

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский политехнический университет»

На правах рукописи



ЛЕ ЧУНГ ЗУНГ

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ХОЛОДНОЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ
СЛОЖНОГО СОСТАВНОГО ИЗДЕЛИЯ ТИПА «СТУПИЦА» МЕТОДОМ
КОМБИНИРОВАННОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ
МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ**

Специальность: 2.5.7 «Технологии и машины обработки давлением»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Филиппов Юлиан Кириллович

Москва – 2026

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК ОСНОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА.....	14
1.1 Виды процессов выдавливания при холодной объемной штамповке	14
1.2 Теоретический анализ операций радиального, обратного и комбинированного выдавливания	23
1.3 Методы исследования напряженно-деформированного состояния металла при холодной объемной штамповке.....	25
1.4 Технологические подходы к производству ступиц	32
1.5 Выводы по главе 1.....	39
ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОМБИНИРОВАННОГО ПРОЦЕССА РАДИАЛЬНОГО И ОБРАТНОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ	41
2.1 Методика проведения математической модели методом баланса мощностей	41
2.2 Этапы процесса радиального и обратного выдавливания в конической матрице.....	44
2.3 Моделирование процесса выдавливания с учетом упрочнения.....	46
2.4 Вычисление математической модели с помощью приложения на языке C#. 63	
2.5 Проверка применимости математической модели	67
2.6 Выводы по главе 2.....	73
ГЛАВА 3. СРАВНЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА КОМБИНИРОВАННОГО ПРОЦЕССА РАДИАЛЬНОГО И ОБРАТНОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ В КОНИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕ МЕТОДОМ БАЛАНСА МОЩНОСТИ С УЧЕТОМ УПРОЧНЕНИЯ МЕТАЛЛА С РЕЗУЛЬТАТОМ МОДЕЛИРОВАНИЯ В ПРОГРАММЕ QFORM.	74
3.1 Установление кривой упрочнения металла при пластическом деформировании	75

3.2 Компьютерное моделирование комбинированного процесса радиального и обратного выдавливания в конической матрице.....	80
3.3 Сравнение результатов математического моделирования с данными, полученными конечно-элементным моделированием	82
3.4 Выводы по главе 3.....	90
ГЛАВА 4. ЗАВИСИМОСТЬ ВЕЛИЧИНЫ ТВЕРДОСТИ ОТ ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ И СТЕПЕНИ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ХОЛОДНОЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКЕ.....	91
4.1 Построение тарировочных графиков зависимости твердости интенсивности напряжений и степени деформации	91
4.2 Влияние однородности определения деформации при построении тарировочного графика	99
4.3 Точности измерения твердости в зависимости от величины деформации при осадке цилиндрического образца	104
4.4 Применение полученной зависимости твёрдости в программных комплексах моделирования	107
4.5 Выводы по главе 4.....	109
ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ СЛОЖНОГО СОСТАВНОГО ИЗДЕЛИЯ ТИПА «СТУПИЦА» ДИСКА СЦЕПЛЕНИЯ АВТОМОБИЛЯ МЕТОДОМ КОМБИНИРОВАННОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ	110
5.1 Анализ базовой технологии производства изделия «ступица».....	110
5.2 Разработка методики получения сложного составного изделия типа «ступица» диска сцепления автомобиля.....	113
5.3 Выводы по главе 5.....	131
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	133
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	135
ПРИЛОЖЕНИЕ А: Программа вычисления математической модели на языке С#	143

ПРИЛОЖЕНИЕ Б: Подпрограмма для отображения распределения твёрдости в QForm.....	164
ПРИЛОЖЕНИЕ В: Подпрограмма для отображения распределения твёрдости в MATLAB.....	165
ПРИЛОЖЕНИЕ Г: Чертежи деталей штамповой оснастки.....	169

СПИСОК ОСНОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ХОШ – холодная объемная штамповка

НДС – напряжённо-деформированное состояние

САПР – система автоматизированного проектирования

ОМД – обработка материалов давлением

МКЭ – метод конечных элементов

ЭВМ – электронная вычислительная машина

КИМ – коэффициент использования материалов

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. В условиях стремительного развития промышленности приоритетной задачей машиностроительной отрасли становится внедрение новых технологий, направленных на повышение качества и механические свойства изготавливаемых деталей. Современные подходы к производству ориентированы не только на достижение высоких эксплуатационных характеристик продукции, но и на снижение затрат на материалы, энергию и уменьшение трудоёмкости процессов. Такой подход позволяет обеспечить эффективное использование ресурсов и повысить конкурентоспособность предприятий в условиях жёсткой рыночной конкуренции.

Холодная объёмная штамповка обладает рядом существенных преимуществ, включая высокую точность получаемых заготовок и отдельных элементов деталей, а также улучшенное качество поверхности изделий. Это позволяет существенно сократить затрату на последующие доводочные операции. Кроме того, в результате упрочнения материала, происходящего в процессе пластической деформации, наблюдается повышение прочностных характеристик готовых изделий.

В связи с этой технологией применение систем автоматизированного проектирования (САПР) позволяет эффективно моделировать и разрабатывать технологические процессы, анализировать изменения свойств материалов, а также оптимизировать рабочие процессы. Благодаря использованию САПР можно сократить объем ручной работы, автоматизировать рутинные задачи и точно предсказывать результаты обработки материалов. Это не только экономит время и ресурсы, но и повышает точность и качество конечной продукции, что особенно важно для промышленного производства.

Анализируя литературные и производственные данные, производство деталей типа «ступица» диска сцепления автомобиля в настоящее время осуществляется на предприятии конструктивно сложном и трудоемком в наладке, обслуживании и ремонте оборудовании с использованием устаревших технологий,

с большими энергозатратами и высоким отходом металла. Занимает она значительную производственную площадь.

Теоретический и экспериментальный анализ процессов ХОШ направлен на решение ряда ключевых задач, таких как определение технологической силы деформации, оценка зависимости силы от напряжённо-деформированного состояния, геометрии инструмента, условий контакта заготовки с инструментом, а также исследование напряжённого состояния материала, используемого в качестве объекта исследования. Такой комплексный подход позволяет глубже понять механизмы протекания процессов пластической деформации и оптимизировать параметры технологического процесса.

Степень разработанности темы. Вопросы теории и технологии холодной объемной штамповки рассматривались в работах российских и зарубежных исследователей: Сосенушкин Е.Н., Рыбин А.Ю., Воронцов А.Л., Данилин Г.А., Молодов А.В., Алиева Л.И., Калымжыный В.Л., Головин В.А., Филиппов Ю.К., Коробова Н.В., Филин Д.С., Петров Б.В., Ларин С.Н., Чудин В.Н., Черняев А.В., Герасимов Д.А., Гартвиг А.А., Мусин С.С., Жерносек В.Н., Каплун Е.В., Гончаров П.В., Мищенко В.М., Чередниченко А.А., Болобов В.И., Цветков Ю.Н., Дмитриев А.М., Молотова А.К., Weiß A., Нгуен Т.Ч., Нгок Ф.В., Геннеберг Жд., Мерклеин М. и др.

В научной литературе представлены отдельные исследования, посвященные совершенствованию технологий изготовления деталей типа «ступица» с применением методов холодной объемной штамповки. Однако такие работы остаются немногочисленными, что связано с большим разнообразием геометрии ступиц, высокими требованиями к точности и прочности, а также отсутствием комплексных методик теоретической оценки технологического процесса до его внедрения в производство.

В данной диссертационной работе деталь типа «ступица» рассматривается как сложное составное изделие, формируемое методом холодной объемной штамповки при комбинированном выдавливании цилиндрической заготовки с последующим неразъёмным соединением с фланцем. Процесс спроектирован

таким образом, что основная пластическая деформация и изменение механических свойств реализуются в цилиндрической заготовке, тогда как фланец из более трудно деформируемого материала участвует в формообразовании в минимальной степени.

Актуальность работы заключается в разработке методики получения сложного составного изделия типа «ступица» методом комбинированного выдавливания на основе математического и компьютерного моделирования энергосиловых параметров процесса с учетом изменения механических свойств материала. Реализация данной методики позволяет обосновывать технологические параметры, прогнозировать силы деформирования и изменение свойств материала на этапе проектирования, а также рассматривать возможность повышения работоспособности изделия. Применение комбинированного выдавливания также направлено на более рациональное использование материала, снижение объема последующей механической обработки и уменьшение отходов металла, что способствует повышению эффективности и снижению трудоемкости процессов холодной объемной штамповки.

Цель работы: разработка методики получения сложного составного изделия типа «ступица» методом комбинированного выдавливания на основе математического и компьютерного моделирования энергосиловых параметров процесса с учетом изменения механических свойств материала.

В диссертационной работе решены следующие задачи:

1. Разработать математическую модель процесса комбинированного выдавливания цилиндрической заготовки с формированием заготовки типа «стакан с фланцем» и проанализировать влияние напряжённо-деформированного состояния, геометрических параметров заготовки и инструмента на энергосиловые характеристики процесса, как ключевого этапа получения сложного составного изделия типа «ступица».

2. Исследовать напряженное и деформированное состояние цилиндрического образца из сталей 10 и 20 при пластическом деформировании с

целью последующего использования полученных данных при моделировании процесса комбинированного выдавливания.

3. Оценить точность определения силы деформирования при формировании заготовки типа «стакан с фланцем» методом комбинированного выдавливания для обоснования применимости разработанной математической модели путем сопоставления результатов аналитических расчетов и компьютерного имитационного моделирования.

4. Установить экспериментальные зависимости твердости от интенсивности напряжений и степени деформации для сталей 10 и 20 при холодном выдавливании и исследовать точность построения тарировочных графиков для последующего анализа упрочнения материала при формировании сложного составного изделия типа «ступица».

5. На основе полученных теоретических, экспериментальных и численных результатов разработать методику обоснования и проектирования технологического процесса изготовления сложного составного изделия – ступицы диска сцепления автомобиля, получаемого методом холодной объемной штамповки за счёт комбинированного выдавливания, с учётом изменения механических свойств материала.

Объект исследования – Процессы пластического деформирования металлов при холодной объемной штамповке изделий с фланцем методом комбинированного выдавливания.

Предмет исследования – Методика получения сложного составного изделия типа «ступица» методом комбинированного выдавливания.

Научная новизна работы:

- Предложена математическая модель расчета силы деформирования и выполнен теоретический анализ процесса комбинированного выдавливания цилиндрической заготовки с формированием заготовки типа «стакан с фланцем», являющегося ключевым этапом получения сложного составного изделия типа «ступица», методом баланса мощности с учетом изменения механических свойств. Для автоматизации расчетов составлена вычислительная программа на языке C#;

- Предложен анализ комбинированного процесса радиального и обратного выдавливания в конической матрице с варьированием геометрических параметров инструмента и технологических условий. Выполнено сопоставление расчетных значений с результатами конечно-элементного моделирования в программном комплексе QForm. Установлено, что относительное расхождение результатов не превышает 20 %, что подтверждает возможность применения аналитической модели на этапе предварительного проектирования технологии получения заготовки типа «стакан с фланцем» в составе сложного составного изделия «ступица»;

- Установлены закономерности зависимости величины твердости от интенсивности напряжений и степени деформации при осадке цилиндрических образцов из стали 10 и 20. Построен тарировочный график зависимости твердости от интенсивности напряжений и степени деформации для сталей 10 и 20, позволяющий прогнозировать свойства деталей, получаемых методом холодной объемной штамповки при формировании сложных составных изделий типа «ступица»;

- Предложена методика проектирования технологического процесса изготовления сложного составного изделия типа «ступица» диска сцепления автомобиля, формируемого методом комбинированного выдавливания цилиндрической заготовки с последующим формированием неразъемного соединения с фланцем, с использованием результатов математического и компьютерного моделирования.

Теоретическая значимость работы состоит в определении соотношений между силой деформирования, напряженно-деформированным состоянием и геометрическими параметрами заготовки и инструмента при комбинированном выдавливании заготовок типа «стакан с фланцем». Также исследовано напряженное и деформированное состояние цилиндрических образцов из сталей 10 и 20 и установлены зависимости твердости от интенсивности напряжений и степени деформации при пластическом деформировании.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования полученных результатов для обоснования рациональных технологических режимов, расчета энергосиловых параметров и отображения поля распределения твердости в программных комплексах моделирования. На основе полученных результатов разработан новый технологический процесс изготовления сложного составного изделия типа «ступица» диска сцепления автомобиля, обеспечивающий повышение коэффициента использования заготовки до 56 % и снижение трудоемкости механической обработки. Технологический процесс принят к внедрению в производство на предприятии ООО «Триал-Диск» г. Серпухов.

Методы и средства исследований. Диссертационные исследования выполнены с использованием методов теоретического анализа процессов обработки металлов давлением, метода баланса мощности, экспериментального исследования пластического деформирования и твердости материалов, а также конечно-элементного моделирования в QForm. Для проектирования оснастки, расчетов и обработки результатов применялись Kompas-3D, MATLAB и программа на языке C#.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель процесса комбинированного радиального и обратного выдавливания заготовок типа «стакан с фланцем» в конической матрице, рассматриваемого как ключевой этап получения сложного составного изделия типа «ступица», и её анализ, выполненный на основе метода баланса мощности с варьированием начальных и граничных условий.

2. Применение разработанной математической модели комбинированного выдавливания для оценки влияния геометрии инструмента и свойств материала заготовки на силу деформирования и обоснованного выбора материала и оборудования при получении сложного составного изделия типа «ступица».

3. Зависимость твёрдости от интенсивности напряжений и степени деформации при пластическом деформировании для сталей 10 и 20, а также точность построения тарировочных графиков, используемых для анализа

упрочнения цилиндрической заготовки при формировании сложного составного изделия типа «ступица».

4. Методика обоснования технологического процесса получения сложного составного изделия типа «ступица» диска сцепления автомобиля методом холодной объёмной штамповки при комбинированном выдавливании цилиндрической заготовки с последующим формированием неразъёмного соединения с фланцем.

Степень достоверности результатов, представленных в диссертационной работе, подтверждается применением современных вычислительных систем и методик, также в ходе экспериментальных исследований на оборудовании кафедры «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии» Московского политехнического университета. Результаты переданы для внедрения в производство в ООО «Триал-Диск» г. Серпухов.

Апробация результатов работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- Международный научный форум «Наука и инновации – современные концепции» (г. Москва, 17 июня 2022г.);

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

- Международная научно-техническая конференция «СМиС-2023. Инновационные технологии в управлении качеством» (г. Москва, 2023);

- Всероссийская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Современные технологии обработки металлов и средства их автоматизации» (г. Тула, 2023);

- Международная научно-техническая конференция «СМиС-2023. Технологии управления качеством» (г. Москва, 2024).

Публикации. По теме диссертации опубликованы 9 трудов, в том числе 5 статьи в рецензируемых изданиях из перечня ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения, библиографического списка, приложения. Текст диссертации изложен на 178 страницах машинописного текста, иллюстрирована 98 рисунками, содержит 12 таблиц. Библиографический список включает 64 наименования.

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

1.1 Виды процессов выдавливания при холодной объемной штамповке

Холодная объемная штамповка представляет собой процесс обработки металла давлением, при котором материал деформируется в холодном состоянии (при комнатной температуре). Данный метод используется, как правило, для металлов с хорошей пластичностью, таких как алюминий, медь или низкоуглеродистые стали, что позволяет обеспечить высокую точность готового изделия, минимальная шероховатость поверхности, а также точное воспроизводство формы даже при изготовлении небольших деталей или компонентов крупных конструкций.

Холодная объемная штамповка является эффективным процессом металлообработки, широко используемый в автомобильной, тракторной промышленности и во многих других отраслях крупносерийного и массового машиностроения. Она обладает следующими преимуществами:

- 1) высокая экономичность, позволяющая снизить расходы на производство по сравнению с другими методами, такими как обработка на станках с ЧПУ;
- 2) повышение производительности за счет возможности серийного изготовления за короткое время, что особенно эффективно при масштабном производстве;
- 3) гарантия стабильно высокого качества изделий, что позволяет повысить точность и воспроизводимость готовой продукции;
- 4) возможность изготовления изделий сложной формы без применения дополнительных операций механической обработки;
- 5) повышение прочности и твердости изделия в ходе пластической деформации;
- 6) экономия материала и повышения механических свойств готовой продукции.

Таблица 1.1 – Классификация деталей, получаемых холодной объемной штамповкой

Простые тела вращения	С ступенчатой полостью	С перемычкой	С наружным и внутренним отростком	С утолщением у открытого торца	С утолщением в средней части	С утолщением у закрытого торца	Фасонные
1	2	3	4	5	6	7	8

Холодная объемная штамповка играет всё более важную роль в современной промышленности. Далее представлены прогнозы ее дальнейшего развития:

1) внедрение новых технологий: интеграция автоматизации, роботизации и искусственного интеллекта повысит эффективность производства, качество продукции, а также снизит трудовые затраты.

2) разработка новых материалов: исследования и разработки новых материалов с улучшенными механическими и термодинамическими характеристиками расширят области применения ХОШ, что даст возможность изготавливать более сложные изделия.

3) оптимизация процесса: технология ХОШ будет совершенствоваться за счет научных исследований с целью максимального повышения эффективности, минимизации расхода материала и энергии, что даст возможность снизить негативное влияние на окружающую среду.

4) развитие точной ХОШ: с появлением новых технологических процессов и широким внедрением современных систем контроля качества точность и качество готовой продукции смогут повыситься ещё больше.

Евстифеев В.В. [1] представил подробную классификацию деталей, изготавливаемых методом холодной объемной штамповки; часть этой классификации приведена в таблице 1.1.

Процессы ХОШ можно разделить на четыре основные группы: прямое, обратное, радиальное и комбинированное выдавливания. Исследование процессов этих выдавливания включает в себя изучение влияния различных факторов на давление деформирования и характер течения металла.

Прямое выдавливание – технологическая операция обработки металлов давлением, при которой заготовка, помещённая в закрытую полость, выталкивается в том же направлении, что и движение инструмента, проходя через формующее отверстие матрицы. Прямое выдавливание часто используется в качестве заготовительной операции для формирования участков с уменьшенным поперечным сечением. Такой способ особенно эффективен при изготовлении удлинённых элементов, например стержней или отдельных утолщённых участков поковок.

В отличие от операций вытяжки, где деформация ограничена и при обработке малопластичных сплавов велика вероятность образования трещин, прямое выдавливание обеспечивает высокую степень формоизменения (до 80–85%) благодаря интенсивному всестороннему сжатию металла. Этот метод также отличается повышенной точностью готовых участков по сравнению с традиционной штамповкой, что делает его востребованным в производстве ответственных деталей.

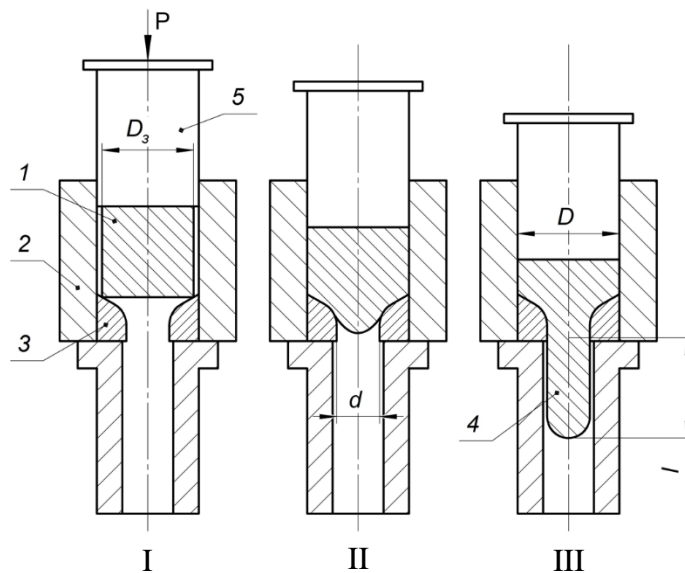


Рисунок 1.1 – Схема прямого выдавливания: 1 – слиток (заготовка),
2 – контейнер, 3 – матрица, 4 – изделие, 5 – пуансон

При подготовке заготовки к процессу деформирования её диаметр, как правило, задаётся несколько меньшим по сравнению с диаметром рабочей полости матрицы, что обеспечивает корректную фиксацию и снижает риск перекосов при установке. На начальной стадии нагружения наблюдается лишь частичное заполнение объёма матрицы деформируемым материалом. В дальнейшем, по мере развития процесса, на втором этапе происходит полное формирование конфигурации полости. С переходом к третьей стадии металл вытесняется через калибрующую часть отверстия матрицы, что соответствует началу процесса выдавливания.

При прямом выдавливании различают три основных схемы течения металла (рисунок 1.2):

I. Первая схема: при малом трении и однородных свойствах металла пластическое течение сосредоточено у матрицы.

II. Вторая схема: при высоком трении и неоднородности свойств возникает турбулентное перемещение с обратным потоком периферийных зон.

III. Третья схема: промежуточная схема сопровождается образованием застойных зон при плоском дне матрицы. Устранить застойные зоны позволяет выполнение конического дна с углом, равным углу естественной конусности (110–

130°). При проектировании поковок методом выдавливания рекомендуется обеспечивать плавный переход от головной части к стержню (рисунок 1.3).

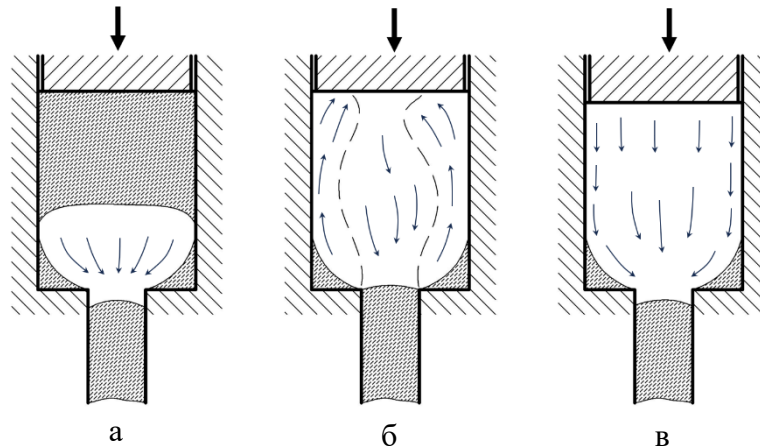


Рисунок 1.2 – Схемы течения металла при прямом выдавливании:
а – ламинарное течение, б – турбулентное течение, в – смешанное

Для расчёта требуемой силы прессования можно воспользоваться зависимостью, предложенной Унксовым [2]:

$$P_{расч} = S_1 \cdot \sigma_T \cdot \left(\frac{2L}{D} + \frac{1}{\varphi} \ln \frac{S_1}{S_2} + \frac{4\mu l}{d} \right)$$

где S_1 – площадь сечения заготовки, мм²;

S_2 – площадь сечения изделия, мм²;

σ_T – предел текучести металла;

L – длина заготовки в момент начала выхода металла из формирующей цилиндрической части матрицы, мм;

D – диаметр заготовки, мм;

d – диаметр отверстия матрицы, мм;

φ – угол при вершине конуса матрицы, рад;

l – длина цилиндрической части очка матрицы, мм;

μ – коэффициент трения.

