522-528.
53. Резвых Р.В. Актуализация модели для расчетов процессов холодной объемной штамповки в программе Q-Form // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2012. – № 6. – С. 25-30.
54. Лисунец Н.Л., Деметрашвили И.С, Хоанг Мань Жой. Разработка и исследование процесса изготовления цилиндрических заготовок из сплавов цветных металлов для штамповки на основе моделирования// Цветные металлы, 2018, №5, С.82-86 (ВАК).
55. Лисунец Н.Л., Хоанг Мань Жой. Исследование силового режима закрытой штамповки поперечной осадкой и выдавливанием в прямоугольной матрице //КШП-ОМД, 2019, №10, с.(ВАК).
56. Хоанг Мань Жой. Исследование и разработка процесса отрезки – штамповки для изготовления алюминиевых контактов на основе моделирования // Известия ТулГУ, 2019, №12, с. 131-135(ВАК).
57. Лисунец Н.Л., Хоанг Мань Жой, Деметрашвили И.С. Разработка и исследование технологии изготовления тонколистовых цилиндрических

заготовок для штамповки на основе моделирования. // Вестник МГТУ «СТАНКИН», 2019, №4, с.60-64. (ВАК)

58. 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.

59. 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 119-125;

60. 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;

61. 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. 414-419.

62. 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 (РИНЦ).

63. 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., ил., с.224-228

64. 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

65. 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 (РИНЦ).

66. 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

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Перечень сокращений слов

№	Наименование признаков	Обозначение
1	Обработка металлов давлением	<i>ОМД</i>
2	Процесс отрезки – штамповки	<i>ПОШ</i>
3	Очаг пластической деформаций	<i>ОПД</i>
4	Способ изготовления	<i>СИ</i>
5	Коэффициент использования металла	<i>КИМ</i>
6	Метод конечных элементов	<i>МКЭ</i>
7	Метод верхней оценки	<i>МВО</i>
8	Инженерный метод	<i>ИМ</i>
9	Энергетический метод	<i>ЭМ</i>

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Программа

для расчета параметров процесса отрезки-штамповки алюминиевых
полуфабрикатов из алюминиевых прутков

Программа реализована на алгоритмическом языке Visual Basic .NET, и предназначена для работы на компьютере с операционной системой Windows 64 bit на платформой .NET Framework 4.5.

Значение идентификаторов в программе

D, D1, D2, D3, D4, D5 ----- Диаметры компонентов детали

H, H1, H2, H3, H4, H5 ----- Высоты компонентов детали

A, B ----- Размеры матрицы при выдавливании

R ----- Радиус матрицы при осадке

Del ----- Величина утяжины при выдавливании или величина сегментной фаски при осадке

Lphoi ----- Длина прутка (заготовки)

Dphoi ----- Диаметр исходного прутка

Vphoi ----- Объем заготовки

dTich ----- Контактная площадь между пуансоном и заготовкой

SigmaS ----- Предел текучести

Q_SigmaS ----- Безразмерное давление

Q ----- Давление

P ----- Усилие

```

Public Class Form1
    Dim Lphoi As Double
    Dim SigmaS As Double

    Dim dTich As Double

    Dim Vphoi As Double
    Dim Dphoi As Double
    Dim Q_SigmaS As Double
    Dim Q As Double
    Dim P As Double

    Dim Opt_hinhhoc As Integer
    Dim Opt_nguyencong As Integer

    Private Sub rd1_CheckedChanged(sender As Object, e As
EventArgs) Handles rd1.CheckedChanged
        Opt_hinhhoc = 1

        pic1.Visible = True
        pic2.Visible = False
        pic3.Visible = False
        pic4.Visible = False
        pic5.Visible = False
        pic6.Visible = False
        pic7.Visible = False

        paL1.Visible = True