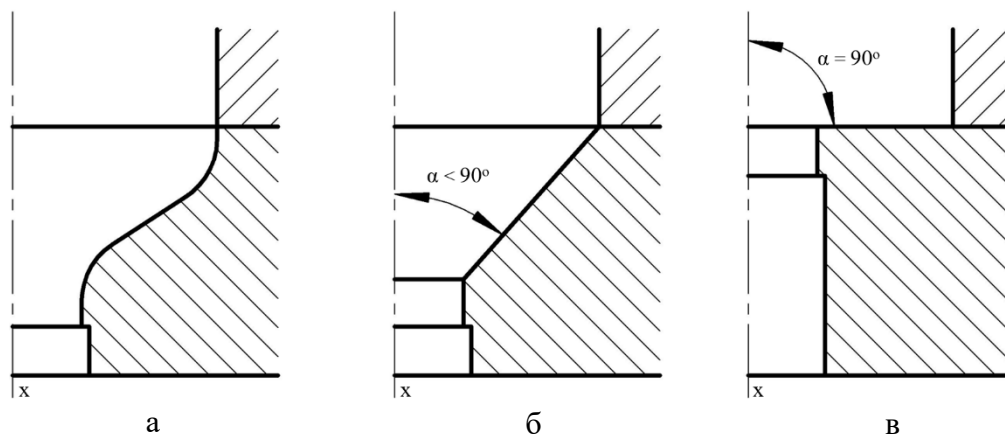


Рисунок 1.3 – Формы каналы матриц: а – сигмоидальный,
б – конический, в - плоский

Обратное выдавливание – технологическая операция обработки металлов давлением, при которой материал заготовки перемещается в направлении, противоположном движению пуансона (рисунок 1.4). Такой способ позволяет реализовать интенсивное течение металла при относительно невысоких энергосиловых затратах, что обусловлено снижением трения на контактных поверхностях. Данный процесс широко используется в технологии холодной объёмной штамповки для получения изделий типа стаканов, втулок, корпусов подшипников, а также других полых деталей с высокой точностью геометрических размеров и качеством поверхности. Благодаря этим преимуществам обратное выдавливание применяется как в массовом, так и в серийном производстве, особенно при изготовлении ответственных элементов машиностроения и приборостроения.

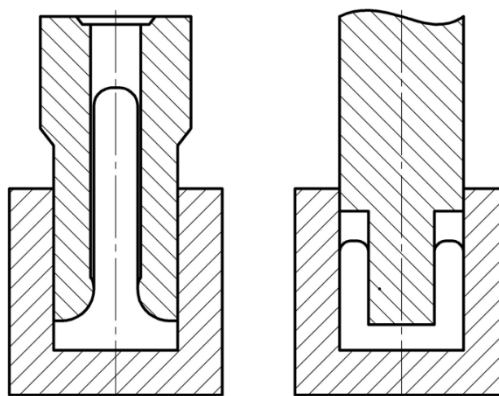


Рисунок 1.4 – Обратное (встречное) выдавливание (схемы вариантов)

В ходе процесса обычно лишь часть заготовки испытывает пластическую деформацию. Основная зона перемещения металла локализуется вблизи пуансона и на участке вокруг отверстия матрицы (рисунок 1.5). Такая особенность обеспечивает снижение энергетических затрат в 1,5–2 раза по сравнению с прямым выдавливанием.

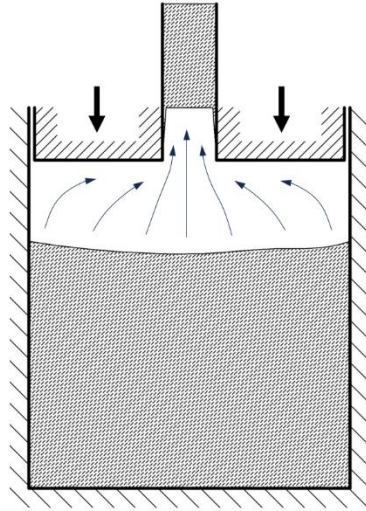


Рисунок 1.5. Схема течения металла при обратном прессовании

Тем не менее, данный метод имеет ряд ограничений. В первую очередь это сокращенный ассортимент изделий, часто меньшая производительность и более низкое качество поверхности. Поэтому обратное выдавливание применяется реже, чем прямое.

Для расчёта силы прессования используют формулу, предложенную Унксовым [2].

$$P_{расч} = S_1 \cdot \sigma_T \cdot \left(\frac{1}{\varphi} \ln \frac{S_1}{S_2} + \frac{4\mu l}{d} \right)$$

где S_1 – площадь сечения заготовки, мм²;

S_2 – площадь сечения изделия, мм²;

σ_T – предел текучести металла;

L – длина заготовки в момент начала выхода металла из очка матрицы, мм;

d – диаметр отверстия матрицы, мм;

φ – угол при вершине конуса матрица, рад;

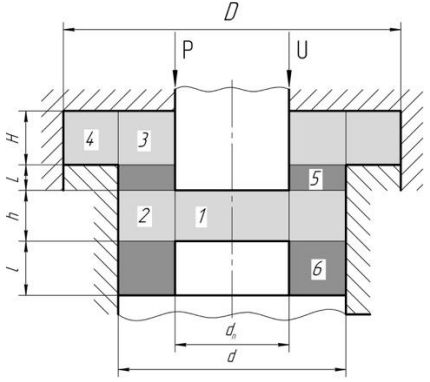
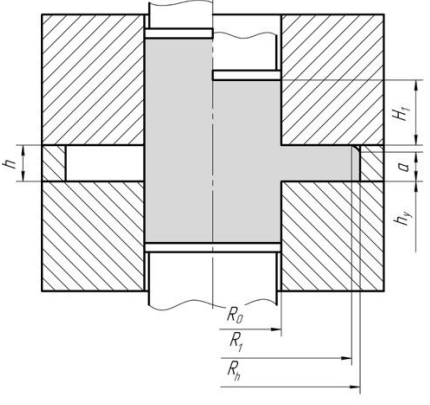
l – длина цилиндрической части отверстия матрицы, мм;

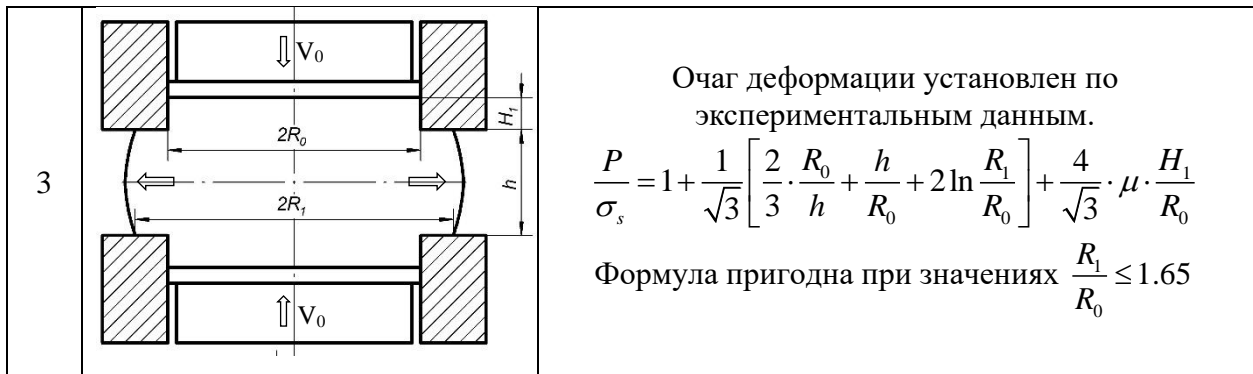
μ – коэффициент трения.

Радиальное выдавливание – технологическая операция обработки металлов давлением, в ходе которой диаметр заготовки увеличивается на части её высоты за счёт перемещения материала в радиальную полость, расположенную вдоль боковой поверхности заготовки. Этот метод применяется для производства деталей типа стержней или труб с поперечными выступами и фланцами.

По результатам анализа литературных источников [3, 4, 5] в таблице 1.2 приведены примеры применения классических методов теории ОМД для исследования процессов радиального выдавливания.

Таблица 1.2 – Математические модели радиального выдавливания

№	Расчетная схема процесса	Формулы и основные допущения
1		<p>Уравнение активной силы</p> $P = 1,08\sigma_s\pi \frac{k^2 d^2}{2} + 1,08\sigma_s\pi \frac{k^2}{4} + 1,08\sigma_s\pi \frac{k^2}{4} \ln \frac{D}{d} +$ $+ \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \pi \frac{dh}{2(1-k^2)} + 2 \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \pi \frac{d^3}{24} \cdot \frac{k^5 + 2k^2 - 3k^3}{1-k^2} +$ $+ \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \pi \frac{d^3}{24H} \cdot \frac{1+2k^3-3k^2}{1-k^2} + \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \pi \frac{dh}{2} \cdot \frac{2-3k^2}{1-k^2} +$ $+ 4 \frac{\mu\sigma_s}{\sqrt{3}} \pi \frac{d^3}{24h} \cdot k^3 + \frac{2}{\sqrt{3}} \mu\sigma_s\pi dL \frac{1}{1-k^2} +$ $+ \frac{1}{\sqrt{3}} \mu\sigma_s\pi dkH \frac{1}{1-k^2} + \frac{2}{\sqrt{3}} \mu\sigma_s\pi dh \frac{1}{1-k^2} +$ $+ \frac{2\sigma_s}{\sqrt{3}} \mu\pi \frac{d^3}{24H} \cdot \frac{1+2k^3-3k^2}{1-k^2} + \frac{2}{\sqrt{3}} \mu\sigma_s\pi \frac{d^2(D-d)}{8H}$
2		<p>Использование решения для радиального выдавливания</p> $P = \sigma_s \cdot \left\{ 1 + 1,08 \ln \frac{R_1}{R_0} + \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{h}{R_0} + \frac{2R_0}{3h} + \right. \right.$ $+ \left. \frac{h}{2R_1} \cdot \frac{3R_1^2 - R_h^2}{R_h^2 - R_1^2} \right) + 2,16 \left[\frac{R_h^2 + R_h R_1 + R_1^2}{3R_1(R_h + R_1)} \cdot \right.$ $\cdot \left(\frac{h-a}{h} - \frac{R_h}{h} \right) - \frac{R_h^2 + R_1^2}{4hR_1} \left. \right] + \frac{2\mu}{\sqrt{3}} \left[\frac{2H_1}{R_0} + \frac{2R_1 - R_0}{h} + \right.$ $\left. \left. + \frac{R_h^2 - R_1^2}{4hR_1} + \frac{(h-a)^2 R_h^2}{hR_1(R_h^2 - R_1^2)} \right] \right\}$



Комбинированное выдавливание – технологическая операция обработки металлов давлением, при которой пластическое течение металла осуществляется одновременно в двух и более направлениях (рисунок 1.6). В зависимости от конструкции инструмента и условий деформирования, в одном технологическом цикле могут сочетаться прямое, обратное, радиальное выдавливание, редуцирование и другие виды операций.

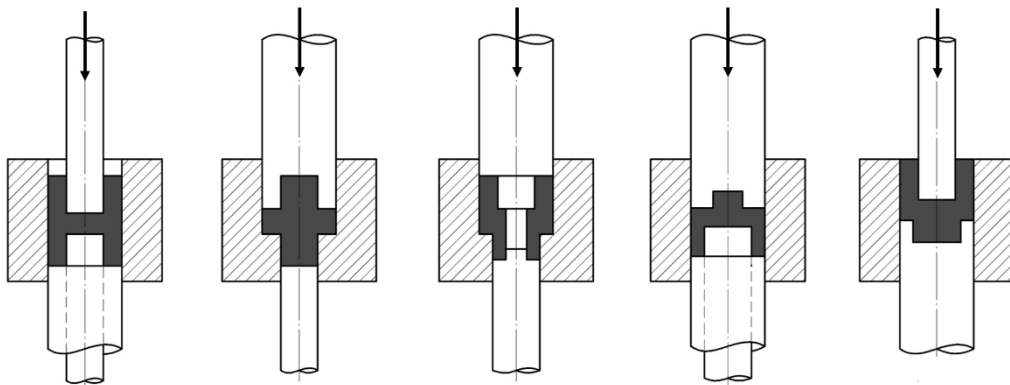


Рисунок 1.6. Схема вариантов комбинированного выдавливания

Комбинированное выдавливание позволяет не только снизить суммарные силы прессования за счет рационального распределения деформации, но и существенно повысить производительность. Применение комбинированного выдавливания дает возможность получать заготовки и изделия сложной конфигурации, включая элементы с фланцами, буртиками, внутренними и внешними канавками (рисунок 1.7) [6], при этом уменьшается количество переходов и операций финишной обработки.

Вопросам комбинированного выдавливания посвящены работы Е.Н. Сосенушкина, А.Ю. Рыбина, А.Л. Воронцова, Г.А. Данилина, А.В. Молодова, Л.И. Алиевы, В.Л. Калымжного, В.А. Головина, Ю.К. Филиппова, Д.С. Филина и других

авторов. Данным вопросом занимались зарубежные исследователи Т. Ч. Нгуен, Ф.В. Нгок, Жд. Геннеберг, М. Мерклейн.

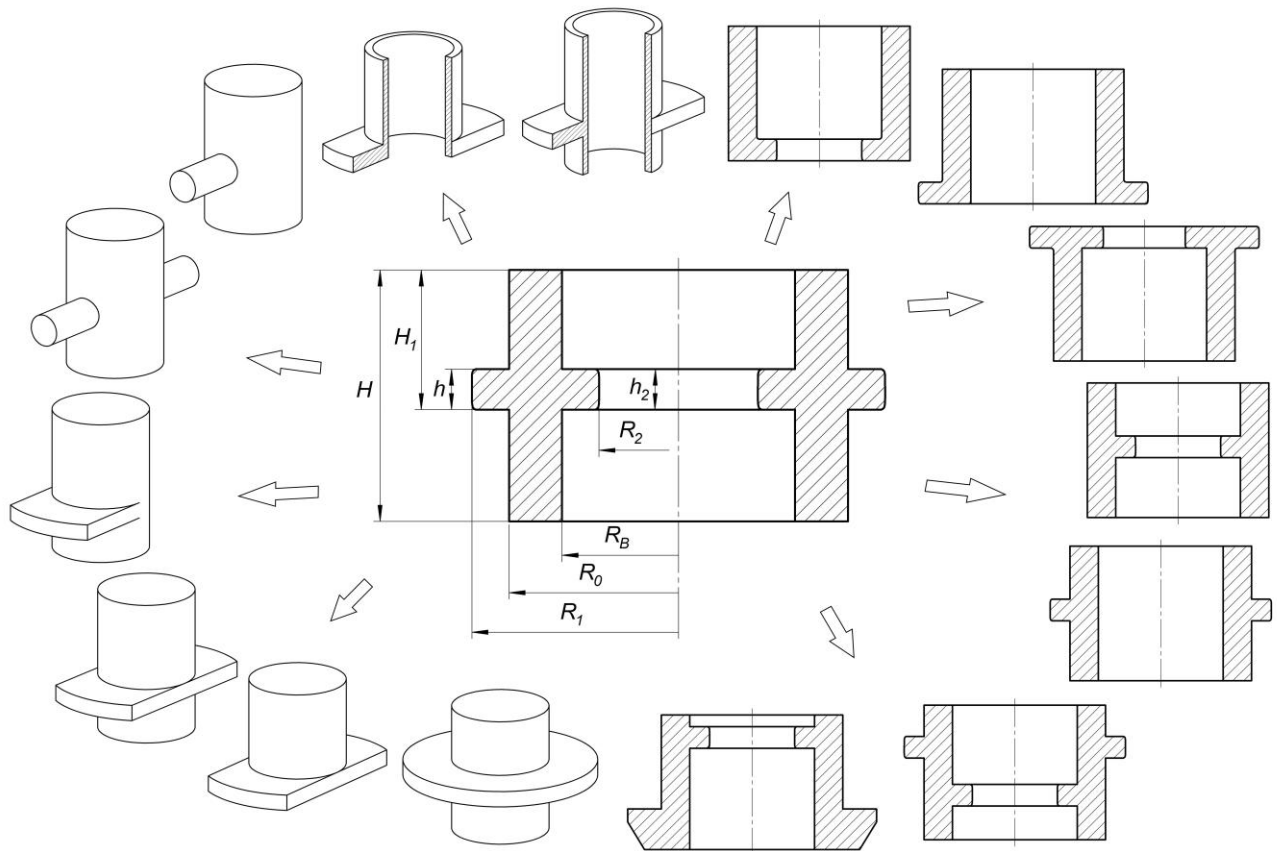


Рисунок 1.7 – Типовые детали с фланцем

1.2 Теоретический анализ операций радиального, обратного и комбинированного выдавливания

В холодной объёмной штамповке выдавливание реализуется в нескольких базовых схемах: при обратном выдавливании металл течёт навстречу движению пуансона, при радиальном – в полости, ориентированные по радиусу, а комбинированное объединяет два и более направлений течения в одном ходе. Эти операции различаются по напряжённому деформированному состоянию, доле работы трения и требуемым силам, что определяет выбор технологии и компоновку инструмента [7].

В исследованиях А. Л. Воронцова [8][9][10] проведена систематизация сведений о кинематике процесса, особенностях напряжённно-деформированного

состояния и расчётных методиках при радиальном выдавливании заготовок с внутренними выступами. Автором также проанализированы силовые режимы формирования внутренних утолщений и выступов на трубных заготовках, определены границы деформационных зон и предложены практические подходы к расчёту основных параметров процесса. Вместе с тем, в данных работах не нашло отражения влияние упрочнения материала при пластической деформации, что ограничивает полноту представленной модели и оставляет потенциал для дальнейших исследований.

В работе Б. В. Петрова [11] исследован характер течения материала при обратном выдавливании в ступенчатой матрице. Автором выявлена промежуточная нестационарная стадия (ПН-стадия), играющая ключевую роль в формировании дефектов. На основе анализа получены зависимости изменения силовых, деформационных и кинематических параметров процесса от режимов формоизменения и геометрии инструмента. Однако, данное исследование не учитывает явный интегральный показатель накопленной деформации на траектории нагружения.

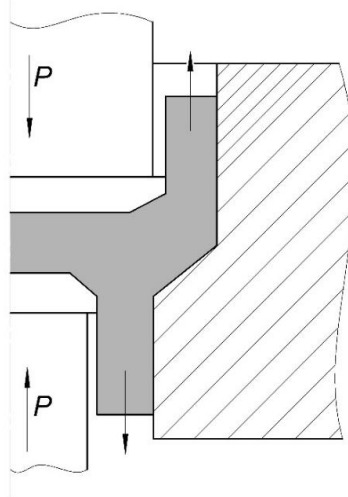


Рисунок 1.8 – Схема комбинированного выдавливания

Работа, проведенная Ларином С.Н. и коллегами [12] в рамках гранта РФФИ 20-08-00401, показало на основе моделирования процессов комбинированного выдавливания (рисунок 1.8) при варьировании геометрии инструмента и параметров трения, что сила процесса в наибольшей степени определяется степенью редукции. При этом влияние трения на величину силы оказалось

незначительным, хотя данный фактор существенно сказывается на распределении напряжений и деформаций. В связи с этим в последующих работах особое внимание рекомендуется уделять геометрическим характеристикам матрицы и пуансона.

В последние годы проведён ряд исследований, посвящённых анализу влияния геометрии инструмента, коэффициента трения, величины редукиции и температурных условий на напряжённо-деформированное состояние и силовые параметры процессов обратного, радиального и комбинированного выдавливания. Широкое распространение получили методы численного моделирования на основе метода конечных элементов, реализованные в программных комплексах QForm, Deform и др., позволяющие оценивать поля напряжений, деформаций и силовые характеристики процесса.

Вместе с тем, как показывают обзоры и результаты исследований, методы аналитических и приближённых расчётов, применявшиеся ранее, как правило, не давали возможности достаточно точно оценивать изменения накопленной (эквивалентной) деформации из-за сложности математического описания её распределения в объёме заготовки. Это приводит к определённым погрешностям в оценке параметров выдавливания и, как следствие, к возможным неточностям при прогнозировании течения материала и образования дефектов.

1.3 Методы исследования напряженно-деформированного состояния металла при холодной объемной штамповке.

Математическое моделирование остаётся базовым инструментом анализа прямого, обратного, радиального и комбинированного выдавливания: по нему прогнозируют силовые параметры, напряжённо-деформированное состояние, изучают влияние трения, геометрии и свойств материала, а также разрабатывают рациональные режимы деформации. Среди множества численных и аналитических методов особое место занимают метод конечных элементов (МКЭ) и метод баланса мощностей.

МКЭ позволяет восстанавливать трёхмерные поля скоростей, напряжений и деформаций с учётом реологии материала, контакта и геометрических нелинейностей. Российские исследования последних лет демонстрируют применение QForm 2D/3D для:

- анализа напряжённо-деформированного состояния и силовых режимов при выдавливании и формировании фланцев; показываються карты интенсивности деформаций и напряжений и истории усилий. [13]

- оценки износа пуансонов при обратном выдавливании (численная локализация зон повышенного износа и тепловыделения в парах трения). [14]

- учебно-прикладных работ по холодной штамповке, где описаны элементная база QForm, контактные постановки и алгоритмы пластичности; методики подтверждают, что QForm использует изопараметрические элементы и типовые модели упрочнения/трения. [15][16]

Метод баланса мощностей является одним из классических аналитических инструментов в теории пластической деформации металлов, широко применяемым для оценки усилий, энергозатрат и распределения напряжённо-деформированного состояния в процессах объёмной штамповки и выдавливания. Его суть заключается в приравнивании внешней мощности, затрачиваемой на деформирование заготовки, сумме мощностей, расходуемых на пластическую деформацию, преодоление трения и другие сопутствующие потери энергии.

Преимущества метода баланса мощностей:

- простота реализации по сравнению с численными методами (например, методом конечных элементов — МКЭ), что позволяет быстро получать оценочные результаты на начальных этапах проектирования технологического процесса;

- возможность аналитического описания зависимости усилия выдавливания от геометрических параметров заготовки и инструмента, коэффициентов трения и свойств материала;

- удобство в задачах оптимизации и аппроксимации, где требуется выявить влияние отдельных параметров процесса.

В последние годы метод баланса мощностей активно использовался российскими исследователями для моделирования различных схем выдавливания: прямого, обратного, радиального и комбинированного.

В работе Г.А. Данилина и Д.С. Филина [17] подробно анализируется комбинированная схема выдавливания (продольно-поперечное) с применением метода баланса мощностей, выделены составляющие мощностей внешних сил, мощность пластической деформации и трения. Результаты сравниваются с компьютерным моделированием.

В работе В.Н. Чудина и А.В. Черняева [18] уравнение энергетического равновесия (аналог метода баланса мощностей) применено для аналитического расчёта давления, кинематических характеристик, показателей пластичности и повреждаемости при формировании жёстких фланцев методом горячего выдавливания.

Кроме того, метод баланса мощностей был использован другими исследователями, такими как Д. А. Герасимов, А. А. Гартвиг, А. Л. Воронцов, С.С. Мусин, В.Н. Жерносек, Е.В. Каплун, П.В. Гончаров, В.М. Мищенко, А.А. Чередниченко.

Экспериментальные методы исследования напряженно-деформированного состояния. Развитие современного машиностроительного производства постоянно порождает перед специалистами новые инженерные вызовы. Существующие в настоящее время подходы к теоретическому анализу не всегда позволяют охватить весь спектр возникающих задач. Процессы, протекающие при пластической деформации, отличаются высокой сложностью, а их математическое описание сводится к обширным системам нелинейных дифференциальных уравнений, решение которых в общем виде практически нереализуемо. Чаще всего найденные решения носят приближённый или частный характер, поскольку формируются на основе значительного числа математических упрощений и предположений.

На практике наиболее эффективный путь к надёжному и своевременному получению ответов заключается в комбинированном использовании

аналитических расчётов, экспериментальных данных и знания технологических особенностей конкретного производства. По этой причине экспериментальные методы исследования занимают ключевое место в изучении и анализе процессов пластической деформации.

С учетом возрастающего интереса к локальным характеристикам процессов обработки металлов давлением возникает необходимость применения специализированных экспериментальных методик, позволяющих детально изучать распределение напряжений, траектории течения материала и особенности накопления деформации. Такие методы должны обеспечивать высокую точность в определении параметров в различных зонах пластической области и давать возможность визуализировать или количественно оценивать происходящие изменения. Среди них особое место занимают метод делительных сеток, метод визиопластичности и метод измерения твердости, которые позволяют комплексно анализировать пластическое течение, контролировать состояние материала в процессе формообразования и прогнозировать свойства конечного изделия.