```

```
paL2.Visible = False
paL3.Visible = False
paL4.Visible = False
paL5.Visible = False
paL6.Visible = False
paL7.Visible = False

btnTinh.Width = pic1.Width
End Sub
```

```
Private Sub rd2_CheckedChanged(sender As Object, e As
EventArgs) Handles rd2.CheckedChanged
    Opt_hinhhoc = 2
```

```
    pic1.Visible = False
    pic2.Visible = True
    pic3.Visible = False
    pic4.Visible = False
    pic5.Visible = False
    pic6.Visible = False
    pic7.Visible = False
```

```
    paL1.Visible = False
    paL2.Visible = True
    paL3.Visible = False
    paL4.Visible = False
    paL5.Visible = False
    paL6.Visible = False
    paL7.Visible = False
```

```

        btnTinh.Width = pic2.Width
End Sub

Private Sub rd3_CheckedChanged(sender As Object, e As
EventArgs) Handles rd3.CheckedChanged
    Opt_hinhhoc = 3

    pic1.Visible = False
    pic2.Visible = False
    pic3.Visible = True
    pic4.Visible = False
    pic5.Visible = False
    pic6.Visible = False
    pic7.Visible = False

    paL1.Visible = False
    paL2.Visible = False
    paL3.Visible = True
    paL4.Visible = False
    paL5.Visible = False
    paL6.Visible = False
    paL7.Visible = False

    btnTinh.Width = pic3.Width
End Sub

Private Sub rd4_CheckedChanged(sender As Object, e As
EventArgs) Handles rd4.CheckedChanged

```

```
Opt_hinhhoc = 4
```

```
pic1.Visible = False
```

```
pic2.Visible = False
```

```
pic3.Visible = False
```

```
pic4.Visible = True
```

```
pic5.Visible = False
```

```
pic6.Visible = False
```

```
pic7.Visible = False
```

```
paL1.Visible = False
```

```
paL2.Visible = False
```

```
paL3.Visible = False
```

```
paL4.Visible = True
```

```
paL5.Visible = False
```

```
paL6.Visible = False
```

```
paL7.Visible = False
```

```
btnTinh.Width = pic4.Width
```

```
End Sub
```

```
Private Sub rd5_CheckedChanged(sender As Object, e As  
EventArgs) Handles rd5.CheckedChanged
```

```
Opt_hinhhoc = 5
```

```
pic1.Visible = False
```

```
pic2.Visible = False
```

```
pic3.Visible = False
```

```
pic4.Visible = False
```

```
pic5.Visible = True  
pic6.Visible = False  
pic7.Visible = False
```

```
paL1.Visible = False  
paL2.Visible = False  
paL3.Visible = False  
paL4.Visible = False  
paL5.Visible = True  
paL6.Visible = False  
paL7.Visible = False
```

```
btnTinh.Width = pic5.Width
```

```
End Sub
```

```
Private Sub rd6_CheckedChanged(sender As Object, e As  
EventArgs) Handles rd6.CheckedChanged
```

```
Opt_hinhhoc = 6
```

```
pic1.Visible = False  
pic2.Visible = False  
pic3.Visible = False  
pic4.Visible = False  
pic5.Visible = False  
pic6.Visible = True  
pic7.Visible = False
```

```
paL1.Visible = False  
paL2.Visible = False
```

```

    paL3.Visible = False
    paL4.Visible = False
    paL5.Visible = False
    paL6.Visible = True
    paL7.Visible = False

    btnTinh.Width = pic6.Width
End Sub

Private Sub rd7_CheckedChanged(sender As Object, e As
EventArgs) Handles rd7.CheckedChanged
    Opt_hinhhoc = 7

    pic1.Visible = False
    pic2.Visible = False
    pic3.Visible = False
    pic4.Visible = False
    pic5.Visible = False
    pic6.Visible = False
    pic7.Visible = True

    paL1.Visible = False
    paL2.Visible = False
    paL3.Visible = False
    paL4.Visible = False
    paL5.Visible = False
    paL6.Visible = False
    paL7.Visible = True