Экспериментальные геометрические методы. Метод делительных сеток представляет собой один из классических экспериментальных методов исследования распределения деформаций и напряжённо-деформированного состояния тел при пластической или упругопластической деформации.

Суть метода заключается в нанесении на поверхность заготовки регулярной сетки (линейной или круговой), затем после деформации фиксируются координаты узловых точек сетки и производится анализ искажений ячеек; по этим данным рассчитываются локальные и накопленные деформации.

Размер элементарной ячейки должен быть оптимальным: слишком большой снижает точность локальной оценки, а чрезмерно малый может вызвать влияние микроанизотропии и микронеоднородности структуры, что приведёт к погрешностям измерений.

В условиях осесимметричного или плоского пластического течения можно выделить главные плоскости деформаций, форма которых сохраняется в процессе обработки. Это позволяет определять деформационное состояние по перемещению

характерных точек или по изменениям свойств материала в пределах выделенной элементарной фигуры.

Ключевые задачи исследования заключаются в определении полей деформаций и качественном анализе течения материала при процессах ОМД. Экспериментальные геометрические методы, применяемые для таких целей, делятся на три группы:

- 1) методы конечных деформаций;
- 2) поэтапные методы;
- 3) методы течения.

Методы конечных деформаций опираются на сопоставление исходной и конечной формы элементарного объёма (часто рассматриваемого как преобразование «сфера → эллипсоид деформации»). Главные оси эллипсоида задают направления главных деформаций, а их величины определяют через логарифмы отношений характерных размеров. Этот подход позволяет определить интенсивность накопленной сдвиговой деформации и количественно оценить работу, затраченную на формоизменение. Он эффективен для анализа процессов с монотонным деформированием, когда направление главных осей остаётся постоянным.

Поэтапные методы разбивают процесс на последовательные стадии. На каждом этапе измеряются те же параметры, что и в методах конечных деформаций, после чего суммируются значения интенсивности деформации для получения накопленного эффекта. Такой способ позволяет отслеживать эволюцию напряжений и деформаций при немонотонном формоизменении и сложных условиях нагружения [19].

Методы течения рассматривают элементарный объём как непрерывную функцию времени или перемещения в пластической области. В любой момент можно определить компоненты скоростей деформаций и направления главных осей этих скоростей. Накопленная интенсивность сдвиговой деформации определяется интегрированием по выбранному параметру. Этот подход

обеспечивает наиболее достоверную информацию о физическом состоянии материала и работе деформации, особенно при сложных режимах обработки.

Таким образом, три группы геометрических методов различаются способом обработки данных и применимостью к различным режимам деформирования, позволяя инженеру выбирать оптимальный метод для конкретного технологического процесса.

Метод визиопластичности применяется для исследования локальных характеристик пластического течения материала. На поверхности или в меридиональной плоскости заготовки наносится сетка, фиксируемая на каждом малом этапе деформации с помощью фотографий. По искажениям сетки восстанавливаются траектории перемещения элементарных объёмов и мгновенное положение узлов.

Анализ перемещений позволяет определить величину и направление скорости деформаций в каждой точке пластической области, а также оценить накопленную интенсивность деформации. Компоненты скоростей рассчитываются на основе уравнений линейной теории деформаций, что обеспечивает количественную оценку состояния материала.

Следует учитывать, что использование линейной теории малых деформаций может вносить погрешности, так как не учитывается вращение окрестности точки как целого и игнорируется второе уравнение равновесия. Несмотря на это, метод визиопластичности остаётся эффективным инструментом для получения детальной информации о локальных процессах деформирования.

Метод измерения твердости опирается на закономерность изменения механических свойств металлов при их пластическом деформировании. В процессе работы металл упрочняется: увеличивается сопротивление к последующей деформации и уменьшается пластичность. Измеряя твердость в различных точках заготовки и сопоставляя с установленной зависимостью для конкретного материала, можно оценить локальное напряженно-деформированное состояние и определить работу, затраченную на пластическую деформацию.

Связь между напряжениями и деформациями задаётся кривой течения материала и практически не зависит от конкретной схемы нагружения для большинства металлов. Это позволяет использовать твердость как косвенный показатель состояния материала в любой точке заготовки. Метод особенно информативен для умеренных деформаций: при слишком малых деформациях разброс исходной твердости создаёт погрешности, а при значительных упрочнениях твердость становится почти постоянной и менее показательна.

Типичная зависимость между твердостью, интенсивностью напряжений и интенсивностью деформаций называется тарифовочным графиком (рисунок 1.9).

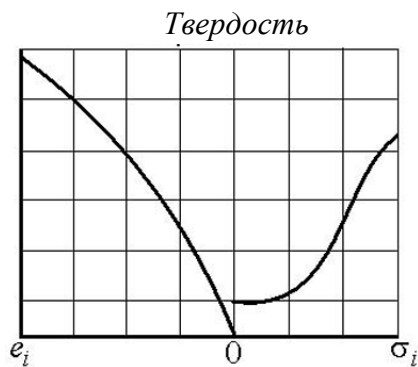


Рисунок 1.9 – Зависимость между твердостью, интенсивностью напряжений и интенсивностью деформации (тарифовочный график)

Для практических исследований применяются разные методы измерения, выбор которых зависит от размеров области деформации и характера её распределения. Для больших участков деформации используют метод Бриннеля, для малых – метод Виккерса. Измерение микротвердости применяется редко, только при небольших размерах пластических областей или сильной неоднородности, так как процедура сложна и чувствительна к качеству подготовки поверхности.

Условия определения твердости регламентируются несколькими ГОСТами, в зависимости от метода измерения и материала. Основными стандартами являются: 9012-59 (по Бриннелю), ГОСТ 9013-59 (по Роквеллу), ГОСТ 2999-75 (по Виккерсу) и ГОСТ 9450-76 (микротвердость).

В работе В. И. Болобова и соавт. [20] рассмотрено влияние степени пластической деформации на изменение твёрдости различных металлов и сплавов

при различных способах деформирования. Авторы провели серию экспериментов, в которых исследовали зависимость твёрдости от величины деформации для материалов: сталей 45, 30ХГСА, 110Г13Л, никеля НП2, латуни Л63, а также сплавов АМг3, АМц и титана ВТ1-0. Показано, что для всех материалов наблюдается рост твёрдости с увеличением степени деформации, что свидетельствует об эффекте наклёпа и повышении прочностных характеристик. Полученные авторами зависимости позволяют оценивать уровень упрочнения металла в зависимости от режима деформирования и могут использоваться для прогнозирования свойств деталей, изготавливаемых методом холодной объёмной штамповки.

В исследовании [21] проведён сравнительный анализ методов одноосного растяжения и одноосного сжатия с целью построения калибровочной зависимости микротвёрдости H_{μ} от интенсивности пластической деформации e_i . Были испытаны четыре сплава – техническая медь, латунь Л60, сталь 15 и алюминий-магний-магний сплав АМг5 – при различных уровнях деформации и нагрузках на индентор. Результаты показали, что при небольших деформациях (до примерно 0,3) метод испытаний (растяжение или сжатие) несущественен, тогда как в области больших пластических деформаций предпочтительнее применять одноосное сжатие для повышения точности. В частности, для сплава АМг5 разные схемы испытаний дали различные зависимости $H_{\mu}(e_i)$, что требует дальнейшего изучения.

1.4 Технологические подходы к производству ступиц

Деталь типа «ступица» представляет собой один из наиболее ответственных элементов в конструкциях ведущих узлов трансмиссий, колесных модулей и механизмов сцепления. Её основными функциями являются обеспечение жёсткого и надёжного соединения между валом, диском и фланцем, передача крутящего момента, а также восприятие радиальных и осевых нагрузок, возникающих в процессе эксплуатации. От точности геометрии и качества изготовления ступицы

напрямую зависят долговечность, виброустойчивость и надёжность работы агрегатов.

В современной автомобильной и машиностроительной промышленности ступичные детали производятся в значительных объёмах — их количество исчисляется десятками миллионов единиц в год. По оценкам аналитических агентств, мировой рынок ступичных узлов превышает несколько десятков миллиардов долларов и характеризуется устойчивым ежегодным ростом.

Современные технологии изготовления ступиц охватывают широкий спектр методов, включающих традиционное литьё, прецизионную механическую обработку, процессы горячей и холодной объёмной штамповки, а также комбинированные маршруты, сочетающие получение заготовки, пластическое формоизменение и последующую механическую обработку. Выбор конкретной технологии определяется требованиями к точности геометрических параметров, уровню механических свойств, металлургической однородности и экономическим показателям производства.

В работе Ван Вэньчжэня [22] представлен технологический процесс изготовления ступицы из серого чугуна марки СЧ-15 (ГОСТ 1412-85) (рисунок 1.10), включающий получение заготовки методом центробежного литья с последующей многостадийной механической обработкой. После литья заготовка подвергается токарной обработке на станках с ЧПУ, далее выполняются токарно-револьверная, сверлильная и фрезерная операции, обеспечивающие окончательное формообразование и достижение требуемой точности размеров.

Несмотря на широкое применение, данная технология имеет ряд ограничений: литые заготовки характеризуются повышенной пористостью и неоднородностью структуры, что снижает надёжность детали при переменных нагрузках. Дополнительные операции механической обработки повышают трудоёмкость и себестоимость производства, а также приводят к значительным потерям материала. Эти факторы ограничивают эффективность применения литья при серийном производстве ступиц, предъявляющем повышенные требования к прочности и качеству поверхности.

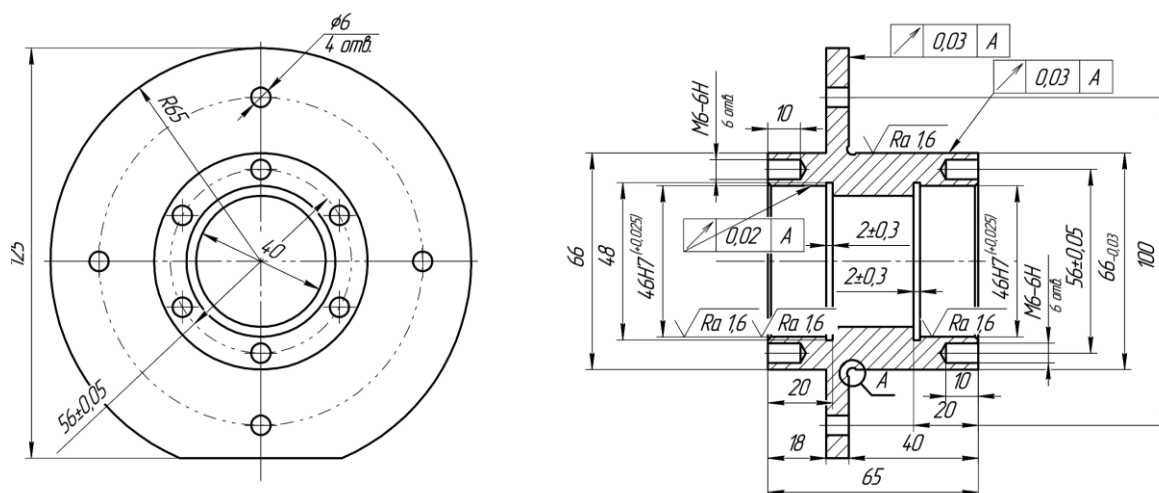


Рисунок 1.10 – Чертеж ступицы работы Вана Вэньчжэни

В работе Д. Е. Егорова [23] подробно рассмотрен технологический процесс изготовления ступицы автомобиля «Лада Гранта» массой около 1,6 кг (рисунок 1.11). Производственная схема включает многооперационный маршрут механической обработки после получения штампованной заготовки в виде ступенчатого фланца без отверстий. На последующих этапах выполняется последовательность токарных, сверлильных, фрезерных, протяжных и шлифовальных операций с использованием многошпиндельных полуавтоматов и агрегатных станков.

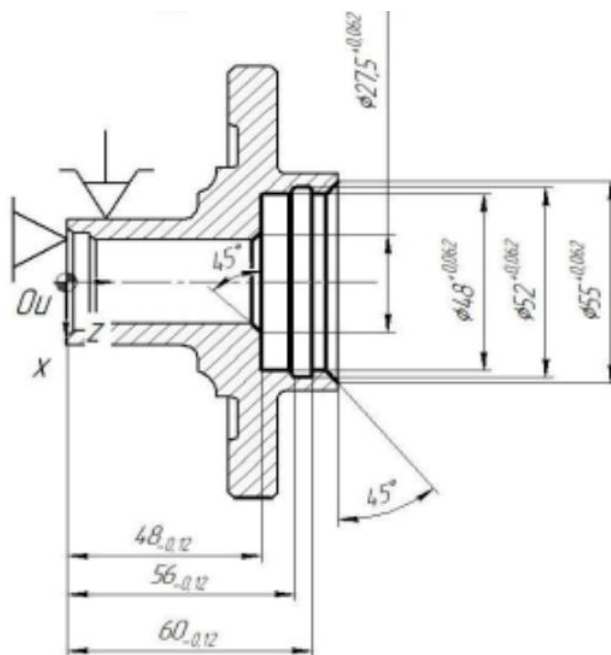


Рисунок 1.11 – Чертеж ступицы работы Егорова Д.Е.

Данная технология обеспечивает требуемую точность и чистоту поверхности, однако характеризуется высокой трудоёмкостью, множеством установок и значительными затратами на механообработку. Кроме того, значительная часть металла удаляется в виде стружки, что снижает материалоемкость и экономическую эффективность процесса при массовом производстве.

На фоне рассмотренных традиционных методов получения ступиц в последние годы всё большее внимание уделяется инструментам вычислительного анализа. Переход к численным методам позволяет исследовать процессы формообразования более детально и сопоставлять различные технологические решения на этапе проектирования. В этой связи особое значение приобретает применение специализированных программных комплексов, таких как QForm и Deform, которые обеспечивают моделирование напряжённо-деформированного состояния и параметров течения материала при изготовлении ступиц.

Современные тенденции развития технологий обработки давлением демонстрируют активное внедрение методов оптимизации, интегрированных с математическим и компьютерным моделированием. Согласно обзору Kitayama S. [24], оптимизация геометрии инструмента, параметров деформирования и формы заготовки с применением градиентных алгоритмов, эволюционных методов и моделей-заместителей обеспечивает существенное повышение эффективности процессов штамповки. Особое внимание уделяется сочетанию методов оптимизации с конечно-элементным моделированием (QForm, DEFORM), что позволяет более точно предсказывать распределение напряжений и деформаций, течения материала, формирование дефектов и силы деформирования. Указанные подходы подтверждают актуальность применения математического моделирования и компьютерной симуляции в исследовании процессов комбинированного выдавливания и разработке технологий получения деталей типа «ступица».

В работе М. Nawryluk и соавт. [25] представлен детальный анализ многооперационного процесса изготовления поковки типа «ступица» (рисунок

1.12) для трансмиссионных систем автомобилей методом штамповки на кривошипном прессе. Цель исследования заключалась в совершенствовании существующей технологии на основе численного моделирования. Для описания термомеханического поведения металла использована программа QForm 9.0.9, а для проектирования инструмента — CATIA V5R20. Численное моделирование позволило выявить распределение пластических деформаций, температурных полей, контактных напряжений и сил деформирования, а также определить возможные дефекты заполнения полостей штампа.

В результате анализа были предложены корректировки технологического маршрута, обеспечившие повышение точности формы и размеров поковок. Авторы показали, что высокие температурные градиенты и значительные силы деформирования могут вызывать преждевременный износ инструмента, что требует дальнейших исследований по оптимизации параметров штамповки и упрочнению поверхности инструмента. Работа подчёркивает высокую эффективность применения методов конечно-элементного моделирования для оценки и оптимизации промышленных процессов, что подтверждает актуальность использования программных пакетов, таких как QForm, при разработке и проверке новых технологий холодной и горячей объёмной штамповки.

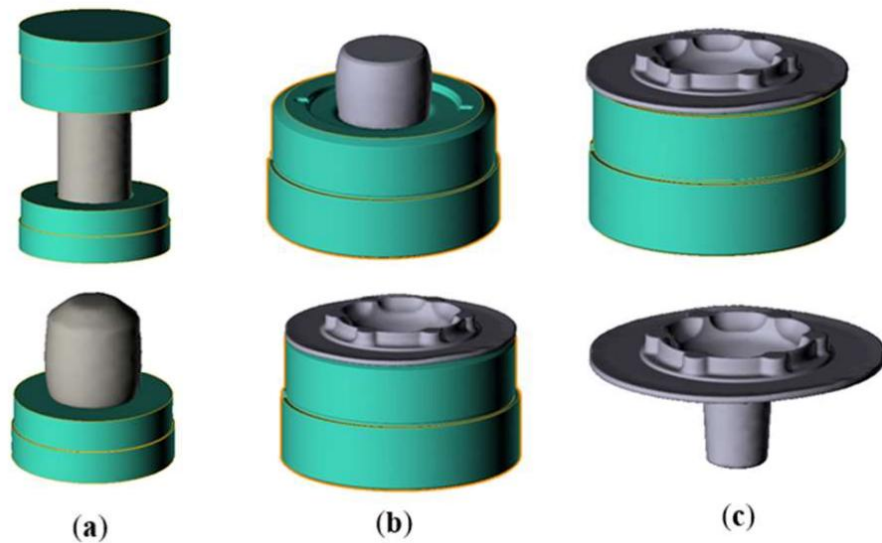


Рисунок 1.12 – Последовательность операций по изготовлению поковки ступицы

В работе А. Gontarz и соавт. [26] исследованы новые технологические решения для получения поволоки ступицы велосипедного колеса с использованием трёхползунного прессы, что представляет собой перспективное направление развития холодной и холодно-теплой штамповки. Авторы предложили две схемы формообразования: получение поковки с осевой полостью методом безоблойной штамповки и изготовление ступицы из трубной заготовки. Для оценки работоспособности процессов было выполнено численное моделирование течения металла, заполнения полостей штампа и распределения деформаций с использованием программного комплекса QForm, а один из вариантов дополнительно прошёл экспериментальную проверку.

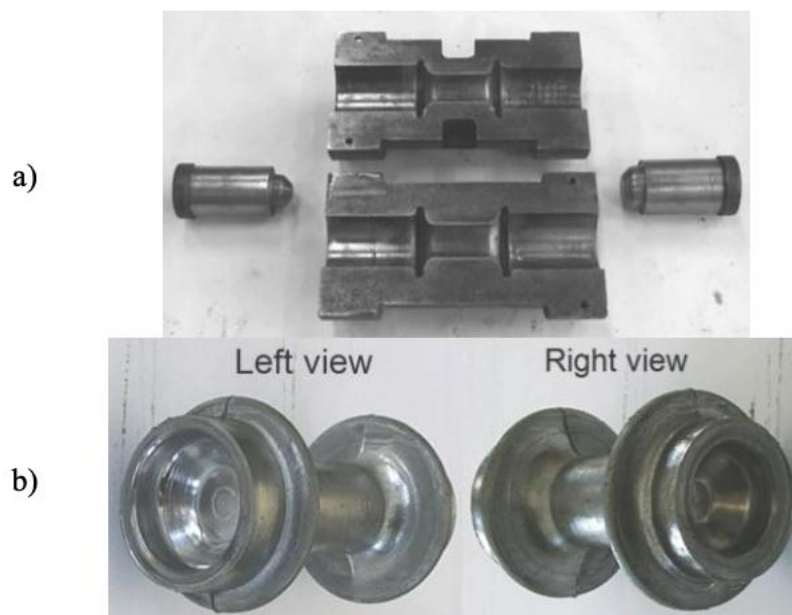


Рисунок 1.13 – Экспериментальные результаты: а) инструменты, б) штампуемая деталь «ступица»

Результаты моделирования и экспериментов подтвердили правильность проектирования процессов и их способность обеспечивать качественное формообразование ступицы без поверхностных дефектов (рисунок 1.13). Установлено значительное снижение расхода материала и энергопотребления по сравнению с традиционным молотовым штампованием, что подчёркивает технологические преимущества холодной и безоблойной штамповки для получения полых деталей типа «ступица». Одновременно отмечено, что внедрение трёхползунных прессов связано с рядом ограничений, однако потенциал

применения подобной технологии для производства легких и точных ступиц является весьма высоким.

В целом, в настоящее время большинство ступиц продолжают изготавливаться по традиционным технологическим маршрутам – литём с последующей механической обработкой, включая токарные операции на станках с ЧПУ. Несмотря на ряд недостатков таких методов, связанных с повышенной материалоемкостью, значительными припусками на обработку, ограниченной однородностью структуры литых заготовок и повышенной трудоёмкостью, они остаются широко распространёнными благодаря технологической доступности, отработанности оборудования и возможности организации крупносерийного производства.

В рамках данной диссертационной работы деталь типа «ступица» рассматривается как сложное составное изделие (рисунок 1.14), формируемое методом холодной объёмной штамповки при комбинированном выдавливании цилиндрической заготовки с последующим неразъёмным соединением с фланцем. Конструктивно и технологически процесс организован таким образом, что основная пластическая деформация реализуется в цилиндрической заготовке, тогда как фланец, выполненный из более трудно деформируемого материала, участвует в формообразовании в минимальной степени и сохраняет исходную геометрию.

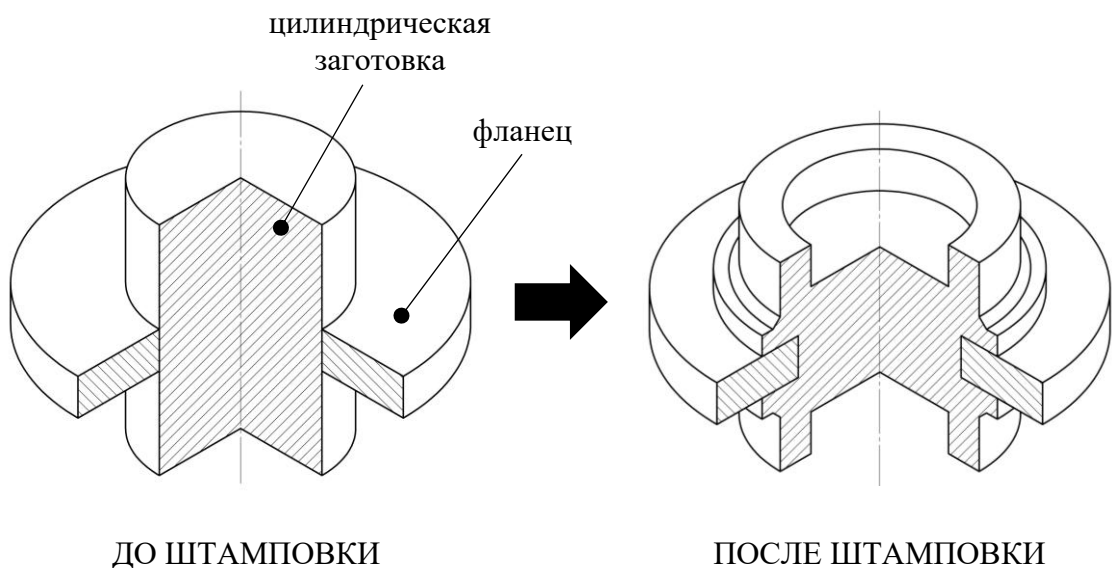


Рисунок 1.14 – Сложное составное изделие «ступица»

1.5 Выводы по главе 1

1. Технология комбинированного выдавливания является одной из наиболее эффективных при формообразовании деталей сложной конфигурации, особенно изделий типа «деталь с фланцем». Её применение позволяет объединить преимущества радиального и обратного выдавливания, обеспечивая рациональное течение металла, повышение коэффициента использования материала и снижение энергосиловых параметров процесса. Указанные особенности делают данный способ целесообразным для исследования и совершенствования технологии получения детали типа «ступица» диска сцепления автомобиля.