```

```

        btnTinh.Width = pic7.Width
End Sub

Private Sub rdEpchay_CheckedChanged(sender As Object, e As
EventArgs) Handles rdEpchay.CheckedChanged
    paEpchay.Visible = True
    paChon.Visible = False
    Opt_nguyencong = 1
End Sub

Private Sub rdChon_CheckedChanged(sender As Object, e As
EventArgs) Handles rdChon.CheckedChanged
    paEpchay.Visible = False
    paChon.Visible = True
    Opt_nguyencong = 2
End Sub

Private Sub btnTinh_Click(sender As Object, e As EventArgs)
Handles btnTinh.Click

    If txtL.Text = "" Or txtSigmaS.Text = "" Then
        frmErrorMessage1.ShowDialog()
        Exit Sub
    ElseIf Double.Parse(txtL.Text) <= 0 Or
Double.Parse(txtSigmaS.Text) <= 0 Then
        frmErrorMessage1.ShowDialog()
        Exit Sub
    Else
        Lphoi = Double.Parse(txtL.Text)

```

```

        SigmaS = Double.Parse(txtSigmaS.Text)
    End If

    If Opt_hinhhoc = 1 Then
        Dim H As Double
        Dim D As Double
        If txtPaL1_H.Text = "" Or txtPaL1_D.Text = "" Then
            frmErrorMessage1.ShowDialog()
            Exit Sub
        ElseIf Double.Parse(txtPaL1_H.Text) <= 0 Or
Double.Parse(txtPaL1_D.Text) <= 0 Then
            frmErrorMessage1.ShowDialog()
            Exit Sub
        Else
            H = Double.Parse(txtPaL1_H.Text)
            D = Double.Parse(txtPaL1_D.Text)
            Vphoi = Math.PI * H * D * D / 4
        End If
        dTich = Math.PI * D * D / 4

    ElseIf Opt_hinhhoc = 2 Then
        Dim H As Double
        Dim B As Double
        If txtPaL2_H.Text = "" Or txtPaL2_B.Text = "" Then
            frmErrorMessage1.ShowDialog()
            Exit Sub
        ElseIf Double.Parse(txtPaL2_H.Text) <= 0 Or
Double.Parse(txtPaL2_B.Text) <= 0 Then
            frmErrorMessage1.ShowDialog()

```

```

        Exit Sub
    Else
        H = Double.Parse(txtPaL2_H.Text)
        B = Double.Parse(txtPaL2_B.Text)
        Vphoi = H * B * B
    End If
    dTich = B * B

    ElseIf Opt_hinhhoc = 3 Then
        Dim H As Double
        Dim S As Double
        If txtPaL3_H.Text = "" Or txtPaL3_S.Text = "" Then
            frmErrorMessage1.ShowDialog()
            Exit Sub
        ElseIf Double.Parse(txtPaL3_H.Text) <= 0 Or
Double.Parse(txtPaL3_S.Text) <= 0 Then
            frmErrorMessage1.ShowDialog()
            Exit Sub
        Else
            H = Double.Parse(txtPaL3_H.Text)
            S = Double.Parse(txtPaL3_S.Text)
            Vphoi = H * S * S * Math.Sqrt(3) / 2
        End If
        dTich = S * S * Math.Sqrt(3) / 2

    ElseIf Opt_hinhhoc = 4 Then
        Dim H1 As Double
        Dim H2 As Double
        Dim H3 As Double

```

```

Dim D1 As Double
Dim D2 As Double
Dim D3 As Double
If txtPaL4_H1.Text = "" Or txtPaL4_D1.Text = "" _
    Or txtPaL4_H2.Text = "" Or txtPaL4_D2.Text = "" _
    Or txtPaL4_H3.Text = "" Or txtPaL4_D3.Text = ""
Then
    frmErrorMessage1.ShowDialog()
    Exit Sub
ElseIf Double.Parse(txtPaL4_H1.Text) <= 0 Or
Double.Parse(txtPaL4_D1.Text) <= 0 _
    Or Double.Parse(txtPaL4_H2.Text) <= 0 Or
Double.Parse(txtPaL4_D2.Text) <= 0 _
    Or Double.Parse(txtPaL4_H3.Text) <= 0 Or
Double.Parse(txtPaL4_D3.Text) <= 0 Then
    frmErrorMessage1.ShowDialog()
    Exit Sub
Else
    H1 = Double.Parse(txtPaL4_H1.Text)
    H2 = Double.Parse(txtPaL4_H2.Text)
    H3 = Double.Parse(txtPaL4_H3.Text)
    D1 = Double.Parse(txtPaL4_D1.Text)
    D2 = Double.Parse(txtPaL4_D2.Text)
    D3 = Double.Parse(txtPaL4_D3.Text)
    If D1 < D2 And D3 < D2 Then
        Vphoi = Math.PI * (H1 * D1 * D1 + H2 * D2 *
D2 + H3 * D3 * D3) / 4
    Else

```

```

frmErrorMessage2.lblThongbao.Text = "d1<d2  n
d3<d2"

frmErrorMessage2.ShowDialog()
Exit Sub
End If
End If
dTich = Math.PI * Math.Max(Math.Max(D1, D2), D3) / 4

ElseIf Opt_hinhhoc = 5 Then
    Dim H1 As Double
    Dim H2 As Double
    Dim B As Double
    Dim B1 As Double
    Dim B2 As Double
    If txtPaL5_H1.Text = "" Or txtPaL5_B1.Text = "" Or
txtPaL5_B.Text = "" _
        Or txtPaL5_H2.Text = "" Or txtPaL5_B2.Text = ""
Then
        frmErrorMessage1.ShowDialog()
        Exit Sub
        ElseIf Double.Parse(txtPaL5_H1.Text) <= 0 Or
Double.Parse(txtPaL5_B1.Text) <= 0 Or
Double.Parse(txtPaL5_B.Text) <= 0 _
            Or Double.Parse(txtPaL5_H2.Text) <= 0 Or
Double.Parse(txtPaL5_B2.Text) <= 0 Then
                frmErrorMessage1.ShowDialog()
                Exit Sub
            Else
                H1 = Double.Parse(txtPaL5_H1.Text)

```

```

H2 = Double.Parse(txtPaL5_H2.Text)
B = Double.Parse(txtPaL5_B.Text)
B1 = Double.Parse(txtPaL5_B1.Text)
B2 = Double.Parse(txtPaL5_B2.Text)
If B1 < B And B2 < B Then
    Vphoi = H1 * B * B + H2 * B1 * B2
Else
    frmErrorMessage2.lblThongbao.Text = "b1<B  и
b2<B"

    frmErrorMessage2.ShowDialog()
Exit Sub
End If
End If
dTich = B * B

ElseIf Opt_hinhhoc = 6 Then
    Dim H1 As Double
    Dim H2 As Double
    Dim H3 As Double
    Dim H4 As Double
    Dim H5 As Double
    Dim D1 As Double
    Dim D2 As Double
    Dim D3 As Double
    Dim D4 As Double
    Dim D5 As Double
    If txtPaL6_H1.Text = "" Or txtPaL6_D1.Text = "" _
        Or txtPaL6_H2.Text = "" Or txtPaL6_D2.Text = "" _
        Or txtPaL6_H3.Text = "" Or txtPaL6_D3.Text = "" _

```

```

Or txtPaL6_H4.Text = "" Or txtPaL6_D4.Text = "" _
Or txtPaL6_H5.Text = "" Or txtPaL6_D5.Text = ""

```

Then

```

frmErrorMessage1.ShowDialog()
Exit Sub

ElseIf Double.Parse(txtPaL6_H1.Text) <= 0 Or
Double.Parse(txtPaL6_D1.Text) <= 0 _
Or Double.Parse(txtPaL6_H2.Text) <= 0 Or
Double.Parse(txtPaL6_D2.Text) <= 0 _
Or Double.Parse(txtPaL6_H3.Text) <= 0 Or
Double.Parse(txtPaL6_D3.Text) <= 0 _
Or Double.Parse(txtPaL6_H4.Text) <= 0 Or
Double.Parse(txtPaL6_D4.Text) <= 0 _
Or Double.Parse(txtPaL6_H5.Text) <= 0 Or
Double.Parse(txtPaL6_D5.Text) <= 0 Then
frmErrorMessage1.ShowDialog()
Exit Sub

Else
H1 = Double.Parse(txtPaL6_H1.Text)
H2 = Double.Parse(txtPaL6_H2.Text)
H3 = Double.Parse(txtPaL6_H3.Text)
H4 = Double.Parse(txtPaL6_H4.Text)
H5 = Double.Parse(txtPaL6_H5.Text)
D1 = Double.Parse(txtPaL6_D1.Text)
D2 = Double.Parse(txtPaL6_D2.Text)
D3 = Double.Parse(txtPaL6_D3.Text)
D4 = Double.Parse(txtPaL6_D4.Text)
D5 = Double.Parse(txtPaL6_D5.Text)