2. Широкое распространение получило математическое моделирование процессов выдавливания на основе метода баланса мощностей, а также применение программных комплексов QForm и Deform, обеспечивающих трехмерный анализ напряженно-деформированного состояния. Однако известные модели недостаточно точно отражают распределение накопленной (эквивалентной) деформации из-за сложности ее описания в объеме заготовки. В связи с этим актуальной является разработка математической модели на основе метода баланса мощностей с учётом изменения механических свойств материала и последующее сравнение полученных результатов с данными конечно-элементного моделирования в QForm.

3. Значительное развитие получили экспериментальные методы исследования напряженно-деформированного состояния, в частности, метод измерения твердости, позволяющий количественно оценивать степень упрочнения материала после пластической деформации. Несмотря на широкое применение метода, отсутствуют детальные исследования зависимости твердости от интенсивности напряжений и степени деформации для сталей 10 и 20, что обосновывает необходимость построения соответствующих тарировочных зависимостей и экспериментальной проверки закономерностей упрочнения этих материалов.

4. Несмотря на широкое распространение традиционных методов получения ступиц, их технологические и эксплуатационные ограничения подчёркивают необходимость дальнейших исследований в области формообразования. Анализ существующих публикаций показывает, что применение методов холодной объемной штамповки и численного моделирования обладает высоким потенциалом для повышения качества и экономичности производства ступиц, однако данные направления пока недостаточно разработаны. Это подтверждает актуальность и практическую значимость разработки методики получения сложного составного изделия типа «ступица» методом холодной объемной штамповки, а также совершенствования технологии его изготовления на основе математического и компьютерного моделирования.

5. В диссертационной работе деталь типа «ступица» рассматривается как сложное составное изделие, формируемое методом холодной объемной штамповки при комбинированном выдавливании цилиндрической заготовки с последующим неразъемным соединением с фланцем. При этом основная пластическая деформация и изменение механических свойств реализуются в цилиндрической заготовке, тогда как фланец из более трудно деформируемого материала участвует в формообразовании в минимальной степени, что определяет направление дальнейших исследований.

ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОМБИНИРОВАННОГО ПРОЦЕССА РАДИАЛЬНОГО И ОБРАТНОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ

2.1 Методика проведения математической модели методом баланса мощностей

Для теоретического исследования процесса комбинированного радиально-обратного выдавливания, при котором цилиндрическая заготовка в процессе холодной объёмной штамповки преобразуется в заготовку типа «стакан с фланцем», требуется разработка математической модели, обеспечивающей поэтапный анализ изменения энергосиловых параметров деформирования. Такая модель должна позволять прогнозировать силу деформирования при различных геометрических параметрах инструмента и заготовки, а также оценивать характер течения металла, заполнение полости матрицы и формирование конечного профиля изделия. Получаемая заготовка типа «стакан с фланцем» в дальнейшем используется для неразъёмного соединения с фланцем, что является ключевым этапом получения сложного составного изделия типа «ступица».

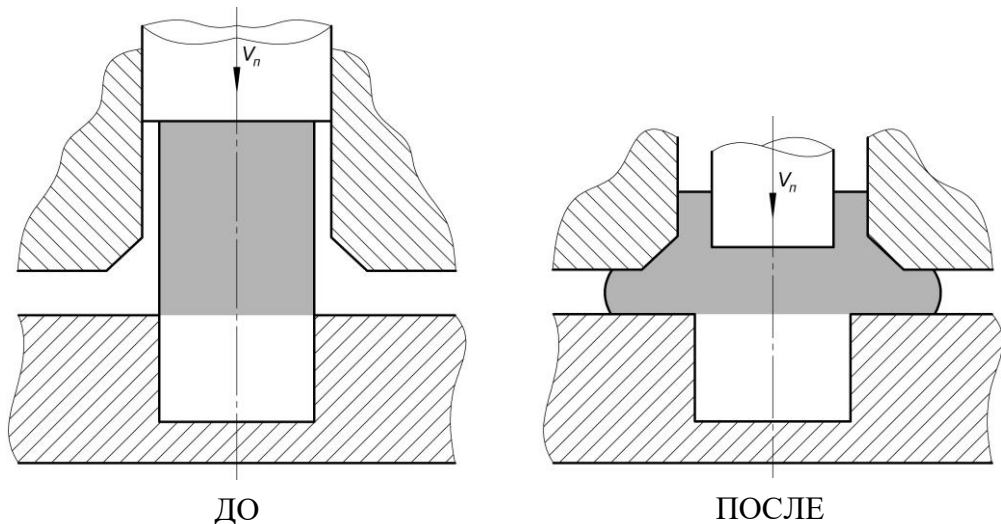


Рисунок 2.1 – Формирование цилиндрической заготовки в процессе комбинированного выдавливания

На рисунке 2.1 показана цилиндрическая заготовка до и после процесса выдавливания. В ходе анализа рассматривается только та часть материала

цилиндрической заготовки, которая участвует в пластической деформации и расположена выше нижней матрицы (выделена более темной заливкой).

Одним из эффективных подходов к решению подобных задач, связанных с пластической деформацией, является метод энергетического баланса (метод баланса мощностей) [27, 28, 29, 30, 31, 32].

Существенным преимуществом метода баланса мощностей является его удобство при реализации с использованием ЭВМ. Компьютерные вычисления позволяют не только ускорить решение задач, связанных с определением энергосиловых параметров, но и обеспечивают возможность автоматизированного расчёта функций и величин, описывающих кинематические характеристики течения материала. Дополнительным достоинством является удобство вычисления интегралов, в которых варьируются пространственные координаты, геометрические размеры инструмента и параметры напряжённо-деформированного состояния. Такая гибкость расчётов делает метод особенно эффективным при исследовании сложных процессов пластического деформирования и сравнении результатов с данными численного моделирования.

В рамках энергетического метода деформируемый объём заготовки делится на отдельные зоны пластического течения. Для каждой из них формируется поле скоростей, позволяющее вычислить мощность, расходуемую на деформацию. Минимизация соответствующего функционала дает возможность уточнить значения сил деформирования и обосновать выбор рациональных размеров инструмента для рассматриваемого процесса [32].

Допущения, характерные для применения энергетического метода:

- материал изотропный и несжимаемый;
- упругие деформации пренебрегаются;
- скорость движения инструмента постоянна;
- контактное трение подчиняется закону Прандтля;
- кинематические граничные условия заданы;
- условие неразрывности потока (сплошности материала);
- температурные эффекты не учитываются;

- трение и деформации распределены равномерно по зонам.

С целью определения деформирующей силы и локации границы раздела течения было выведено уравнение энергетического баланса, основанное на равенстве мощностей внешних активных и внутренних сил, рассчитанных на кинематически допустимом поле скоростей [32, 33, 34]:

$$p \cdot S \cdot V_0 = \sum W_\delta + \sum W_{cp} + \sum W_{mp}, \quad (2.1)$$

где p – среднее контактное давление;

S – площадь контакта между пуансоном и заготовкой;

V_0 – скорость движения пуансона;

W_δ – мощность сил, затраченных на пластическую деформацию;

W_{cp} – мощность сил среза;

W_{mp} – мощность сил трения.

$$p \cdot S \cdot V_{II} = \iiint_{V_\delta} \sigma_s \cdot \dot{\varepsilon}_i dV_\delta + \iint_{S_{mp}} \tau_{mp} \cdot |V_{mp}| dS_{mp} + \iint_{S_{cp}} \tau_{cp} \cdot |V_{cp}| dS_{cp} \quad (2.2)$$

Мощность сил, затраченных на пластическую деформацию W_δ [32]:

$$W_\delta = \iiint_{V_\delta} \sigma_s \cdot \dot{\varepsilon}_i \cdot dV_\delta \quad (2.3)$$

где σ_s – напряжение текучести, МПа;

$\dot{\varepsilon}_i$ – интенсивность скоростей деформации;

V_δ – объем пластической зоны (очага деформации).

Интенсивность скорости деформации определяется по формуле [36]:

$$\dot{\varepsilon}_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\dot{\varepsilon}_\rho - \dot{\varepsilon}_\theta)^2 + (\dot{\varepsilon}_\theta - \dot{\varepsilon}_z)^2 + (\dot{\varepsilon}_z - \dot{\varepsilon}_\rho)^2 + \frac{3}{2} \gamma_{\rho z}^2}, \quad (2.4)$$

где $\dot{\varepsilon}_i = \frac{dV_z}{dz}$, $\dot{\varepsilon}_\rho = \frac{dV_\rho}{d\rho}$, $\dot{\varepsilon}_\theta = \frac{V_\rho}{\rho}$, $\dot{\gamma}_{\rho z} = \frac{dV_\rho}{dz} + \frac{dV_z}{d\rho}$ – компоненты тензора скоростей деформации.

В данном методе следует принять условие несжимаемости материала:

$$\dot{\varepsilon}_z + \dot{\varepsilon}_\rho + \dot{\varepsilon}_\theta = 0 \quad (2.5)$$

Накопленная деформация определяется по формуле [36]:

$$\varepsilon_i^{[m]} = \int_{t_n}^{t_k} \dot{\varepsilon}_i dt, \quad (2.6)$$

где t_n и t_k – начальное и конечное время деформирования в зоне m .

Мощность сил среза W_{cp} [32]:

$$W_{cp} = \iint_{S_{cp}} \tau_{cp} |V_{cp}| dS_{cp}, \quad (2.7)$$

где τ_{cp} – напряжение текучести на сдвиг, МПа; $\tau_{cp} = k = \sigma_s / \sqrt{3}$;

V_{cp} – относительная скорость среза

S_{cp} – площадь поверхности среза.

Мощность сил трения W_{mp} [32]:

$$W_{mp} = \iint_{S_{mp}} \tau_{mp} |V_{mp}| dS_{mp}, \quad (2.8)$$

где τ_{mp} – напряжение трения в рассматриваемой точке, МПа;

$$\tau_{mp} = \sigma_i \mu, \quad (2.9)$$

μ – коэффициент трения ($0 \leq \mu \leq 0,5$);

V_{mp} – относительная скорость скольжения материала на поверхности;

S_{mp} – контактная площадь.

Для учёта деформационного упрочнения используется экспериментально полученная степенная аппроксимация, применяемая для определения истинного напряжения текучести материала заготовки σ_i по формуле [37, 38]:

$$\sigma_i = \sigma_0 + A \cdot \varepsilon_i^n,$$

где σ_0 – предел текучести материала в исходном состоянии;

A, n – эмпирические коэффициенты, получаемые экспериментально.

2.2 Этапы процесса радиального и обратного выдавливания в конической матрице

В исследуемом процессе (рисунок 2.2) можно условно выделить две этапы.

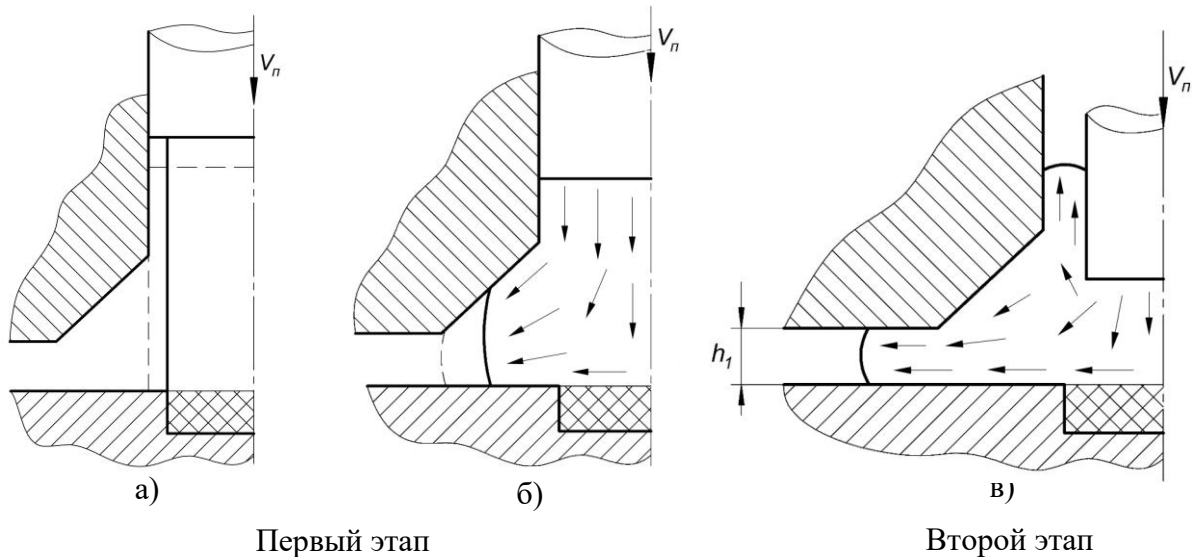


Рисунок 2.2 – Характерные схемы процесса радиального и обратного выдавливания в конической матрице: а – осадка (первый этап); б – радиальное выдавливание (первый этап); в – комбинированное выдавливание (второй этап)

На первом этапе заготовка осаживается до контакта с матрицей (рисунок 2.2 а). После этого происходит заполнение её конической полости (рисунок 2.2 б), сопровождаемое радиальным выдавливанием материала. По мере осадки и заполнения полости между пуансоном и матрицей наблюдается уменьшение высоты заготовки к началу второго этапа процесса. Если исходный радиус исследуемой заготовки равен внутреннему радиусу матрицы, процесс осадки можно не учитывать.

Второй этап процесса (рисунок 2.2 в) начинается с момента, когда коническая полость матрицы полностью заполнена материалом, и продолжается до достижения пуансоном координаты h_1 , соответствующей толщине формируемого фланца. На данном этапе используется пуансон с меньшим диаметром, что создаёт зазор между ним и матрицей. Именно в этом зазоре возникает обратное течение металла.

На данном этапе реализуется комбинированное выдавливание: материал перемещается одновременно в радиальном и обратном направлениях, формируя фланец и стенки будущего стакана.

Продолжительность этапа, его границы, а также скорости течения металла в различных направлениях зависят от геометрических параметров инструмента – размеров пуансона и матрицы.

2.3 Моделирование процесса выдавливания с учетом упрочнения

Моделирование силового режима первого этапа. На данном этапе более подробно анализируется процесс радиального выдавливания.

Первым этапом метода баланса мощностей является выбор кинематически допустимого поля скоростей в каждой зоне очага деформации.

В поперечном сечении заготовки можно выделить несколько характерных зон течения материала: зона 1 считается недеформируемой и движется как абсолютно жёсткое тело; зона 2 соответствует области осадки; в зоне 3 реализуется радиальное перемещение металла в коническую полость матрицы.

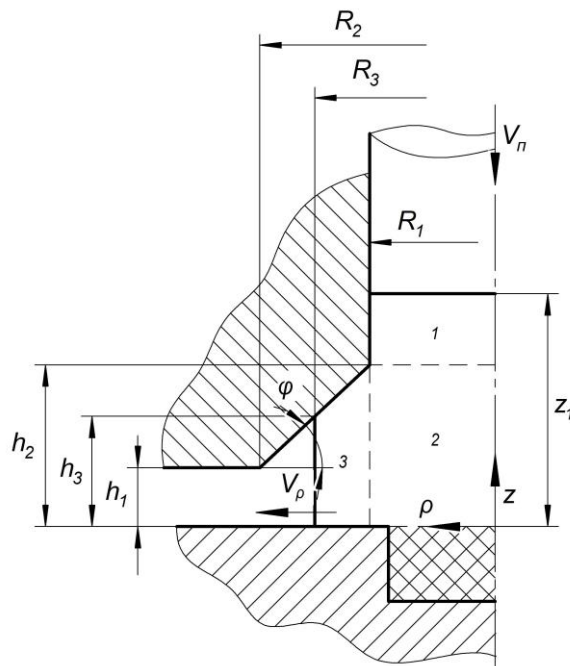


Рисунок 2.3 – Расчетная схема для радиального выдавливания первого этапа

Для математического описания процесса выбрана цилиндрическая система координат ρ , θ , z , где ось z совпадает с направлением движения пуансона, а координата ρ соответствует радиальному направлению. Вектор скорости материала при осесимметричном течении описывается компонентами V_ρ и V_z ,

характеризующими соответственно радиальное и осевое перемещение частиц металла.

Примем также, что выбранное поле скоростей удовлетворяет условию непрерывности: нормальная составляющая скорости сохраняет непрерывность при переходе через границы зон, тогда как касательные компоненты могут изменяться скачкообразно.

Процесс осадки заготовки.

Радиус заготовки при осадке определяется по формуле:

$$R = R_0 \cdot \sqrt{\frac{h_0}{z_1}}, \quad (2.10)$$

где h_0 – исходная высота заготовки;

R_0 – исходный радиус заготовки;

z_1 – координата пуансона.

Скоростное поле заготовки при осадке:

$$\begin{aligned} V_z &= -\frac{V_{II}}{z_1} \cdot z \\ V_\rho &= \frac{V_{II}}{2z_1} \cdot \rho \end{aligned} \quad (2.11)$$

где V_{II} – скорость движения пуансона.

Составляющие тензора скоростей деформаций:

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_z &= -\frac{V_{II}}{z_1}; \\ \dot{\varepsilon}_\rho &= \frac{V_{II}}{2z_1}; \\ \dot{\varepsilon}_\theta &= \frac{V_{II}}{2z_1}; \\ \gamma_{\rho z} &= 0. \end{aligned}$$

Интенсивность скорости деформации в цилиндрических координатах:

$$\dot{\varepsilon}_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\dot{\varepsilon}_\rho - \dot{\varepsilon}_\theta)^2 + (\dot{\varepsilon}_\theta - \dot{\varepsilon}_z)^2 + (\dot{\varepsilon}_z - \dot{\varepsilon}_\rho)^2 + \frac{3}{2} \gamma_{\rho z}^2} = \frac{V_{II}}{z_1} \quad (2.12)$$

Накопленная деформация определяем по формуле [36]:

$$\varepsilon_n = \ln \frac{h_0}{z_1} \quad (2.13)$$

Экспериментально полученная степенная аппроксимация применяется для определения истинного напряжения течения:

$$\sigma_i = \sigma_0 + A \cdot \varepsilon_n^n.$$

Мощность пластической деформации при осадке первом этапе определяется по формуле:

$$\begin{aligned} W_d &= \int_0^{2\pi} \int_0^R \int_0^{z_1} \sigma_i \cdot \dot{\varepsilon}_i \cdot \rho \cdot dz d\rho d\theta = 2\pi \cdot \sigma_i \cdot \frac{V_{II}}{z_1} \int_0^R \int_0^{z_1} \rho \cdot dz d\rho = \\ &= \pi \cdot \sigma_i \cdot R^2 \cdot V_{II}. \end{aligned} \quad (2.14)$$

Мощность сил трения:

$$\begin{aligned} W_{mp} &= \int_0^{2\pi} \int_0^R \sigma_i \cdot \mu \cdot |V_\rho| \cdot \rho d\rho d\theta = \pi \cdot \sigma_i \cdot \mu \cdot \frac{V_{II}}{z_1} \int_0^R \rho^2 d\rho = \\ &= \frac{\pi \cdot \sigma_i \cdot \mu \cdot V_{II} \cdot R^3}{3z_1}. \end{aligned} \quad (2.15)$$

Процесс радиального выдавливания.

Зона 1.

В этой зоне пластическая деформация отсутствует, однако имеет трение между заготовкой и матрицей.

Скоростное поле

$$V_z^{[1]} = -V_{II}; \quad V_\rho^{[2]} = 0.$$

Высота конической части матрицы:

$$h_2 = h_1 + tg\varphi \cdot (R_2 - R_1). \quad (2.16)$$

Накопленная деформация определяем по формуле [36]:

$$\varepsilon_n^{[1]} = \ln \frac{h_0}{z_{10}}. \quad (2.17)$$

где z_{10} – высота заготовки после осадки, $z_{10} = h_0 \cdot R_0^2 / R_1^2$.

Истинное напряжение течения пределяется по формуле:

$$\sigma_i^{[1]} = \sigma_0 + A \cdot (\varepsilon_n^{[1]})^n$$

Мощность сил трения в зоне 1:

$$\begin{aligned}
W_{mp}^{[1]} &= \int_0^{2\pi} \int_{h_2}^{z_1} \sigma_i^{[1]} \cdot \mu \cdot |V_z^{[1]}| \cdot R_1 d\rho d\theta = 2\pi \cdot \sigma_i^{[1]} \cdot \mu \cdot V_{II} \int_{h_2}^{z_1} d\rho = \\
&= 2\pi \cdot \sigma_i^{[1]} \cdot \mu \cdot V_{II} \cdot (z_1 - h_2).
\end{aligned} \tag{2.18}$$

Зона 2. Зона осадки заготовки.

Скоростное поле имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
V_z^{[2]} &= -\frac{V_{II}}{h_2} \cdot z; \\
V_\rho^{[2]} &= \frac{V_{II}}{2h_2} \cdot \rho.
\end{aligned} \tag{2.19}$$

Составляющие тензора скоростей деформаций выглядят таким образом:

$$\begin{aligned}
\dot{\varepsilon}_z &= -\frac{V_{II}}{h_2}; \\
\dot{\varepsilon}_\rho &= \frac{V_{II}}{2h_2}; \\
\dot{\varepsilon}_\theta &= \frac{V_{II}}{2h_2}; \\
\gamma_{\rho z} &= 0.
\end{aligned}$$

Интенсивность скорости деформации:

$$\dot{\varepsilon}_i^{[2]} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\dot{\varepsilon}_\rho - \dot{\varepsilon}_\theta)^2 + (\dot{\varepsilon}_\theta - \dot{\varepsilon}_z)^2 + (\dot{\varepsilon}_z - \dot{\varepsilon}_\rho)^2 + \frac{3}{2} \gamma_{\rho z}^2} = \frac{V_{II}}{h_2} \tag{2.20}$$

Накопленная деформация в зоне осадки определяется таким образом [36]:

$$\varepsilon_n^{[2]} = \ln \frac{h_0}{z_1}; \tag{2.21}$$

Экспериментально полученная степенная аппроксимация применяется для определения истинного напряжения течения:

$$\sigma_i^{[2]} = \sigma_0 + A \cdot (\varepsilon_n^{[2]})^n.$$

Мощность пластической деформации:

$$\begin{aligned}
W_\delta^{[2]} &= \int_0^{2\pi} \int_0^{R_1} \int_0^{h_2} \sigma_i^{[2]} \cdot \dot{\varepsilon}_i^{[2]} \cdot \rho \cdot dz d\rho d\theta = 2\pi \cdot \sigma_i^{[2]} \cdot \frac{V_{II}}{h_2} \int_0^{R_1} \int_0^{h_2} \rho \cdot dz d\rho = \\
&= \pi \cdot \sigma_i^{[2]} \cdot R_1^2 \cdot V_{II}.
\end{aligned} \tag{2.22}$$

Мощность сил трения в зоне:

$$\begin{aligned}
W_{mp}^{[2]} &= \int_0^{2\pi} \int_0^{R_1} \sigma_i^{[2]} \cdot \mu \cdot |V_\rho^{[2]}| \cdot \rho d\rho d\theta = \pi \cdot \sigma_i^{[2]} \cdot \mu \cdot \frac{V_\Pi}{h_2} \int_0^{R_1} \rho^2 d\rho = \\
&= \pi \cdot \sigma_i^{[2]} \cdot \mu \cdot \frac{V_\Pi \cdot R_1^3}{3h_2}.
\end{aligned} \tag{2.23}$$

Мощность сил среза на границе с зоной 1 (при $z = h_2$) определяется по формуле (2.7):

$$\begin{aligned}
W_{cp}^{[2-1]} &= \int_0^{2\pi} \int_0^{R_1} \tau_{cp} |V_\rho^{[1]} - V_\rho^{[2]}| \cdot \rho d\rho d\theta = \frac{\pi \cdot \sigma_i^{[2]} \cdot V_\Pi}{\sqrt{3}h_3} \int_0^{R_1} \rho^2 d\rho = \\
&= \frac{\pi \cdot \sigma_i^{[2]} \cdot V_\Pi \cdot R_1^3}{3\sqrt{3}h_2}.
\end{aligned} \tag{2.24}$$

Зона 3. Радиальное выдавливание.