```

```

        If H1 + H4 < H2 + H3 + H5 Then 'D1 < D2 And D2 <=
D3 And D4 < D5 And D5 <= D3 And H1 + H4 < H2 + H3 + H5
            Vphoi = Math.PI * (-H1 * D1 * D1 + H2 * D2 *
D2 + H3 * D3 * D3 + H5 * D5 * D5 - H4 * D4 * D4) / 4
        Else
            frmErrorMessage2.lblThongbao.Text =
"H1+H4<H2+H3+H5" '"d1<d2<=d3; d4<d5<=d3 и H1+H4<H2+H3+H5"
            frmErrorMessage2.ShowDialog()
            Exit Sub
        End If
    End If
    dTich = Math.PI * D3 * D3 / 4
Else ' Opt_hinhhoc = 7
    Dim H1 As Double
    Dim H2 As Double
    Dim D As Double
    Dim B As Double
    Dim S As Double
    'Dim R1 As Double
    'Dim R2 As Double
    If txtPaL7_H1.Text = "" Or txtPaL7_H2.Text = "" _
        Or txtPaL7_D.Text = "" Or txtPaL7_S.Text = "" _
        Or txtPaL7_B.Text = "" Or txtPaL7_R.Text = "" Then
        frmErrorMessage1.ShowDialog()
        Exit Sub
    ElseIf Double.Parse(txtPaL7_H1.Text) <= 0 Or
Double.Parse(txtPaL7_H2.Text) <= 0 _
        Or Double.Parse(txtPaL7_D.Text) <= 0 Or
Double.Parse(txtPaL7_S.Text) <= 0 _

```

```

        Or Double.Parse(txtPaL7_B.Text) <= 0 Or
Double.Parse(txtPaL7_R.Text) <= 0 Then
    frmErrorMessage1.ShowDialog()
Exit Sub
Else
    H1 = Double.Parse(txtPaL7_H1.Text)
    H2 = Double.Parse(txtPaL7_H2.Text)
    D = Double.Parse(txtPaL7_D.Text)
    B = Double.Parse(txtPaL7_B.Text)
    S = Double.Parse(txtPaL7_S.Text)
    'R1 = Double.Parse(txtPaL7_R1.Text)
    'R2 = Double.Parse(txtPaL7_R2.Text)
    If H1 < H2 And B < D - S Then
        Vphoi = Math.PI * H1 * D * D / 4 + (H2 - H1)
* (B * S + Math.PI * S * S / 4)
    Else
        frmErrorMessage2.lblThongbao.Text = "H1<H2" +
"B<D-S"

        frmErrorMessage2.ShowDialog()
Exit Sub
    End If
End If
dTich = Math.PI * D * D / 4
End If

Dphoi = Math.Sqrt(4 * Vphoi / Math.PI / Lphoi)

If Opt_nguyencong = 1 Then ' Выдавливание
    Dim A As Double

```

```

Dim B As Double
Dim H As Double
Dim Del As Double
If txtEpchay_A.Text = "" Or txtEpchay_B.Text = "" _
    Or txtEpchay_H.Text = "" Or txtEpchay_Del.Text =
"" Then

    frmErrorMessage1.ShowDialog()
    Exit Sub
ElseIf Double.Parse(txtEpchay_A.Text) <= 0 Or
Double.Parse(txtEpchay_B.Text) <= 0 _
    Or Double.Parse(txtEpchay_H.Text) <= 0 Or
Double.Parse(txtEpchay_Del.Text) < 0 Then
    frmErrorMessage1.ShowDialog()
    Exit Sub
Else
    A = Double.Parse(txtEpchay_A.Text)
    B = Double.Parse(txtEpchay_B.Text)
    If A <= B Then
        frmErrorMessage2.lblThongbao.Text = "A>B"
        frmErrorMessage2.ShowDialog()
        Exit Sub
    End If
    H = Double.Parse(txtEpchay_H.Text)
    If H > Math.Max(Dphoi, Lphoi) Or B >=
Math.Min(Dphoi, Lphoi) Then
        frmErrorMessage2.lblThongbao.Text = "B<" +
(Math.Round(Math.Min(Dphoi, Lphoi), 2)).ToString() + _
        " и h<=" + (Math.Round(Math.Max(Dphoi,
Lphoi), 2)).ToString()

```

```

        frmErrorMessage2.ShowDialog()
    Exit Sub
End If
If H >= Math.Sqrt(2) * B Then
    Q_SigmaS = (A - B) / H + H / 2 / B
Else
    Del = Double.Parse(txtEpchay_Del.Text)
    If Del <= 0 Or Del >= A Then
        frmErrorMessage2.lblThongbao.Text = "δ>0
и δ<" + A.ToString()
        frmErrorMessage2.ShowDialog()
    Exit Sub
    End If
    Q_SigmaS = ((A - B) * (A - Del) + (A - B) *
(A - B) + H * H + (A - B) * ((B - Del) * (B - Del) + H * H) / (A
- Del)) / 2 / A
    End If
    Q = Q_SigmaS * SigmaS ' MPa
    P = Q * dTich / 1000 ' kN
End If

Else ' Осадка
    Dim R As Double
    Dim H As Double
    Dim Del As Double
    If txtChon_R.Text = "" Or txtChon_H.Text = "" Or
txtChon_Del.Text = "" Then
        frmErrorMessage1.ShowDialog()
    Exit Sub

```

```

ElseIf Double.Parse(txtChon_R.Text) <= 0 Or
Double.Parse(txtChon_H.Text) <= 0 Or
Double.Parse(txtChon_Del.Text) < 0 Then
    frmErrorMessage1.ShowDialog()
Exit Sub
Else
    R = Double.Parse(txtChon_R.Text)
    H = Double.Parse(txtChon_H.Text)
    Del = Double.Parse(txtChon_Del.Text)
    If Del >= R Or H >= Dphoi Or Lphoi * Lphoi > 4 *
R * R - Dphoi * Dphoi Then
        frmErrorMessage2.lblThongbao.Text = "δ<R и
H<" + (Math.Round(Dphoi, 1)).ToString() + " и R>=" +
(Math.Round(Math.Sqrt(Lphoi * Lphoi + Dphoi * Dphoi) / 2,
1)).ToString()
        frmErrorMessage2.ShowDialog()
Exit Sub
Else
    Dim DelR As Double
    Dim HR As Double
    DelR = Del / R
    HR = H / R
    Q = 1.728 - 4.813 * DelR - 1.348 * HR - 1.656
* DelR * HR - 4.463 * DelR * DelR + 0.213 * HR * HR + 12 * DelR *
HR * HR + 109.5 * DelR * DelR * HR
    Q = 1000 * Q ' MPa
    Q_SigmaS = Q / SigmaS
    P = Q * dTich / 1000 ' kN
End If

```

```

        End If
    End If

    frmKetqua.txtVphoi.Text = (Math.Round(Vphoi,
2)).ToString()
    frmKetqua.txtDphoi.Text = (Math.Round(Dphoi,
2)).ToString()
    frmKetqua.txtQ_SigmaS.Text = (Math.Round(Q_SigmaS,
2)).ToString()
    frmKetqua.txtQ.Text = (Math.Round(Q, 2)).ToString()
    frmKetqua.txtP.Text = (Math.Round(P, 2)).ToString()
    frmKetqua.ShowDialog()
End Sub

```

```

Private Sub txtEpchay_B_TextChanged(sender As Object, e As
EventArgs) Handles txtEpchay_B.TextChanged
    If txtEpchay_B.Text = "" Or txtEpchay_H.Text = "" Then
        Exit Sub
    End If

    Dim B As Double
    Dim H As Double
    B = Double.Parse(txtEpchay_B.Text)
    H = Double.Parse(txtEpchay_H.Text)
    If B <= 0 Or H <= 0 Then
        Exit Sub
    Else
        If H >= B * Math.Sqrt(2) Then
            txtEpchay_Del.Text = "0"
            txtEpchay_Del.Enabled = False