Высота 2-й зоны определяется по формуле:

$$h_3 = h_1 + tg\varphi \cdot (R_2 - R_3).$$

R_3 определяется с помощью закона сохранения объема заготовки по формуле:

$$2tg\varphi \cdot R_3^3 - 3(h_1 + tg\varphi \cdot R_2) \cdot R_3^2 + 3R_0^2 \cdot h_0 - 3R_1^2(z_1 - h_2) + tg\varphi \cdot R_1^3 = 0 \tag{2.25}$$

После решения кубического уравнения (2.25) относительно переменной R_3 был получен результат:

$$R_3 = \frac{2\sqrt{\Delta} \cdot \cos\left(\frac{\arccos(k)}{3} - \frac{2\pi}{3}\right) - b}{3a}, \tag{2.26}$$

где

$$\begin{aligned}
\Delta &= b^2; \\
k &= \frac{-2b^3 - 27a^2d}{2\sqrt{|\Delta|^3}}; \\
a &= 2tg\varphi; \\
b &= -3(h_1 + tg\varphi \cdot R_2); \\
d &= 3R_0^2 \cdot h_0 - 3R_1^2(z_1 - h_2) + tg\varphi \cdot R_1^3.
\end{aligned}$$

Скоростное поле имеет следующий вид:

$$V_z^{[3]} = -\frac{V_{II} \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot R_1^2 \cdot z}{2\rho(h_x - \operatorname{tg} \varphi \cdot \rho)^2};$$

$$V_\rho^{[3]} = \frac{V_{II} \cdot R_1^2}{2\rho(h_x - \operatorname{tg} \varphi \cdot \rho)}.$$
(2.27)

где

$$h_x = h_3 + \operatorname{tg} \varphi \cdot R_3;$$

$$R_3 \geq \rho \geq R_1$$

Составляющие тензора скоростей деформаций:

$$\dot{\varepsilon}_z = -\frac{V_{II} \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot R_1^2}{2\rho(h_x - \operatorname{tg} \varphi \cdot \rho)^2};$$

$$\dot{\varepsilon}_\rho = -\frac{V_{II} \cdot R_1^2 (h_x - 2\operatorname{tg} \varphi \cdot \rho)}{2\rho^2 (h_x - \operatorname{tg} \varphi \cdot \rho)^2};$$

$$\dot{\varepsilon}_\theta = \frac{V_{II} \cdot R_1^2}{2\rho^2 (h_x - \operatorname{tg} \varphi \cdot \rho)}.$$

Интенсивность скоростей деформации определяется по формуле:

$$\dot{\varepsilon}_i^{[3]} = \frac{V_{II} \cdot R_1^2}{2\sqrt{3}} \cdot \frac{\sqrt{4(h_x^2 - 3h_x \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot \rho + 3\operatorname{tg}^2 \varphi \cdot \rho^2)(h_x - \operatorname{tg} \varphi \cdot \rho)^2 + (h_x - 3\operatorname{tg} \varphi \cdot \rho)^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \varphi \cdot z^2}}{\rho^2 (h_x - \operatorname{tg} \varphi \cdot \rho)^3}$$
(2.28)

Накопленная деформация в точке $z = z_i$, $\rho = \rho_i$ во 3-й зоне:

$$\varepsilon_n^{[3]} = \int_0^i \dot{\varepsilon}_i^{[3]} dt = \int_{R_1}^{\rho_i} \frac{\dot{\varepsilon}_i^{[3]}}{V_\rho^{[3]}} \cdot d\rho$$
(2.29)

Легко заметить, что согласно формуле 2.29 значение накопленной деформации в различных точках зоны зависит от координат z_i и ρ_i , и, следовательно, различается. Поэтому для упрощения расчётов используется среднее значение накопленной деформации, которое определяется численным методом на ЭВМ по следующему виду:

$$\varepsilon_{нсп}^{[3]} = \frac{1}{T_3} \int_{T_3} \varepsilon_n^{[3]} dT_3 = \frac{1}{T_3} \int_0^{2\pi} \int_{R_1}^{R_3} \int_0^{h_3^*} \varepsilon_n^{[3]} \rho dz d\rho d\theta,$$
(2.30)

где T_3 – объем 3-й зоны;

$$h_3^* = h_3 + \operatorname{tg} \varphi (R_3 - \rho).$$

Истинное напряжение течения определяется по формуле:

$$\sigma_i^{[3]} = \sigma_0 + A \cdot (\varepsilon_{нсп}^{[3]})^n.$$

Мощность пластической деформации определяется численным методом на ЭВМ по следующему виду:

$$W_{\sigma}^{[3]} = \int_0^{2\pi} \int_{R_1}^{R_3} \int_0^{h_3^*} \sigma_i^{[3]} \cdot \dot{\varepsilon}_i^{[3]} \cdot \rho \cdot dz d\rho d\theta = 2\pi \cdot \sigma_i^{[3]} \int_{R_1}^{R_3} \int_0^{h_3^*} \dot{\varepsilon}_i^{[3]} \rho dz d\rho, \quad (2.31)$$

Мощность сил трения:

$$\begin{aligned} W_{mp}^{[3]} &= \int_0^{2\pi} \int_{R_1}^{R_3} \sigma_i^{[3]} \cdot \mu \cdot |V_{\rho}^{[3]}| \cdot \rho d\rho d\theta = \pi \cdot \sigma_i^{[3]} \cdot \mu \cdot V_{\Pi} \cdot R_1^2 \int_{R_1}^{R_3} \frac{1}{h_x - tg\varphi \cdot \rho} d\rho = \\ &= \pi \cdot \mu \cdot \sigma_i^{[3]} \cdot \frac{V_{\Pi} \cdot R_1^2}{tg\varphi} \cdot \ln \frac{h_2}{h_3}. \end{aligned} \quad (2.32)$$

Мощность сил среза на границе с зоной 2 (при $\rho = R_1$):

$$\begin{aligned} W_{cp}^{[3-2]} &= \int_0^{2\pi} \int_0^{h_2} \tau_{cp} |V_z^{[3]} - V_z^{[2]}| \cdot R_1 dz d\theta = 2\pi \cdot \frac{\sigma_i^{[3]} \cdot V_{\Pi} \cdot h_2}{\sqrt{3}} \int_0^{h_2} \left| \frac{z}{h_2} - \frac{tg\varphi \cdot R_1 \cdot z}{2h_2^2} \right| dz = \\ &= \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \cdot \sigma_i^{[3]} \cdot V_{\Pi} \cdot |2h_2 - tg\varphi \cdot R_1|. \end{aligned} \quad (2.33)$$

На завершающем шаге определяется полная мощность всех зон при комбинированном выдавливании, включающая мощность пластической деформации, мощность сил трения и мощность сил среза. Сила деформирования определяется из уравнения баланса мощностей (2.1):

$$P = p \cdot S = \frac{\sum W_{\sigma} + \sum W_{cp} + \sum W_{mp}}{V_{\Pi}}$$

Моделирование силового режима второго этапа. На втором этапе процесса комбинированного выдавливания (рисунок 2.4) сечение заготовки условно разделено на несколько характерных зон течения материала. В зонах 1–4 реализуется радиальное выдавливание, при котором металл перемещается от оси заготовки к периферии через коническую щель с изменяющейся конусностью, что обеспечивает формирование фланца. В зонах 5, 6 и 8 наблюдается обратное выдавливание: поток металла направлен в сторону, противоположную движению пуансона, способствуя образованию стенок детали. Зона 7 представляет собой застойную область, где скорость движения частиц металла близка к нулю.

Разделяющая поверхность между потоками в радиальном и обратном направлениях располагается на горизонтальной плоскости с координатой h^* между

скачкообразно. Продолжительность процесса деформации определяется из условия равенства расхода материала.

При анализе областей, связанных с обратным выдавливанием, зоны радиального течения считаются жёсткими; в противоположном случае – при изучении радиального выдавливания – жёсткими принимаются области обратного течения (рисунок 2.5).

Зона 1. Зона осадки заготовки.

Скоростное поле имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} V_z^{[1]} &= -\frac{V_{II}}{z_1} \cdot z \\ V_\rho^{[1]} &= \frac{V_{II}}{2z_1} \cdot \rho \end{aligned} ; \quad (2.34)$$

Составляющие тензора скоростей деформаций:

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_z &= -\frac{V_{II}}{z_1}; \\ \dot{\varepsilon}_\rho &= \frac{V_{II}}{2z_1}; \\ \dot{\varepsilon}_\theta &= \frac{V_{II}}{2z_1}; \\ \gamma_{\rho z} &= 0. \end{aligned} \quad (2.35)$$

Высота зоны 1 определяется положением границы раздела течения h^* , причем

$$h^* = h_1 + tg\alpha(R_2 - R_1) \quad (2.36)$$

Интенсивность скорости деформации в цилиндрических координатах определяется по формуле:

$$\dot{\varepsilon}_i^{[1]} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\dot{\varepsilon}_\rho - \dot{\varepsilon}_\theta)^2 + (\dot{\varepsilon}_\theta - \dot{\varepsilon}_z)^2 + (\dot{\varepsilon}_z - \dot{\varepsilon}_\rho)^2 + \frac{3}{2}\gamma_{\rho z}^2} = \frac{V_{II}}{z_1} \quad (2.37)$$

Накопленная деформация в зоне осадки определяем таким образом [36]:

$$\varepsilon_n^{[1]} = \ln \frac{h_0}{z_1} ., \quad (2.38)$$

Интенсивности напряжений определяется по формуле:

$$\sigma_i^{[1]} = \sigma_0 + A \cdot (\varepsilon_H^{[1]})^n.$$

Мощность пластической деформации в зон 1:

$$\begin{aligned} W_\rho^{[1]} &= \int_0^{2\pi} \int_0^{r_1} \int_0^{h^*} \sigma_i^{[1]} \cdot \dot{\varepsilon}_i^{[1]} \cdot \rho \cdot dz d\rho d\theta = 2\pi \cdot \sigma_i^{[1]} \cdot \frac{V_{II}}{z_1} \int_0^{r_1} \int_0^{h^*} \rho \cdot dz d\rho = \\ &= \frac{\pi \cdot \sigma_i^{[1]} \cdot h^* \cdot r_1^2 \cdot V_{II}}{z_1}. \end{aligned} \quad (2.39)$$

Мощность сил трения в зоне 1 находим по формуле:

$$\begin{aligned} W_{mp}^{[1]} &= \int_0^{2\pi} \int_0^{r_1} \sigma_i^{[1]} \cdot \mu \cdot |V_\rho| \cdot \rho d\rho d\theta = 2\pi \cdot \sigma_i^{[1]} \cdot \mu \cdot \frac{V_{II}}{2z_1} \int_0^{r_1} \rho^2 d\rho = \\ &= \pi \cdot \sigma_i^{[1]} \cdot \mu \cdot \frac{V_{II} \cdot r_1^3}{3z_1}. \end{aligned} \quad (2.40)$$

Зона 2. Радиальное выдавливание.

Скоростное поле имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} V_z^{[2]} &= 0; \\ V_\rho^{[2]} &= \frac{V_{II} \cdot r_1^2}{2z_1 \cdot \rho}; \\ R_1 &\geq \rho \geq r_1 \end{aligned} \quad (2.41)$$

Составляющие тензора скоростей деформаций:

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_z &= 0; \\ \dot{\varepsilon}_\rho &= -\frac{V_{II} \cdot r_1^2}{2z_1 \cdot \rho^2}; \\ \dot{\varepsilon}_\theta &= \frac{V_{II} \cdot r_1^2}{2z_1 \cdot \rho^2}; \\ \gamma_{\rho z} &= 0. \end{aligned} \quad (2.42)$$

Интенсивность скоростей деформации определяется по формуле (2.4):

$$\dot{\varepsilon}_i^{[2]} = \frac{V_{II} \cdot r_1^2}{\sqrt{3} \cdot z_1 \cdot \rho^2}. \quad (2.43)$$

Накопленную деформацию в точке $z = z_1$, $\rho = \rho_t$ во 2-й зоне на втором этапе определяем по формуле (2.6):

$$\varepsilon_i^{[2]} = \int_0^t \dot{\varepsilon}_i^{[2]} dt = \int_{r_1}^{\rho_t} \frac{\dot{\varepsilon}_i^{[2]}}{V_\rho^{[2]}} d\rho = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{\rho_t}{r_1}; \quad (2.44)$$

Для упрощения расчётов используется среднее значение накопленной деформации:

$$\varepsilon_{icp}^{[4]} = \frac{1}{T_2} \int_{T_2} \varepsilon_i^{[2]} dT_2 = \frac{1}{T_2} \int_0^{2\pi} \int_0^{h^*} \int_{r_1}^{R_1} \dot{\varepsilon}_i^{[2]} \rho d\rho dz d\theta = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{R_1^2}{R_1^2 - r_1^2} \ln \frac{R_1}{r_1} - \frac{1}{2} \right),$$

где T_2 – объем 2-й зоны.

Истинное напряжение течения определяется по формуле:

$$\sigma_i^{[2]} = \sigma_0 + A \cdot (\varepsilon_n^{[2]})^n;$$

$$\varepsilon_n^{[2]} = \varepsilon_0^{[2]} + \varepsilon^{[1-2]} + \varepsilon_{icp}^{[2]};$$

где $\varepsilon_0^{[2]}$ – накопленная деформация в 2-й зоне до второго этапа;

$\varepsilon^{[1-2]}$ – накопленная деформация части T_{12} , переходящей из 1-й зоны во 2-ю,

$$\varepsilon^{[1-2]} = \frac{1}{T_2} \int_{T_{12}} \varepsilon_n^{[1]} dT_{12}.$$

Мощность пластической деформации в зоне 2 рассчитываем по формуле (2.3):

$$\begin{aligned} W_\delta^{[2]} &= \int_0^{2\pi} \int_{r_1}^{R_1} \int_0^{h^*} \sigma_i^{[2]} \cdot \dot{\varepsilon}_i^{[2]} \cdot \rho \cdot dz d\rho d\theta = 2\pi \cdot \sigma_i^{[2]} \cdot \frac{V_{II} \cdot r_1^2}{\sqrt{3} \cdot z_1} \int_{r_1}^{R_1} \int_0^{h^*} \frac{1}{\rho} dz d\rho = \\ &= \frac{2}{\sqrt{3}} \pi \cdot \sigma_i^{[2]} \cdot \frac{V_{II} \cdot r_1^2 \cdot h^*}{z_1} \cdot \ln \frac{R_1}{r_1}. \end{aligned} \quad (2.46)$$

Мощность сил трения во зоне 2 определяем аналогично зоне 1 по формуле (2.9):

$$\begin{aligned} W_{mp}^{[2]} &= \int_0^{2\pi} \int_{r_1}^{R_1} \sigma_i^{[2]} \cdot \mu \cdot |V_\rho^{[2]}| \cdot \rho d\rho d\theta = 2\pi \cdot \sigma_i^{[2]} \cdot \mu \cdot \frac{V_{II} \cdot r_1^2}{2z_1} \int_{r_1}^{R_1} d\rho = \\ &= \pi \cdot \mu \cdot \sigma_i^{[2]} \cdot \frac{V_{II} \cdot r_1^2 \cdot (R_1 - r_1)}{z_1}. \end{aligned} \quad (2.47)$$

Мощность сил среза на границе с зоной 1 (при $\rho = r_1$) определяется по формуле (2.8):

$$W_{cp}^{[2-1]} = \int_0^{2\pi} \int_0^{h^*} \tau_{cp} |V_z^{[2]} - V_z^{[1]}| \cdot r_1 dz d\theta = 2\pi \cdot \frac{\sigma_i^{[2]} \cdot V_{II} \cdot r_1}{\sqrt{3} \cdot z_1} \int_0^{h^*} z dz =$$

$$= \frac{1}{\sqrt{3}} \pi \cdot \sigma_i^{[2]} \cdot \frac{V_{II} \cdot r_1 \cdot h^{*2}}{z_1}. \quad (2.48)$$

Зона 3. Радиальное выдавливание в коническую щель.

Скоростное поле имеет следующий вид:

$$V_z^{[3]} = -\frac{V_{II} \cdot h^* \cdot r_1^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha}{2z_1 \cdot \rho \cdot (r_0 - \operatorname{tg} \alpha \cdot \rho)^2} \cdot z; \quad (2.49)$$

$$V_\rho^{[3]} = \frac{V_{II} \cdot r_1^2}{2z_1 \cdot \rho (r_0 - \operatorname{tg} \alpha \cdot \rho)},$$

где $r_0 = h_1 + \operatorname{tg} \alpha \cdot R_2$.

Высота границы раздела течения изменяется:

$$h^* = h_1 + (R_2 - R_1) \operatorname{tg} \alpha.$$

Составляющие тензора скоростей деформаций:

$$\dot{\varepsilon}_z = -\frac{V_{II} \cdot h^* \cdot r_1^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha}{2z_1 \cdot \rho \cdot (r_0 - \operatorname{tg} \alpha \cdot \rho)^2};$$

$$\dot{\varepsilon}_\rho = -\frac{V_{II} \cdot h^* \cdot r_1^2 \cdot (r_0 - 2\operatorname{tg} \alpha \cdot \rho)}{2z_1 \cdot \rho^2 \cdot (r_0 - \operatorname{tg} \alpha \cdot \rho)^2}; \quad (2.50)$$

$$\dot{\varepsilon}_\theta = \frac{V_{II} \cdot h^* \cdot r_1^2}{2z_1 \cdot \rho^2 \cdot (r_0 - \operatorname{tg} \alpha \cdot \rho)};$$

$$\dot{\gamma}_{\rho z} = \frac{V_{II} \cdot h^* \cdot r_1^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot z}{2z_1} \cdot \left(\frac{r_0^2 - 4r_0 \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \rho + 3\operatorname{tg}^2 \alpha \cdot \rho^2}{\rho^2 \cdot (r_0 - \operatorname{tg} \alpha \cdot \rho)^4} \right).$$

Интенсивность скоростей деформации определяется по формуле (2.4):

$$\dot{\varepsilon}_i^{[3]} = \frac{V_{II} \cdot h^* \cdot r_1^2}{2\sqrt{3}} \cdot \frac{\sqrt{4(r_0^2 - 3r_0 \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \rho + 3\operatorname{tg}^2 \alpha \cdot \rho^2)(r_0 - \operatorname{tg} \alpha \cdot \rho)^2 + (r_0 - 3\operatorname{tg} \alpha \cdot \rho)^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha \cdot z^2}}{z_1 \cdot \rho^2 (r_0 - \operatorname{tg} \alpha \cdot \rho)^3}. \quad (2.51)$$

Накопленная деформация в точке $z = z_i$, $\rho = \rho_i$ во зоне 3 на втором этапе определяем по формуле (2.6):

$$\varepsilon_i^{[3]} = \int_0^t \dot{\varepsilon}_i^{[3]} dt = \int_{R_1}^{\rho_i} \frac{\dot{\varepsilon}_i^{[3]}}{V_\rho^{[3]}} \cdot d\rho. \quad (2.52)$$

Для упрощения расчётов используется среднее значение накопленной деформации:

$$\varepsilon_{icp}^{[3]} = \frac{1}{T_3} \int_{T_3} \varepsilon_i^{[3]} dT_3 = \frac{1}{T_3} \int_0^{2\pi} \int_{R_1}^{R_2} \int_0^{h_p} \varepsilon_i^{[3]} \rho dz d\rho d\theta,$$

где T_3 – объем 3-й зоны;

$$h_\rho = h_1 + \operatorname{tg} \alpha \cdot (R_2 - \rho).$$

Истинное напряжение течения определяется по формуле:

$$\begin{aligned}\sigma_i^{[3]} &= \sigma_0 + A \cdot (\varepsilon_n^{[3]})^n; \\ \varepsilon_n^{[3]} &= \varepsilon_0^{[3]} + \varepsilon^{[2-3]} + \varepsilon_{icp}^{[3]};\end{aligned}\quad (2.53)$$

где $\varepsilon_0^{[3]}$ – накопленная деформация в 3-й зоне до второго этапа;

$\varepsilon^{[2-3]}$ – накопленная деформация части T_{23} , переходящей из 2-й зоны во 3-ю,

$$\varepsilon^{[2-3]} = \frac{1}{T_3} \int_{T_{23}} \varepsilon_n^{[2]} dT_{23}.$$

Мощность пластической деформации в 3-ей зоне определяется численным методом на ЭВМ по следующему виду:

$$W_\rho^{[3]} = \int_0^{2\pi} \int_{R_1}^{R_2} \int_0^{h_\rho} \sigma_i^{[3]} \cdot \dot{\varepsilon}_i^{[3]} \cdot \rho \cdot dz d\rho d\theta = 2\pi \cdot \sigma_i^{[3]} \int_{R_1}^{R_2} \int_0^{h_\rho} \dot{\varepsilon}_i^{[3]} \cdot \rho dz d\rho, \quad (2.54)$$

Мощность сил трения в 3-ей зоне:

$$\begin{aligned}W_{mp}^{[3]} &= \int_0^{2\pi} \int_{R_1}^{R_2} \sigma_i^{[3]} \cdot \mu \cdot |V_\rho^{[3]}| \cdot \rho d\rho d\theta = 2\pi \cdot \sigma_i^{[3]} \cdot \mu \int_{R_1}^{R_2} \frac{V_\Pi \cdot h^* \cdot r_1^2}{2z_1 \cdot (r_0 - \operatorname{tg} \alpha \cdot \rho)} d\rho = \\ &= \frac{\pi \cdot \sigma_i^{[3]} \cdot \mu \cdot V_\Pi \cdot h^* \cdot r_1^2}{z_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha} \cdot \ln \frac{h^*}{h_1}.\end{aligned}\quad (2.55)$$

Мощность сил среза на границе с зоной 2:

$$\begin{aligned}W_{cp}^{[3-2]} &= \int_0^{2\pi} \int_0^{h^*} \tau_{cp} |V_z^{[3]} - V_z^{[2]}| \cdot R_1 dz d\theta = \frac{2\pi}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_i^{[3]} \int_0^{h^*} \frac{V_\Pi \cdot h^* \cdot r_1^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha}{2z_1 \cdot h^{*2}} \cdot z dz = \\ &= \frac{\pi \cdot \sigma_i^{[3]} \cdot V_\Pi \cdot r_1^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot h^*}{2\sqrt{3} \cdot z_1}.\end{aligned}\quad (2.56)$$

Зона 4. Радиальное выдавливание.

Скоростное поле:

$$\begin{aligned}V_z^{[4]} &= 0; \\ V_\rho^{[4]} &= \frac{V_\Pi \cdot h^* \cdot r_1^2}{2z_1 \cdot h_1 \cdot \rho}.\end{aligned}\quad (2.57)$$

Компоненты скоростей деформации определяются таким образом:

$$\begin{aligned}
\dot{\varepsilon}_z &= 0; \\
\dot{\varepsilon}_\rho &= -\frac{V_{II} \cdot h^* \cdot r_1^2}{2z_1 \cdot h_1 \cdot \rho^2}; \\
\dot{\varepsilon}_\theta &= \frac{V_{II} \cdot h^* \cdot r_1^2}{2z_1 \cdot h_1 \cdot \rho^2}; \\
\dot{\gamma}_{\rho z} &= 0.
\end{aligned} \tag{2.58}$$

Определяем интенсивность скорости деформации в 4-й зоне:

$$\dot{\varepsilon}_i^{[4]} = \frac{V_{II} \cdot h^* \cdot r_1^2}{\sqrt{3} \cdot z_1 \cdot h_1 \cdot \rho^2}. \tag{2.59}$$

Накопленная деформация в точке $z = z_t$, $\rho = \rho_t$ во 4-й зоне на втором этапе определяем по формуле:

$$\varepsilon_i^{[4]} = \int_0^t \dot{\varepsilon}_i^{[4]} dt = \int_{R_1}^{\rho_t} \frac{\dot{\varepsilon}_i^{[4]}}{V_\rho^{[4]}} \cdot d\rho = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{\rho_t}{R_2}.$$

Для упрощения расчетов используется среднее значение накопленной деформации:

$$\varepsilon_{icp}^{[4]} = \frac{1}{T_4} \int_{T_4} \varepsilon_i^{[4]} dT_4 = \frac{1}{T_4} \int_0^{2\pi} \int_0^{h_1} \int_0^{R_4} \dot{\varepsilon}_i^{[4]} \rho d\rho dz d\theta = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{R_4^2}{R_4^2 - R_2^2} \ln \frac{R_4}{R_2} - \frac{1}{2} \right),$$

где T_4 – объем 4-й зоны.

Истинное напряжение определяется по формуле:

$$\sigma_i^{[4]} = \sigma_0 + A \cdot (\varepsilon_n^{[4]})^n;$$

$$\varepsilon_n^{[4]} = \varepsilon^{[3-4]} + \varepsilon_{icp}^{[4]};$$

где $\varepsilon^{[3-4]}$ – накопленная деформация части, переходящей из 3-й зоны во 4-ю,

$$\varepsilon^{[3-4]} = \frac{1}{T_4} \int_{T_4} \varepsilon_n^{[3]} dT_4.$$

Мощность пластической деформации:

$$\begin{aligned}
W_\partial^{[4]} &= \int_0^{2\pi} \int_0^{R_4} \int_0^{h_1} \sigma_i^{[4]} \cdot \dot{\varepsilon}_i^{[4]} \cdot \rho \cdot dz d\rho d\theta = 2\pi \cdot \sigma_i^{[4]} \cdot \int_{R_2}^{R_4} \int_0^{h_1} \frac{V_{II} \cdot h^* \cdot r_1^2}{\sqrt{3} \cdot z_1 \cdot h_1 \cdot \rho} dz d\rho = \\
&= \frac{2\pi \cdot \sigma_i^{[4]} \cdot V_{II} \cdot h^* \cdot r_1^2}{\sqrt{3} \cdot z_1} \cdot \ln \frac{R_4}{R_2}.
\end{aligned} \tag{2.61}$$

Мощность сил трения в 4-ой зоне:

$$\begin{aligned}
W_{mp}^{[4]} &= \int_0^{2\pi} \int_{R_2}^{R_4} \sigma_i^{[4]} \cdot \mu \cdot |V_\rho^{[4]}| \cdot \rho d\rho d\theta = 2\pi \cdot \mu \cdot \sigma_i^{[4]} \int_{R_2}^{R_4} \frac{V_\Pi \cdot h^* \cdot r_1^2}{2z_1 \cdot h_1} d\rho = \\
&= \frac{\pi \cdot \sigma_i^{[4]} \cdot \mu \cdot V_\Pi \cdot h^* \cdot r_1^2 \cdot (R_4 - R_2)}{z_1 \cdot h_1}.
\end{aligned} \tag{2.62}$$

Мощность сил среза на границе с зоной 3 (при $\rho = R_2$):

$$\begin{aligned}
W_{cp}^{[4-3]} &= \int_0^{2\pi} \int_0^{h_1} \tau_{cp} |V_z^{[4]} - V_z^{[3]}| \cdot R_2 dz d\theta = \frac{2\pi}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_i^{[4]} \int_0^{h_1} \frac{V_\Pi \cdot h^* \cdot r_1^2 \cdot \text{tg} \alpha}{2z_1 \cdot h_1^2} \cdot z dz = \\
&= \frac{\pi \cdot \sigma_i^{[4]} \cdot V_\Pi \cdot h^* \cdot r_1^2 \cdot \text{tg} \alpha}{2\sqrt{3} \cdot z_1}.
\end{aligned} \tag{2.63}$$

Зона 5.

Скоростное поле записано аналогично тому, как это сделано для зоны 1:

$$\begin{aligned}
V_z^{[5]} &= -\frac{V_\Pi \cdot (z - h^*)}{z_1}; \\
V_\rho^{[5]} &= \frac{V_\Pi}{2z_1} \cdot \rho.
\end{aligned} \tag{2.64}$$

Компоненты тензора скоростей деформации:

$$\begin{aligned}
\dot{\varepsilon}_z &= -\frac{V_\Pi}{z_1}; \\
\dot{\varepsilon}_\rho &= -\frac{V_\Pi}{2z_1}; \\
\dot{\varepsilon}_\theta &= \frac{V_\Pi}{2z_1}; \\
\gamma_{\rho z} &= 0.
\end{aligned} \tag{2.65}$$

Интенсивность скоростей деформации в зоне 5:

$$\dot{\varepsilon}_i^{[5]} = \frac{V_\Pi}{z_1}. \tag{2.66}$$

Накопленная деформация зоны осадки определяем по формуле [36]:

$$\varepsilon_n^{[5]} = \ln \frac{h_0}{z_1}. \tag{2.67}$$

Истинное напряжение течения с учетом накопленной деформации определяется по формуле:

$$\sigma_i^{[5]} = \sigma_0 + A \cdot (\varepsilon_n^{[5]})^n.$$

Мощность пластической деформации в 5-й зоне:

$$\begin{aligned}
W_{\theta}^{[5]} &= \int_0^{2\pi} \int_0^{r_1} \int_{h^*}^{z_1} \sigma_i^{[5]} \cdot \dot{\varepsilon}_i^{[5]} \cdot \rho \cdot dz d\rho d\theta = 2\pi \cdot \sigma_i^{[5]} \cdot \int_{h^*}^{z_1} \int_0^{r_1} \frac{V_{II}}{z_1} \cdot \rho d\rho dz = \\
&= \frac{\pi \cdot \sigma_i^{[5]} \cdot V_{II} \cdot r_1^2 \cdot (z_1 - h^*)}{z_1}.
\end{aligned} \tag{2.68}$$

Зона б.

Скоростное поле имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
V_z^{[6]} &= \frac{V_{II} \cdot r_1^2}{R_1^2 - r_1^2} \cdot \frac{z - h^*}{z_1}; \\
V_{\rho}^{[6]} &= \frac{V_{II} \cdot r_1^2 \cdot (R_1^2 - \rho^2)}{2z_1 \cdot (R_1^2 - r_1^2) \cdot \rho}.
\end{aligned} \tag{2.69}$$

Компоненты скоростей деформации определяются таким образом:

$$\begin{aligned}
\dot{\varepsilon}_z &= \frac{V_{II} \cdot r_1^2}{z_1 \cdot (R_1^2 - r_1^2)}; \\
\dot{\varepsilon}_{\rho} &= -\frac{V_{II} \cdot r_1^2 \cdot (R_1^2 + \rho^2)}{2z_1 \cdot (R_1^2 - r_1^2) \cdot \rho^2}; \\
\dot{\varepsilon}_{\theta} &= \frac{V_{II} \cdot r_1^2 \cdot (R_1^2 - \rho^2)}{2z_1 \cdot (R_1^2 - r_1^2) \cdot \rho^2}; \\
\dot{\gamma}_{\rho z} &= 0.
\end{aligned} \tag{2.70}$$

Интенсивность скорости деформации в зоне б определяется по (2.4):

$$\dot{\varepsilon}_i^{[6]} = \frac{V_{II} \cdot r_1^2}{\sqrt{3} \cdot z_1 \cdot (R_1^2 - r_1^2) \cdot \rho^2} \sqrt{3\rho^4 + R_1^4}. \tag{2.71}$$

Накопленная деформация в точке $z = z_i$, $\rho = \rho_i$ во б-й зоне на втором этапе определяем численным методом на ЭВМ по формуле:

$$\varepsilon_i^{[6]} = \int_0^t \dot{\varepsilon}_i^{[6]} dt = \int_{r_1}^{\rho_i} \frac{\dot{\varepsilon}_i^{[6]}}{V_{\rho}^{[6]}} \cdot d\rho = \int_{r_1}^{\rho_i} \frac{2\sqrt{3\rho^4 + R_1^4}}{\sqrt{3}\rho(R_1^2 - \rho^2)} d\rho; \tag{2.72}$$

Для упрощения расчётов используется среднее значение накопленной деформации:

$$\varepsilon_{icp}^{[6]} = \frac{1}{T_6} \int_{T_6} \varepsilon_i^{[6]} dT_6 = \frac{1}{T_6} \int_0^{2\pi} \int_{r_1}^{R_1} \int_{h^*}^{z_1} \varepsilon_i^{[6]} \rho dz d\rho d\theta,$$

где T_6 – объем б-й зоны.

Истинное напряжение течения с учетом накопленной деформации определяется по формуле:

$$\begin{aligned}\sigma_i^{[6]} &= \sigma_0 + A \cdot (\varepsilon_n^{[6]})^n; \\ \varepsilon_n^{[6]} &= \varepsilon_0^{[6]} + \varepsilon^{[5-6]} + \varepsilon_{icp}^{[6]};\end{aligned}$$

где $\varepsilon_0^{[6]}$ – накопленная деформация в 6-й зоне до второго этапа.

$\varepsilon^{[5-6]}$ – накопленная деформация части T_{56} , переходящей из 5-й зоны в 6-ю,

$$\varepsilon^{[5-6]} = \frac{1}{T_6} \int_{T_{56}} \varepsilon_n^{[5]} dT_{56}.$$

Мощность пластической деформации в зоне 6 определяется с помощью ЭВМ по следующему виду:

$$\begin{aligned}W_0^{[6]} &= \int_0^{2\pi} \int_{r_1}^{R_1} \int_{h^*}^{z_1} \sigma_i^{[6]} \cdot \dot{\varepsilon}_i^{[6]} \cdot \rho \cdot dz d\rho d\theta = 2\pi \cdot \sigma_i^{[6]} \cdot \int_{h^*}^{z_1} \int_{r_1}^{R_1} \frac{V_{II} \cdot r_1^2 \sqrt{3\rho^4 + R_1^4}}{\sqrt{3} \cdot z_1 \cdot (R_1^2 - r_1^2) \cdot \rho} d\rho dz = \\ &= \frac{2\pi \cdot \sigma_i^{[6]} \cdot V_{II} \cdot r_1^2 \cdot (z_1 - h^*)}{\sqrt{3} \cdot z_1 \cdot (R_1^2 - r_1^2)} \cdot \int_{r_1}^{R_1} \frac{\sqrt{3\rho^4 + R_1^4}}{\rho} d\rho.\end{aligned}\quad (2.73)$$

Мощность сил среза на границе с зоной 5 (при $\rho = r_1$) определяется по формуле:

$$\begin{aligned}W_{cp}^{[6-5]} &= \int_0^{2\pi} \int_{h^*}^{z_1} \tau_{cp} |V_z^{[6]} - V_z^{[5]}| \cdot r_1 \cdot dz d\theta = \frac{2\pi}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_i^{[6]} \int_{h^*}^{z_1} \left(\frac{V_{II} \cdot (z - h^*)}{z_1} + \frac{V_{II} \cdot r_1^2}{R_1^2 - r_1^2} \cdot \frac{z - h^*}{z_1} \right) \cdot r_1 dz = \\ &= \frac{\pi \cdot \sigma_i^{[6]} \cdot V_{II} \cdot R_1^2 \cdot r_1 \cdot (z_1 - h^*)^2}{\sqrt{3} \cdot z_1 \cdot (R_1^2 - r_1^2)}.\end{aligned}\quad (2.74)$$

В зоне 6 трение об инструмент отсутствует.

Зона 8. Обратное выдавливание.

Скоростное поле имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}V_z^{[8]} &= \frac{V_{II} \cdot (z_1 - h^*) \cdot r_1^2}{z_1 \cdot (R_1^2 - r_1^2)}; \\ V_\rho^{[8]} &= 0.\end{aligned}\quad (2.75)$$

Накопленная деформация в 8 зоне:

$$\varepsilon_n^{[8]} = \varepsilon^{[6-8]};\quad (2.76)$$

где $\varepsilon^{[6-8]}$ – накопленная деформация части, переходящей из 6-й зоны во 8-ю,

$$\varepsilon^{[6-8]} = \frac{1}{T_8} \int_{T_8} \varepsilon_n^{[6]} dT_8.$$

Истинное напряжение течения с учетом накопленной деформации определяется по формуле:

$$\sigma_i^{[8]} = \sigma_0 + A \cdot (\varepsilon_n^{[8]})^n.$$

Мощность сил трения определяется как сумма вклада от контакта металла с поверхностью пуансона и матрицы:

$$W_{mp}^{[8]} = W_{mp.n}^{[8]} + W_{mp.m}^{[8]},$$

$$\begin{aligned} W_{mp.n}^{[8]} &= \int_0^{2\pi} \int_{z_1}^{z_2} \mu \sigma_i^{[8]} |V_z^{[8]} + V_{II}| \cdot r_1 dz d\theta = 2\pi \cdot \mu \cdot \sigma_i^{[8]} \cdot r_1 \int_{z_1}^{z_2} \left(\frac{V_{II} \cdot (z_1 - h^*) \cdot r_1^2}{z_1 \cdot (R_1^2 - r_1^2)} + V_{II} \right) dz = \\ &= 2\pi \cdot \mu \cdot \sigma_i^{[8]} \cdot r_1 \cdot V_{II} \cdot (z_2 - z_1) \left(\frac{(z_1 - h^*) \cdot r_1^2}{z_1 \cdot (R_1^2 - r_1^2)} + 1 \right). \end{aligned} \quad (2.77)$$

$$\begin{aligned} W_{mp.m}^{[8]} &= \int_0^{2\pi} \int_{z_1}^{z_2} \mu \sigma_i^{[8]} |V_z^{[8]}| \cdot R dz d\theta = 2\pi \cdot \mu \cdot \sigma_i^{[8]} \cdot R_1 \int_{z_1}^{z_2} \frac{V_{II} \cdot (z_1 - h^*) \cdot r_1^2}{z_1 \cdot (R_1^2 - r_1^2)} dz = \\ &= 2\pi \cdot \mu \cdot \sigma_i^{[8]} \cdot R_1 \cdot V_{II} \cdot (z_2 - z_1) \cdot \frac{(z_1 - h^*) \cdot r_1^2}{z_1 \cdot (R_1^2 - r_1^2)}. \end{aligned} \quad (2.78)$$

На завершающем шаге второго этапа определяется полная мощность всех зон при комбинированном выдавливании, включающая мощность пластической деформации, мощность сил трения и мощность сил среза. Сила деформирования определяется из уравнения баланса мощностей (2.1):

$$P = p \cdot S = \frac{\sum W_\delta + \sum W_{cp} + \sum W_{mp}}{V_{II}}$$

2.4 Вычисление математической модели с помощью приложения на языке С#

Для реализации разработанной математической модели было создано программное приложение на языке С#. Логика программы основана на алгоритме вычислений, заложенном в модель (рисунок 2.6). После задания исходных параметров система автоматически выполняет пошаговые расчёты и формирует

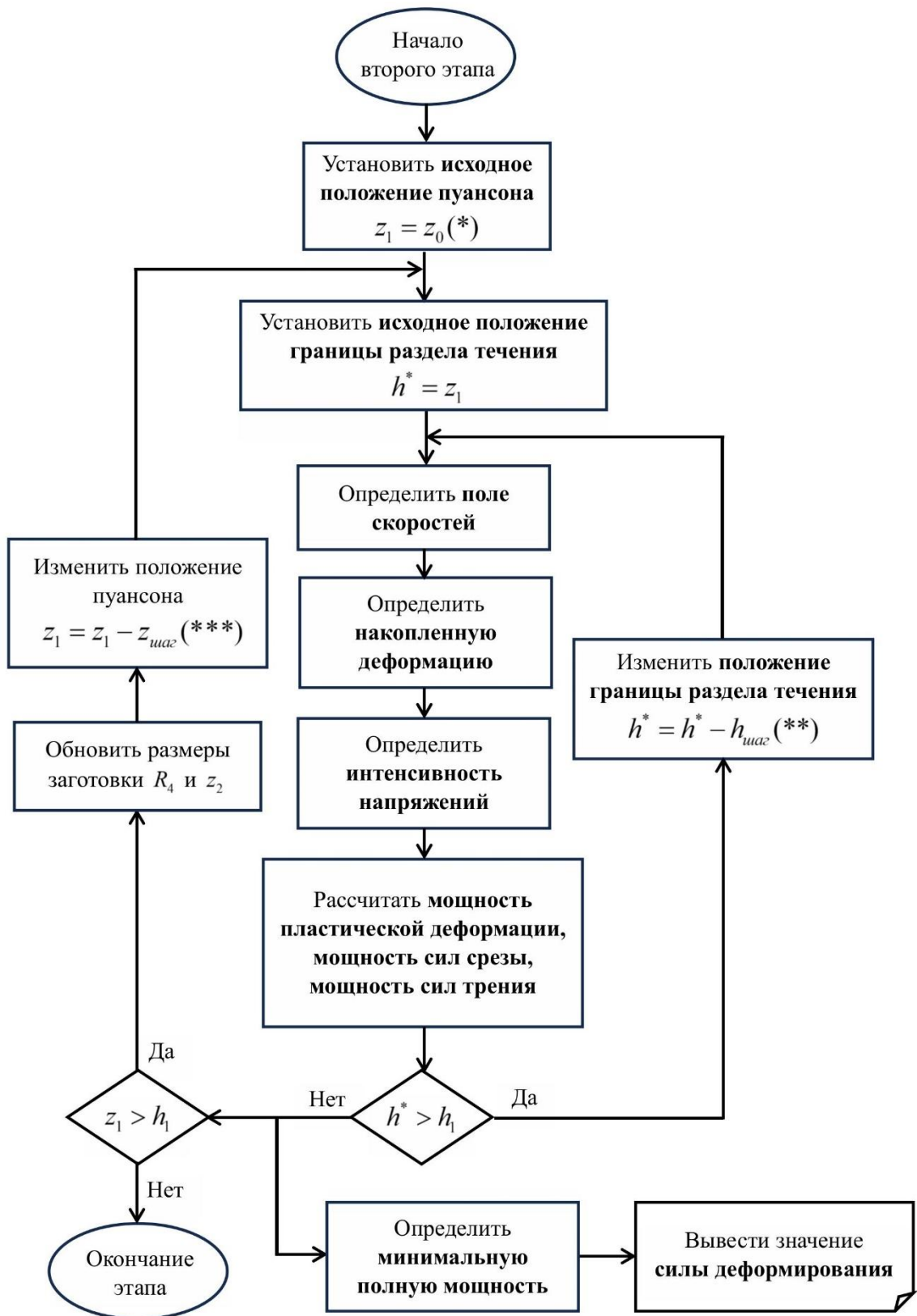
выходные данные. В качестве основных результатов выводятся значения силы деформирования на каждом этапе перемещения пуансона, что позволяет проследить динамику изменения нагрузок в процессе формообразования.

Исходные данные для расчётов включают геометрические параметры заготовки и инструмента, коэффициент трения на их контактных поверхностях, скорость перемещения пуансона, а также характеристики, описывающие упрочнение материала. Вычисления выполняются для каждого значения координаты z_l с шагом 0,5 мм. На каждом шаге программа определяет накопленную деформацию и последовательно рассчитывает полную мощность процесса, которая формируется как сумма мощностей пластической деформации, сил трения и сил среза для всех выделенных зон течения материала. Затем на основании уравнения баланса мощности рассчитывается и выводится значение силы деформирования, соответствующее текущему положению пуансона. На рисунке 2.6 представлены алгоритмы вычисления математической модели с помощью приложения.

Расчёт процесса комбинированного выдавливания на втором этапе представляет собой более сложную задачу. Основной особенностью данного этапа является необходимость определения положения границы раздела течения h^* , при котором полная мощность минимальна. Для этого при каждом значении координаты z_l последовательно перебираются варианты h^* с шагом 0,1 мм, после чего выбирается минимальное значение полной мощности. Найденное оптимальное значение h^* далее используется для определения соответствующей силы деформирования, которая выводится как конечный результат расчёта (рисунок 2.7).



Рисунок 2.6 – Алгоритмы вычисления математической модели с помощью приложения



(*) z_0 – начальное положение пуансона на втором этапе

(**) $h_{шаг} = 0,1$ мм

(***) $z_{шаг} = 0,5$ мм

Рисунок 2.7 – Алгоритмы вычисления процесса комбинированного выдавливания второго этапа

2.5 Проверка применимости математической модели

Для оценки применимости разработанной математической модели комбинированного выдавливания были проведены расчёты при различных исходных условиях. В качестве материалов заготовок выбраны конструкционные стали 10, 15, 20 и 22. Для каждой марки стали использовались заготовки различной геометрии (высота, диаметр), что позволило определить влияние размеров и свойств материала на величину силы деформирования.

На основании расчётных данных, полученных по математической модели, построена таблица и графики изменения силы деформирования в зависимости от материала и геометрических параметров заготовки. Эти результаты позволяют определить оптимальные сочетания параметров, при которых реализуется процесс холодной объёмной штамповки без превышения допустимых сил, и могут быть использованы при выборе заготовок для дальнейших технологических расчётов и проектирования инструмента.

Физико-механические свойства материалов, а также параметры кривых упрочнения для сталей 10, 15, 20 и 22 были получены из базы данных программного комплекса QForm. Эти характеристики включают зависимость предела текучести от степени пластической деформации. Полученные данные использованы для задания исходных параметров в разработанной математической модели процесса комбинированного выдавливания.

Для проверки применимости разработанной математической модели была создана расчётная схема с заданными геометрическими параметрами инструмента и заготовки. В модели приняты следующие значения: высота формируемого фланца $h_1 = 9$ мм, толщина стенки $\Delta R = 10$ мм, угол конической части матрицы $\varphi = 50^\circ$, её высота $h_2 = 15$ мм (рисунок 2.8). Внутренний радиус матрицы принят равным радиусу заготовки. Процесс радиального и обратного выдавливания включает два этапа (рисунок 2.2). Однако, поскольку радиус заготовки равен внутреннему радиусу матрицы, стадия осадки первого этапа не учитывается в

расчётах. Процесс деформирования считается завершённым при достижении пуансоном координаты h_1 , соответствующей толщине фланца.