```

```

Else
    'txtEpchay_Del.Text = "0"
    txtEpchay_Del.Enabled = True
End If
End If
End Sub

Private Sub txtEpchay_H_TextChanged(sender As Object, e As
EventArgs) Handles txtEpchay_H.TextChanged
    If txtEpchay_B.Text = "" Or txtEpchay_H.Text = "" Then
        Exit Sub
    End If

    Dim B As Double
    Dim H As Double
    B = Double.Parse(txtEpchay_B.Text)
    H = Double.Parse(txtEpchay_H.Text)
    If B <= 0 Or H <= 0 Then
        Exit Sub
    Else
        If H >= B * Math.Sqrt(2) Then
            txtEpchay_Del.Text = "0"
            txtEpchay_Del.Enabled = False
        Else
            'txtEpchay_Del.Text = "0"
            txtEpchay_Del.Enabled = True
        End If
    End If
End Sub

```

```

    Private Sub txtPaL7_S_TextChanged(sender As Object, e As
EventArgs) Handles txtPaL7_S.TextChanged
        If txtPaL7_S.Text = "" Then
            txtPaL7_R.Text = ""
            Exit Sub
        End If

        Dim S As Double
        Dim R As Double
        S = Double.Parse(txtPaL7_S.Text)
        R = Math.Round(S / 2, 3)
        txtPaL7_R.Text = R.ToString()
    End Sub

End Class

```

Результаты расчета процесса осадки плоский - круглый

Деталь №	Размер Деталь (мм)		Размер Полуфа- брикатов (мм)		Длина Заготовки (мм)	Диаметр исходного прука (мм)	Безразме- рное давление	Давление q(МПа)	Усилие P(кН)
	H _Д	D	H _П	δ					
1	3	25	3,0	1,0	17	10,5	10,1	908,68	446,05
1	3	25	3,0	0,9	17	10,5	10,52	946,42	464,82
1	3	25	3,0	0,8	17	10,5	10,98	987,95	484,96
1	3	25	3,0	0,7	17	10,5	11,46	1031,78	506,47
1	3	25	3,0	0,6	17	10,5	11,98	1078,40	529,36
1	3	25	3,0	0,5	17	10,5	12,53	1127,61	553,61
1	3	25	3,0	0,4	17	10,5	13,11	1180,01	579,24
1	3	25	3,0	0,3	17	10,5	13,72	1235,01	606,23
1	3	25	3,0	0,2	17	10,5	14,36	1292,79	634,60
1	3	25	3,0	0,1	17	10,5	15,04	1353,38	664,34
2	3	17,5	3,0	1,0	11,5	8,94	7,61	685,20	164,81
2	3	17,5	3,0	0,9	11,5	8,94	7,85	706,88	170,03
2	3	17,5	3,0	0,8	11,5	8,94	8,19	737,21	177,32
2	3	17,5	3,0	0,7	11,5	8,94	8,62	776,17	186,69
2	3	17,5	3,0	0,6	11,5	8,94	9,15	823,77	198,14
2	3	17,5	3,0	0,5	11,5	8,94	9,78	880,02	211,67
2	3	17,5	3,0	0,4	11,5	8,94	10,50	944,91	227,28
2	3	17,5	3,0	0,3	11,5	8,94	11,32	1018,43	244,96
2	3	17,5	3,0	0,2	11,5	8,94	12,33	1100,60	264,73
2	3	17,5	3,0	0,1	11,5	8,94	13,24	1191,41	286,57
3	1	10	1	0,55	6,3	3,98	9,30	836,96	65,73
3	1	10	1	0,50	6,3	3,98	9,74	876,79	68,86
3	1	10	1	0,45	6,3	3,98	10,22	920,11	72,27
3	1	10	1	0,40	6,3	3,98	10,74	966,92	75,94
3	1	10	1	0,35	6,3	3,98	11,30	1017,21	79,89
3	1	10	1	0,30	6,3	3,98	11,90	1070,99	84,12
3	1	10	1	0,25	6,3	3,98	12,54	1128,26	88,61
3	1	10	1	0,20	6,3	3,98	13,21	1189,02	93,39
3	1	10	1	0,15	6,3	3,98	13,93	1253,26	98,43
3	1	10	1	0,1	6,3	3,98	14,68	1320,99	103,75