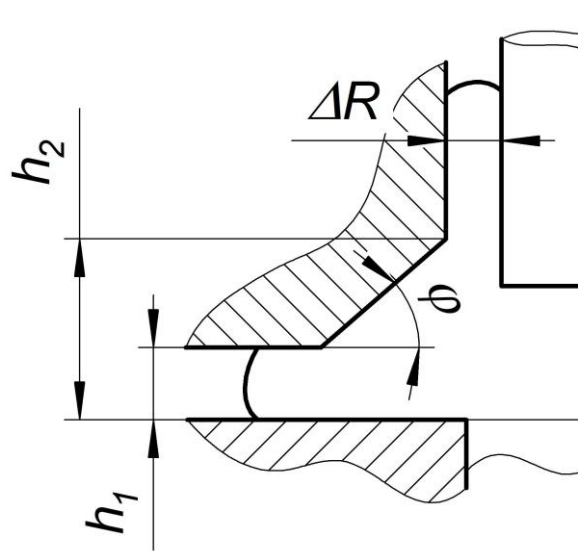


Рисунок 2.8 – Расчетная схема для проверки применимости математической модели

Таблица 2.1 – Результаты расчета силы деформирования при различных геометрических размерах заготовки из стали 10, МН

Первый этап										
Высота заготовки, мм	Диаметр заготовки, мм									
	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
30	1,23	1,86	2,61	3,62	4,73	5,85	7,86	8,96	11,46	12,26
40	1,25	1,87	2,61	3,61	4,70	5,80	7,77	8,84	11,29	12,06
50	1,27	1,89	2,63	3,62	4,70	5,79	7,74	8,79	11,21	11,97
60	1,31	1,93	2,67	3,66	4,74	5,81	7,74	8,79	11,18	11,93
70	1,34	1,97	2,71	3,7	4,77	5,83	7,70	8,81	11,14	11,89
Второй этап										
30	0,64	1,33	2,30	3,61	5,32	7,46	10,10	13,27	17,07	21,52
40	0,74	1,53	2,68	4,26	6,29	8,89	12,12	16,04	20,75	26,81
50	0,83	1,74	3,04	4,84	7,21	10,45	14,32	18,91	24,60	31,38
60	0,90	1,85	3,22	5,38	7,90	11,90	16,51	21,11	27,27	35,88
70	0,99	2,10	3,66	5,71	8,46	13,17	18,47	23,67	30,40	39,54

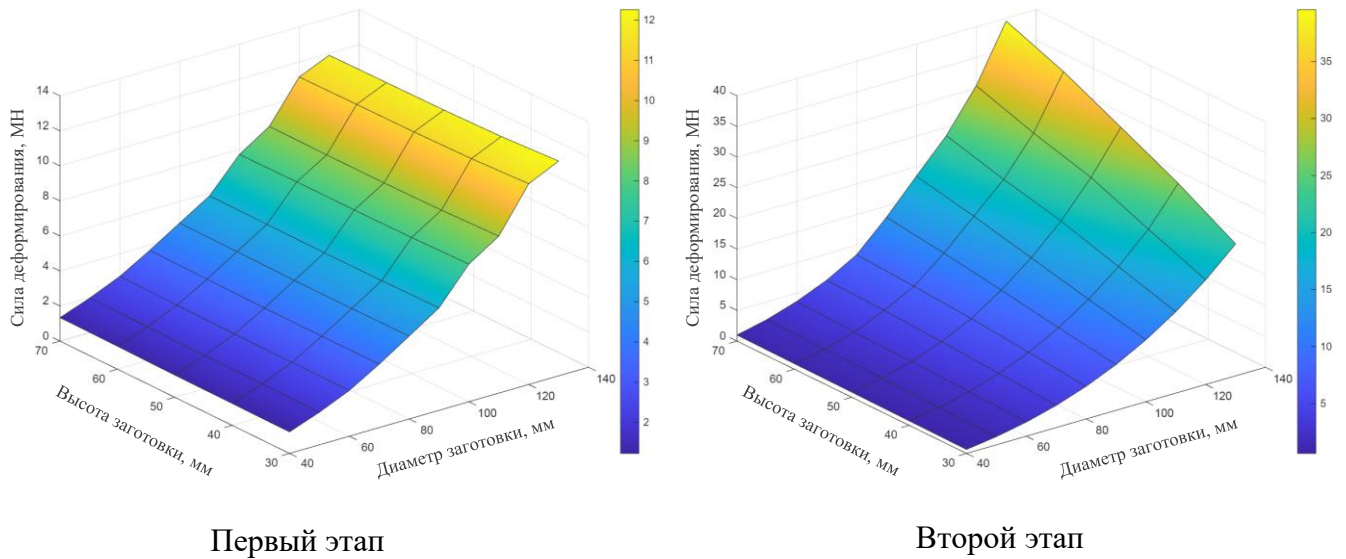


Рисунок 2.9 – Зависимость значения силы деформирования от геометрических размеров заготовки из стали 10

Таблица 2.2 – Результаты расчета силы деформирования при различных геометрических размерах заготовки из стали 15, МН

Первый этап										
Высота заготовки, мм	Диаметр заготовки, мм									
	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
30	1,40	2,09	2,91	4,03	5,24	6,42	8,66	9,75	12,51	13,19
40	1,40	2,07	2,87	3,97	5,14	6,29	8,47	9,52	12,20	12,83
50	1,41	2,08	2,87	3,95	5,10	6,23	8,37	9,40	12,03	12,64
60	1,43	2,10	2,89	3,96	5,10	6,21	8,33	9,34	11,94	12,44
70	1,46	2,13	2,92	3,98	5,08	6,20	8,30	9,29	11,91	12,38
Второй этап										
30	0,77	1,61	2,81	4,40	6,49	9,24	12,57	16,58	21,43	27,08
40	0,90	1,87	3,31	5,29	7,90	11,23	15,42	20,52	26,73	34,09
50	1,01	2,14	3,83	6,16	9,26	13,24	18,28	24,5	32,14	41,26
60	1,08	2,30	4,10	6,96	10,48	14,96	20,86	27,6	35,87	46,80
70	1,16	2,48	4,36	7,58	11,54	16,46	22,80	30,0	39,20	50,80

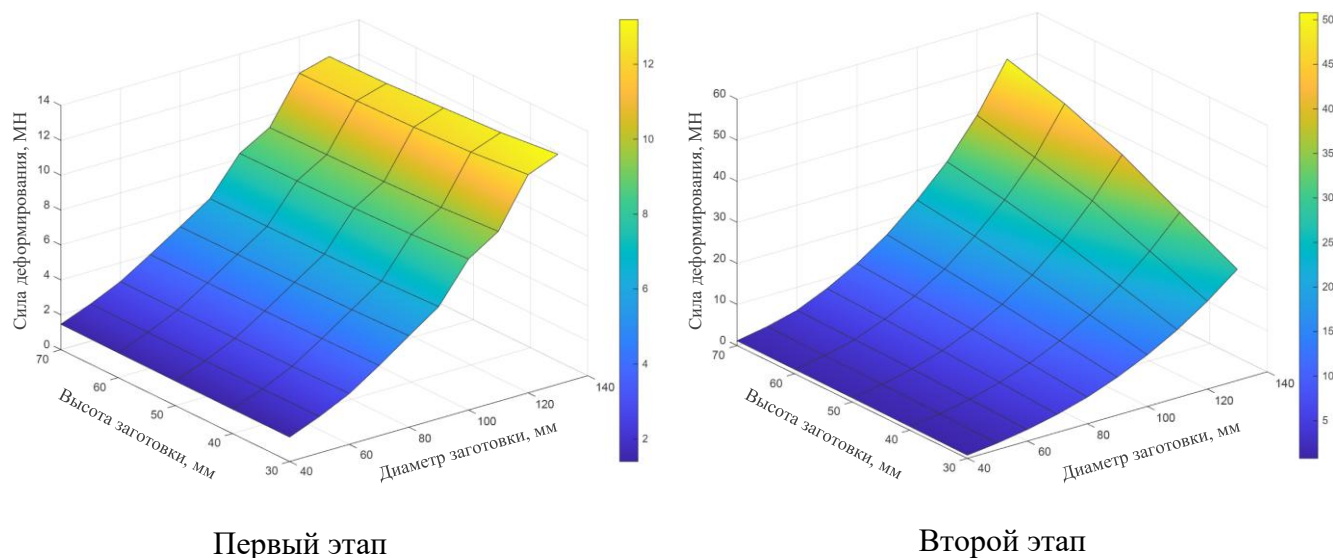


Рисунок 2.10 – Зависимость значения силы деформирования от геометрических размеров заготовки из стали 15

Таблица 2.3 – Результаты расчета силы деформирования при различных геометрических размерах заготовки из стали 20, МН

Первый этап									
Высота заготовки, мм	Диаметр заготовки, мм								
	40	50	60	70	80	90	100	110	120
30	1,47	2,18	3,03	4,20	5,44	6,67	9,00	10,12	12,98
40	1,47	2,17	3,01	4,14	5,36	6,55	8,82	9,91	12,70
50	1,49	2,19	3,02	4,14	5,34	6,52	8,75	9,82	12,56
60	1,52	2,22	3,05	4,16	5,36	6,52	8,73	9,79	12,50
70	1,56	2,26	3,09	4,21	5,38	6,50	8,69	9,75	12,46
Второй этап									
30	0,82	1,73	3,00	4,74	7,02	9,90	13,50	18,11	23,46
40	0,96	2,02	3,58	5,74	8,61	12,31	16,97	22,66	29,63
50	1,09	2,32	4,16	6,73	10,17	14,61	20,27	27,27	35,30
60	1,16	2,46	4,38	7,57	11,46	16,40	22,99	30,14	39,10
70	1,24	2,62	4,60	8,35	12,44	18,13	25,14	32,54	42,80

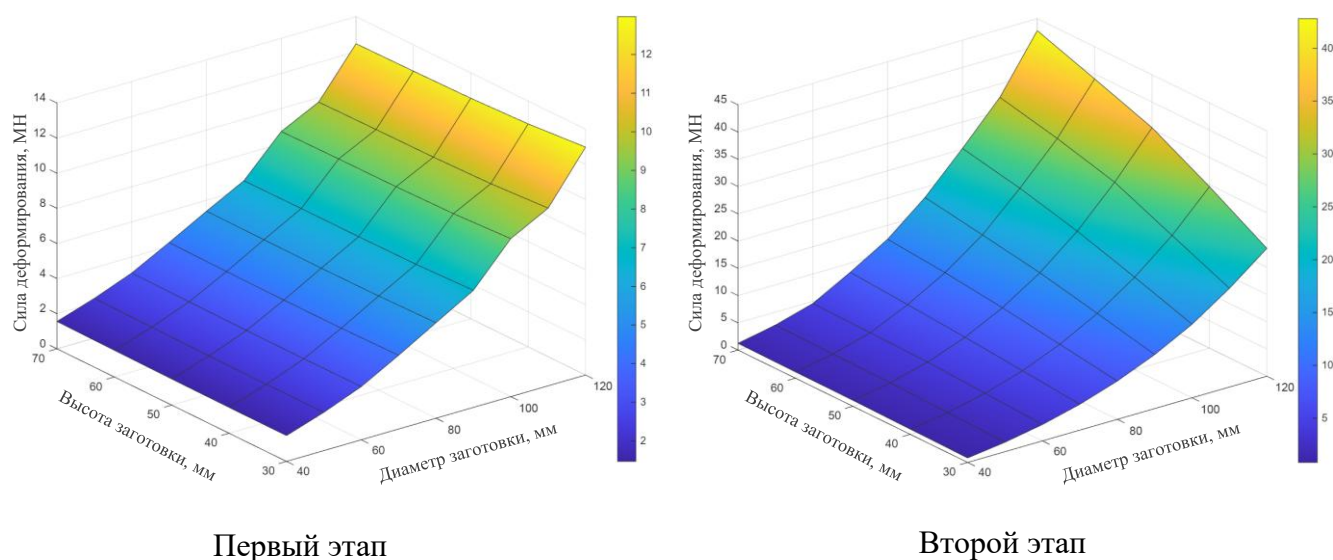


Рисунок 2.11 – Зависимость значения силы деформирования от геометрических размеров заготовки из стали 20

Таблица 2.4 – Результаты расчета силы деформирования при различных геометрических размерах заготовки из стали 22, МН

Первый этап									
Высота заготовки, мм	Диаметр заготовки, мм								
	40	50	60	70	80	90	100	110	120
30	1,62	2,43	3,39	4,71	6,13	7,53	10,15	11,47	14,71
40	1,62	2,41	3,35	4,63	6,02	7,39	9,94	11,21	14,36
50	1,63	2,41	3,35	4,61	5,97	7,31	9,82	11,07	14,16
60	1,65	2,44	3,36	4,61	5,96	7,29	9,76	10,99	14,04
70	1,68	2,46	3,39	4,64	5,97	7,29	9,73	10,93	13,96
Второй этап									
30	0,86	1,81	3,15	4,96	7,31	10,27	13,94	18,35	23,64
40	1,01	2,10	3,69	5,88	8,74	12,39	16,95	22,49	29,19
50	1,13	2,39	4,25	6,82	10,20	14,52	19,97	26,65	34,78
60	1,22	2,61	4,63	7,73	11,58	16,45	22,90	30,25	39,17
70	1,33	2,83	4,98	8,47	12,80	18,36	25,58	33,56	43,71

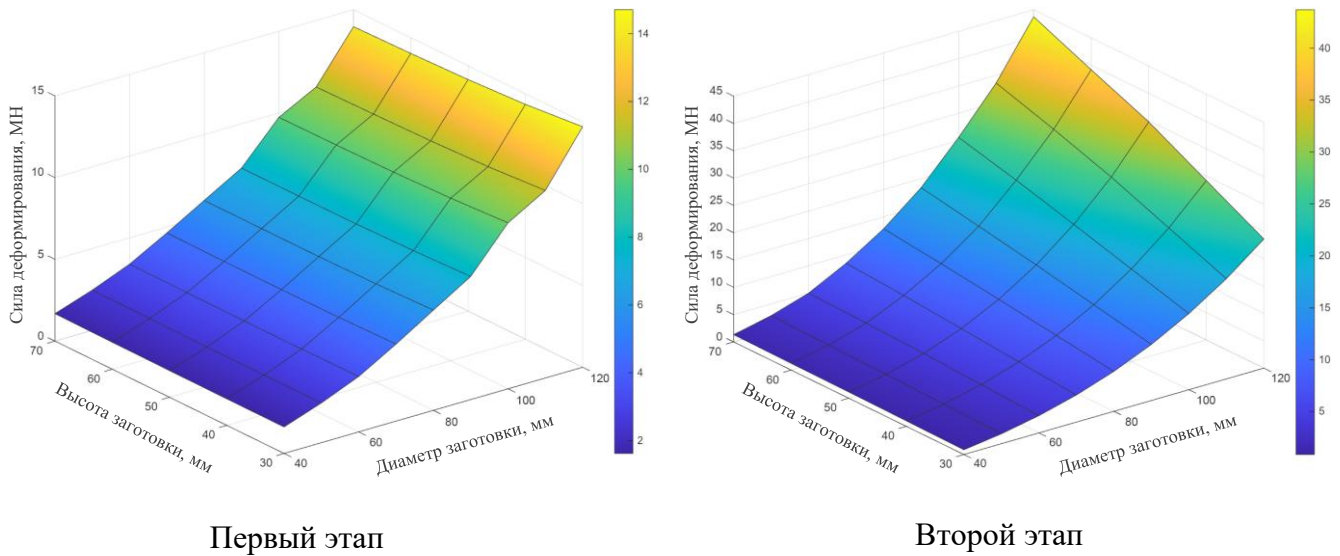


Рисунок 2.12 – Зависимость значения силы деформирования от геометрических размеров заготовки из стали 22

На основании данных, представленных в таблицах 2.1–2.4, показаны максимальные значения силы деформирования для каждого этапа процесса при различных геометрических размерах заготовки и для различных материалов: стали 10, 15, 20 и 22. Анализ представленных результатов, а также графиков зависимости максимальной силы деформирования от геометрических параметров заготовки (рис. 2.9–2.12) позволяет определить оптимальные размеры заготовки и соответствующие значения силы деформирования. Эти данные могут быть использованы при выборе прессового оборудования, обеспечивающего требуемые параметры технологического процесса при холодной объемной штамповке.

Следует отметить, что представленные выше расчетные данные получены при неизменных значениях отдельных геометрических параметров – высоты фланца, толщины стенки и параметров конической части матрицы. Влияние этих факторов на величину силы деформирования будет рассмотрено более подробно в главе 3, где приведен анализ зависимости силы деформирования от указанных параметров, а также выполнено сравнение результатов математической модели с данными, полученными при численном моделировании в программном комплексе QForm.

2.6 Выводы по главе 2

1. В результате анализа процесса комбинированного радиального и обратного выдавливания установлено, что формообразование заготовки типа «стакан с фланцем» включает два характерных этапа: заполнение конической полости матрицы и последующее комбинированное течение металла в радиальном и обратном направлениях. Такое представление процесса позволило выделить основные зоны деформации и задать кинематически допустимые поля скоростей для расчета энергосиловых параметров.

2. На основе метода баланса мощностей получены зависимости для расчета силы деформирования с учетом мощности пластической деформации, сил трения, сил среза и упрочнения материала. Это позволяет более обоснованно оценивать энергосиловые параметры процесса по сравнению с расчетом без учета изменения механических свойств.

3. Расчеты для заготовок из сталей 10, 15, 20 и 22 показали, что сила деформирования зависит от материала и геометрических размеров заготовки. Наиболее заметное влияние оказывает увеличение диаметра заготовки, особенно на втором этапе процесса, что необходимо учитывать при выборе размеров заготовки и прессового оборудования при разработке методики получения сложного составного изделия типа «ступица» методом комбинированного выдавливания.

4. Полученные расчетные данные и разработанное приложение на языке C# позволяют оперативно определять силу деформирования при различных исходных параметрах. Это подтверждает возможность использования предложенной математической модели для предварительного проектирования технологии получения заготовки типа «стакан с фланцем» при изготовлении сложного составного изделия типа «ступица».

ГЛАВА 3. СРАВНЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА КОМБИНИРОВАННОГО ПРОЦЕССА РАДИАЛЬНОГО И ОБРАТНОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ В КОНИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕ МЕТОДОМ БАЛАНСА МОЩНОСТИ С УЧЕТОМ УПРОЧНЕНИЯ МЕТАЛЛА С РЕЗУЛЬТАТОМ МОДЕЛИРОВАНИЯ В ПРОГРАММЕ QFORM.

В данной главе исследовано напряженно-деформированное состояние материалов при пластическом деформировании. На основе результатов осадки цилиндрических образцов построены кривые упрочнения, позволяющие количественно описать зависимость сопротивления деформации от степени пластической деформации. Полученные экспериментальные данные использованы для задания реологических характеристик материала в математической модели, разработанной во второй главе, а также при численном моделировании процесса в программном комплексе QForm.

Сопоставление результатов аналитических расчетов и конечно-элементного моделирования в QForm выполнено не только с целью оценки возможности и обоснованности применения разработанной математической модели, но и для анализа влияния геометрических параметров инструмента и технологических условий на величину силы деформирования. Такой подход позволяет выявить характер изменения силы деформирования при варьировании размеров инструмента, а также использовать полученные результаты для прогнозирования технологических параметров и выбора рациональных размеров инструмента на этапе проектирования процесса комбинированного выдавливания.

Проведение широкомасштабных экспериментальных исследований с варьированием геометрии заготовок и инструмента в рамках данной работы затруднено вследствие необходимости изготовления значительного количества опытных заготовок и сложной штамповой оснастки. В этой связи в качестве эталонного метода сравнения использовано численное моделирование в программном комплексе QForm, который является общепризнанным и широко

применяемым инструментом анализа процессов холодной объёмной штамповки в научной и промышленной практике Российской Федерации.

3.1 Установление кривой упрочнения металла при пластическом деформировании

Для определения зависимости сопротивления деформации от степени деформации и построения кривые упрочнения были проведены эксперименты по сжатию образцов из исследуемого металла. За счёт хорошей смазки по торцам образца (периодически заменяемых прокладок из полиэтиленовой пленки в комбинации с машинным маслом) напряженное состояние можно считать линейным. Показатель напряженного состояния $K = 0,33$. Показатель Лодэ-Надаи $\mu_\sigma = 1$. Также для уменьшения бочкообразности по высоте образцов отношение начальных размеров находится в следующих пределах $2 \geq H_0/D_0 \geq 1$.

Для исследования была выбрана сталь 10 и 20 ГОСТ 1050-2013 (таблица 3.1). В качестве заготовок использовался прокат стальной горячекатаный круглый по ГОСТ 2590-88. Из проката было изготовлено 7 цилиндрических образцов из стали 10 Ø25 мм высотой 35 мм и 6 образцов из стали 20 Ø10 высотой 15 мм. Образцы осаживались до различных значений степени деформации. Осадка производилась на гидравлическом прессе модели EU-100, развивающим скорость при рабочем ходе $\approx 0,1$ мм/сек.

Таблица 3.1 – Химический состав стали 10 и стали 20 по ГОСТ 1050-2013

Марка стали	C (%)	Mn (%)	Si (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Ni (%)	Cu (%)
Сталь 10	0,07-0,14	0,25-0,5	до 0,17	до 0,03	до 0,03	до 0,15	до 0,15	до 0,2
Сталь 20	0,17-0,24	0,35-0,65	до 0,27	до 0,035	до 0,035	до 0,25	до 0,25	до 0,3

Осадку образцов проводили в специальной штамповой оснастке типа «стакан» (рисунок 3.1) для обеспечения соосности и параллельности. Для исключения перекоса между пуансоном и основанием и обеспечения строгой перпендикулярности образца применяется с наружной поверхности инструмента направляющий стакан по скользящей посадке строго по оси. Для обеспечения положения строго по центру осаживаемого образца по оси применяется центрирующий винт (3 штуки под 1200). После установки и фиксации образца строго по оси центрирующие три винта выкручиваются для обеспечения свободной осадки на требуемую величину деформации.



Рисунок 3.1 – Специальная штамповая оснастка типа «стакан» для осадки цилиндрических образцов.

При испытаниях на сжатие важно исключить влияние сил трения, для этого во время осадки между образцом и пуансоном устанавливали прокладки из полиэтиленовой пленки, смазанные машинным маслом. В результате осадки бочкообразность по высоте образцов была незначительной.

При определении интенсивностей напряжений и деформаций использовались следующие формулы:

$$\sigma_i = \frac{4P}{\pi \cdot d^2}; \quad \varepsilon_i = 2 \ln \frac{d}{d_0},$$

где P – деформирующее усилие;

d – диаметр деформированного образца;

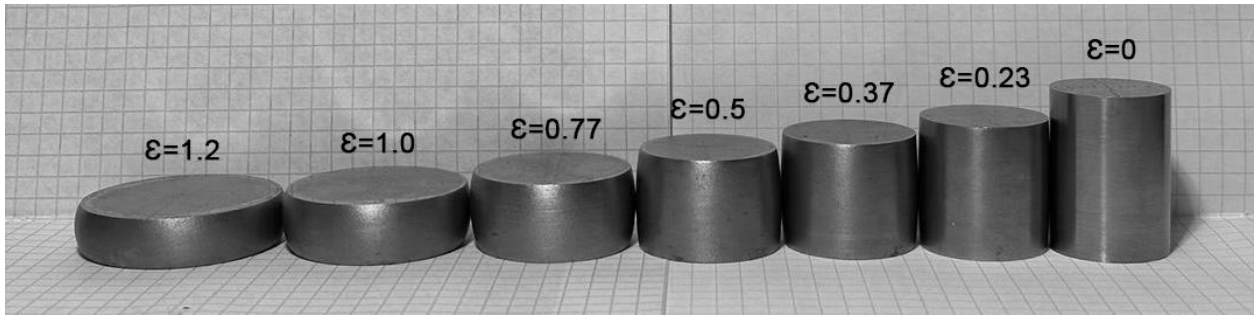
d_0 – исходный диаметр образца;

Таблица 3.2 – Результаты эксперимента

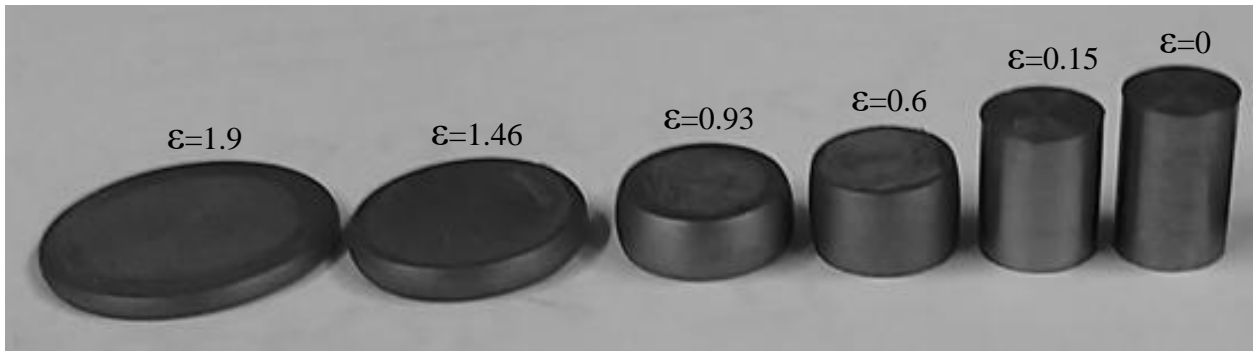
№ обр.	Высота h, мм	Диаметр d, мм	Сила P_i , кН	Деформация ε_i	Напряжение σ_i , МПа
Сталь 10					
1	35	25	0	0	0
2	28.5	28	275	0.23	446.6
3	24.8	30.1	350	0.37	491.9
4	21.9	32.1	415	0.50	512.8
5	17	36.8	570	0.77	535.9
6	13.3	41.3	760	1.0	567.3
7	11	45.5	1000	1.2	615.0
Сталь 20					
1	15	10	0	0	0
2	12.88	10.83	50	0.15	542.8
3	8.27	13.74	98	0.6	660.9
4	5.9	16.35	150	0.93	714.4
5	3.5	21.49	300	1.46	827.1
6	2.2	25.83	520	1.9	992.3

На рисунке 3.2 представлены результаты осадки цилиндрических образцов из стали 10 и стали 20.