Результаты расчета процесса штамповки полуфабриката контакта

№	Размер Деталь (мм)			Размер Полуфабрикатов (мм)		Длина Заготовки (мм)	Диаметр исходного пружа (мм)	Безразмерное давление	Давление q(МПа)	Усилие P(кН)
	H ₁	H ₂	D	h	δ					
1	3	40	34	12	0	26.5	18	4.25	382.50	347.28
2	3	40	34	9	0	26.5	18	3.92	352.50	320.04
3	3	40	34	8	0	26.5	18	3.88	348.75	316.64
4	3	40	34	7	0	26.5	18	3.89	350.36	318.10
5	3	40	34	6	0	26.5	18	4.00	360.00	326.85
6	3	40	34	5.5	0	26.5	18	4.10	369.20	335.21
7	3	40	34	5.4	0	26.5	18	4.13	371.50	337.29
8	3	40	34	5.3	0	26.5	18	4.16	373.97	339.53
9	3	40	34	5.2	0	26.5	18	4.18	376.62	341.94
10	3	40	34	5.1	0	26.5	18	4.22	379.46	344.52
11	3	40	34	5.0	0	26.5	18	4.25	382.50	347.58
12	3	40	34	4.9	0	26.5	18	4.29	385.76	350.24
13	3	40	34	4.8	0	26.5	18	4.32	389.25	353.41
14	3	40	34	4.7	0	26.5	18	4.37	392.98	356.80
15	3	40	34	4.6	0	26.5	18	4.41	396.98	360.42
16	3	40	34	4.5	0	26.5	18	4.46	401.25	364.30
17	3	40	34	4.4	0	26.5	18	4.51	405.82	368.45
18	3	40	34	4.3	0	26.5	18	4.56	410.70	372.89
19	3	40	34	4.2	0	26.5	18	4.62	415.93	377.63
20	3	40	34	4.1	0	26.5	18	4.68	421.52	382.71
21	3	40	34	4.0	0	26.5	18	4.75	427.50	388.14
22	3	40	34	3.9	0	26.5	18	4.82	433.90	393.95
23	3	40	34	3.8	0	26.5	18	4.90	440.76	400.18
24	3	40	34	3.7	0	26.5	18	4.98	448.11	406.85
25	3	40	34	3.6	0	26.5	18	5.07	456.00	414.01
26	3	40	34	3.5	0	26.5	18	5.16	464.46	421.70
27	3	40	34	3.4	0	26.5	18	5.26	473.56	429.95
28	3	40	34	3.3	0	26.5	18	5.37	483.34	438.84
29	3	40	34	3.2	0	26.5	18	5.49	493.88	445.40
30	3	40	34	3.1	0	26.5	18	5.61	505.23	458.71
31	3	40	34	3.0	0	26.5	18	5.75	517.50	469.85
32	3	40	34	2.9	0	26.5	18	5.90	530.77	481.89
33	3	40	34	2.8	0.5	26.5	18	14.40	1295.77	1176.45
34	3	40	34	2.7	0.8	26.5	18	14.22	1279.52	1161.70
35	3	40	34	2.6	1.0	26.5	18	14.09	1268.03	1151.27

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Сертификат специалиста № 891

CERTIFICATE

SPECIALIST № 891
This certificate verifies that

**PhD student,
NUST "MISIS",**

HOANG MANH GIOI

is a certified specialist and has the skills to work in QForm software for simulation of metal forming processes, including preparing geometrical models, performing simulations and analysing results.

Software version: QForm 9.0

Sergey Stebunov
CEO, PhD
QuantorForm Ltd.

Andrei Potapov
Engineer of technical support
department QFX Simulations Ltd.

30 August 2019

www.qform3d.com