По результатам эксперимента были построены кривые упрочнения зависимости интенсивности напряжений и интенсивности деформаций для стали 10 и стали 20 (рисунок 3.3).



а



б

Рисунок 3.2 – Результаты осадки цилиндрических образцов из стали 10 (а) и стали 20 (б)

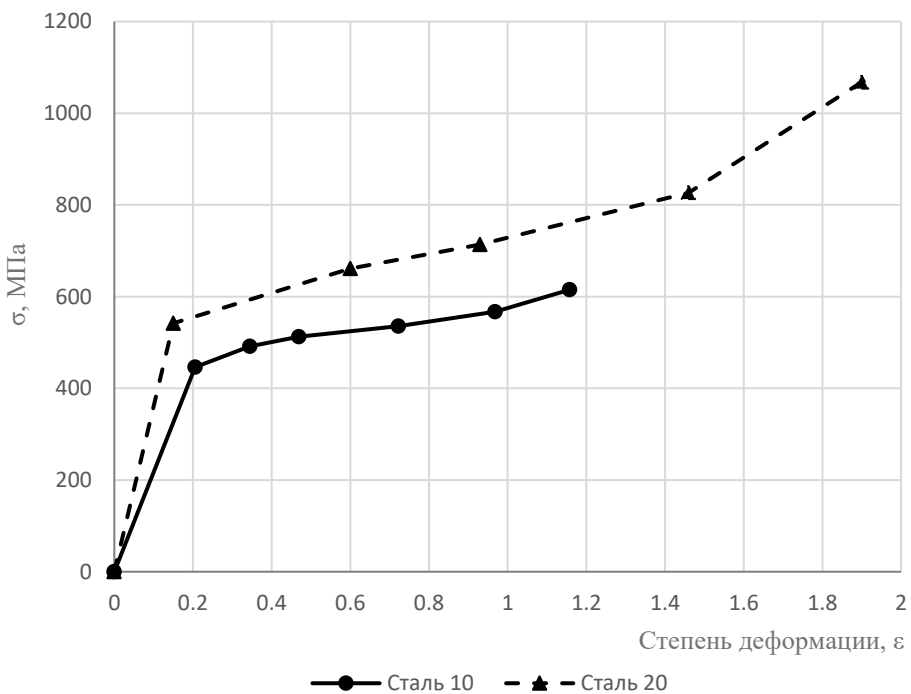


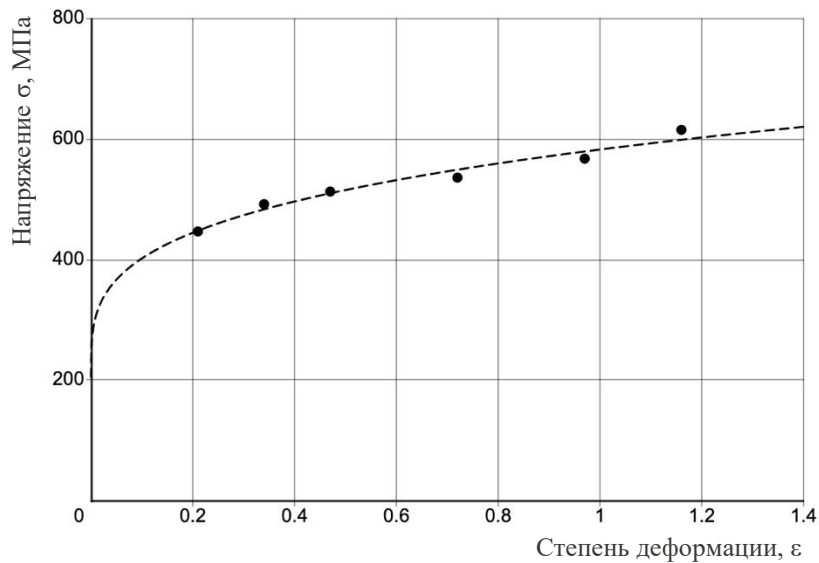
Рисунок 3.3 – Кривая упрочнения стали 10 и стали 20 по результатам осадки цилиндрических образцов

Для настройки механических характеристик математической модели и материалов в программном комплексе QFORM при пластическом деформировании необходимо провести аппроксимацию кривой упрочнения по эмпирической формуле:

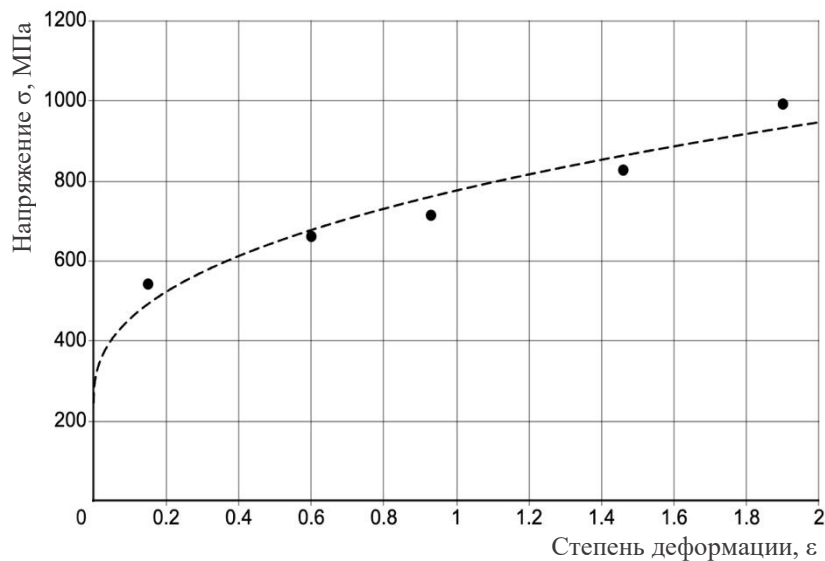
$$\sigma = \sigma_T + A \cdot \varepsilon^n,$$

где σ_T – предел текучести материала (базовое значение сопротивления деформации),

A, n – эмпирические коэффициенты, получаемые экспериментально.



Сталь 10



Сталь 20

Рисунок 3.4 – Кривые упрочнения по эмпирической формуле для стали 10 и стали 20

На рисунке 3.4 представлены кривые упрочнения по эмпирическому формуле для стали 10 и стали 20 ГОСТ 1050-2013. После аппроксимации кривой упрочнения получены эмпирические формулы

$$\text{для стали 10:} \quad \sigma = 205 + 377,5 \cdot \varepsilon^{0,2827} \quad (3.1)$$

$$\text{для стали 20:} \quad \sigma = 245 + 530,8 \cdot \varepsilon^{0,4023} \quad (3.2)$$

3.2 Компьютерное моделирование комбинированного процесса радиального и обратного выдавливания в конической матрице.

Проведено моделирование процесса радиального и обратного выдавливания с варьированием геометрических соотношений инструмента и условий процесса в системе конечно-элементного моделирования QForm. Размеры исходной заготовки и виртуального инструмента для моделирования соответствовали размерам математической модели, приведённой во второй главе.

В рамках исследования изменялись следующие параметры:

- высота фланца, h_1 ;
- угол конической части матрицы, φ ;
- размеры пуансона на втором этапе комбинированного процесса, r_1 ;
- коэффициент трения между заготовкой и инструментом, μ .

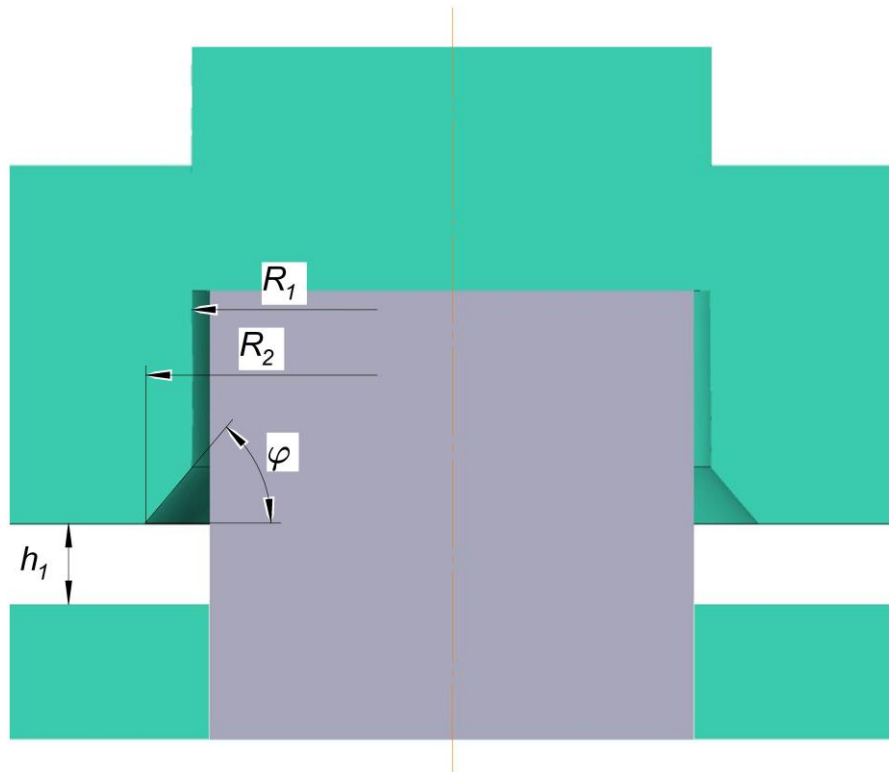
На рисунке 3.5 представлены геометрические размеры инструмента в начале каждого этапа исследуемого процесса при моделировании в системе QForm.

Полученные в результате моделирования значения максимальной силы деформирования были сопоставлены с результатами, рассчитанными по разработанной математической модели.

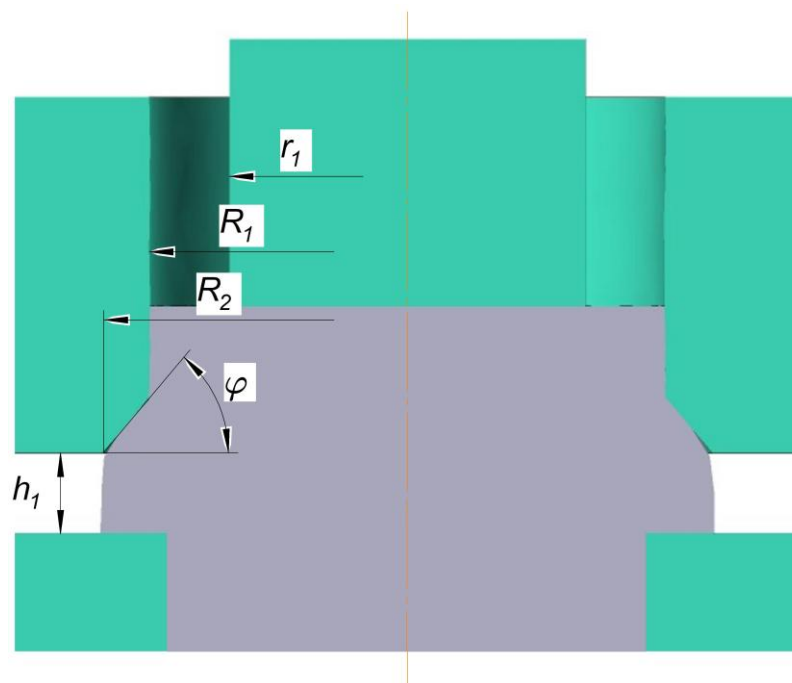
Целью сравнения результатов численного моделирования и аналитических расчётов является проверка применимости и надёжности предложенной математической модели для описания исследуемого технологического процесса.

Для обеспечения корректного сравнения результатов численного моделирования и аналитических расчётов необходимо использовать одинаковые характеристики материала в обеих методиках. Кривая упрочнения материала

задаётся в соответствии с формулами (3.1) и (3.2). На рисунке 3.6 представлена настройка параметров заготовки, используемых при моделировании в системе QForm.



Первый этап



Второй этап

Рисунок 3.5 – Геометрические размеры инструмента на каждом этапе исследуемого процесса при моделировании в системе QForm

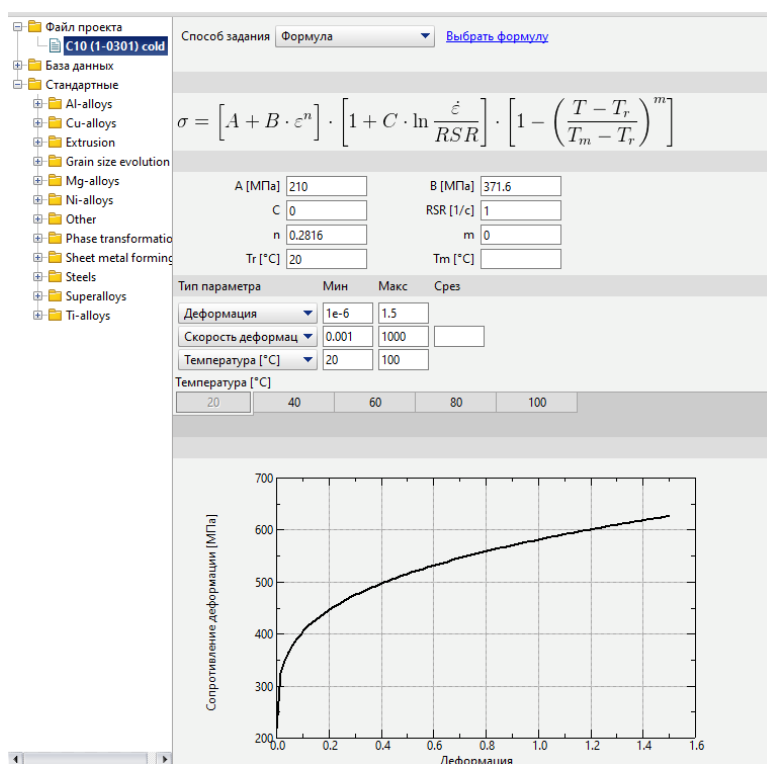


Рисунок 3.6 – Настройка параметров заготовки для моделирования

3.3 Сравнение результатов математического моделирования с данными, полученными конечно-элементным моделированием

Для сравнения изменения значения силы деформирования, полученных с помощью аналитического расчета (с учетом и без учета упрочнения), а также численного моделирования методом конечных элементов в программном обеспечении QForm, процесс был смоделирован при следующих параметрах:

r_1 , мм	R_1 , мм	R_2 , мм	h_1 , мм	φ , град.	μ
20	29	34,3	9	50	0,2

На рисунке 3.7 представлена диаграмма изменения силы деформирования в исследуемом процессе радиального и обратного выдавливания в зависимости от хода инструмента (пуансона).

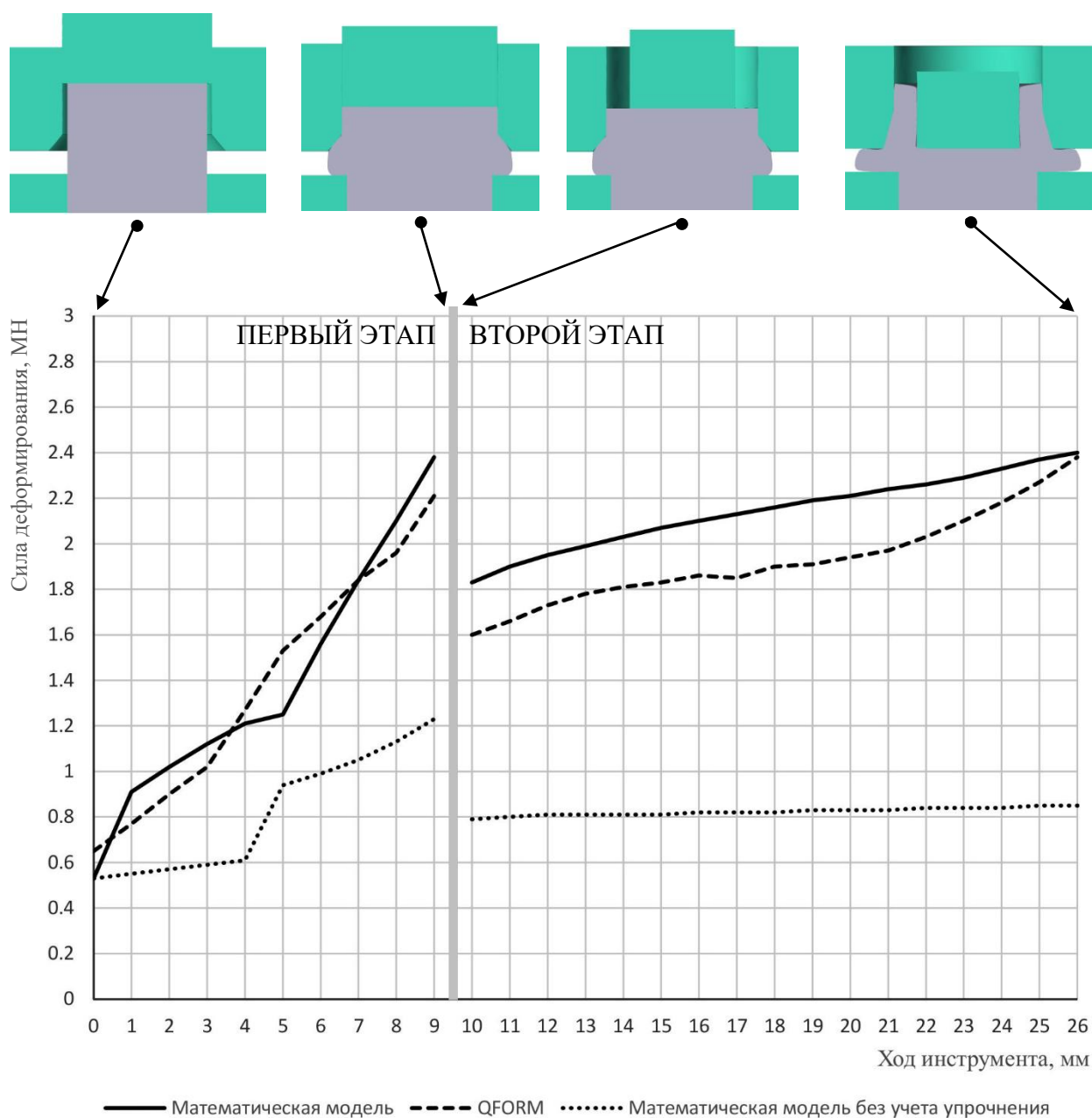


Рисунок 3.7 – Диаграмма изменения силы деформирования
в зависимости от хода инструмента

Для изучения влияния различных параметров на изменение максимальной силы деформирования на каждом этапе процесса было проведено поэтапное варьирование следующих факторов:

- угол конической части матрицы, φ ;
- радиус пуансона на втором этапе комбинированного процесса, r_I ;
- высота фланца, h_I ;
- коэффициент трения между заготовкой и инструментом, μ .

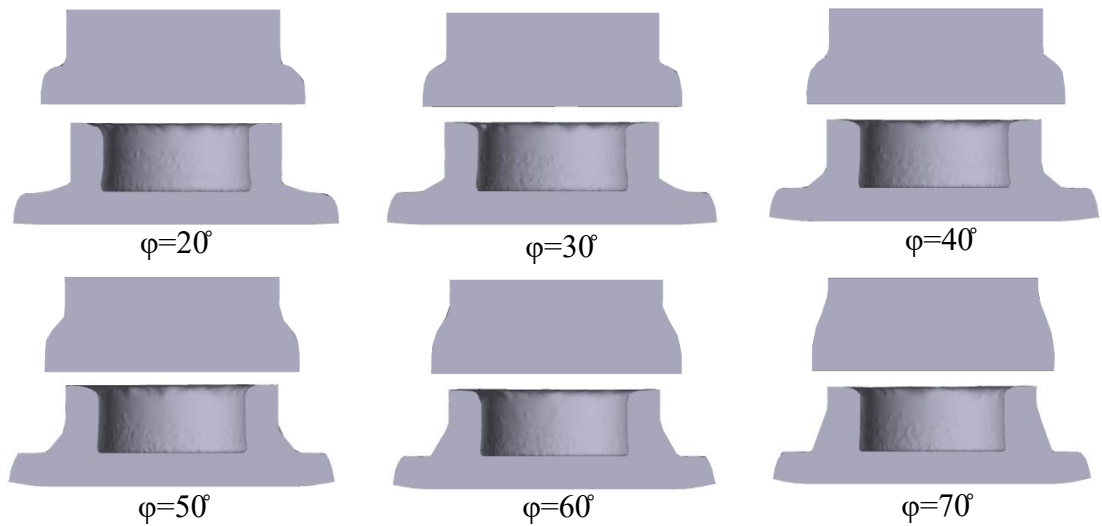
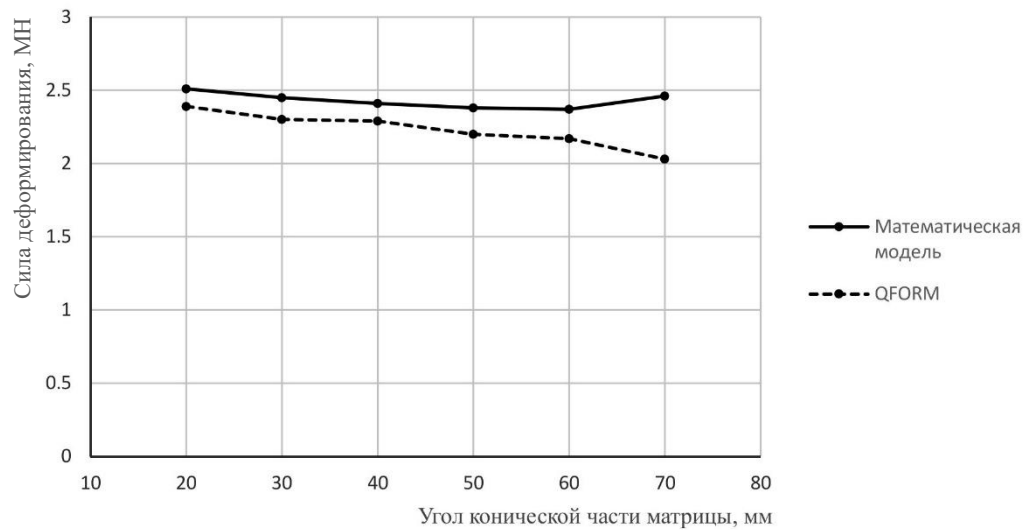
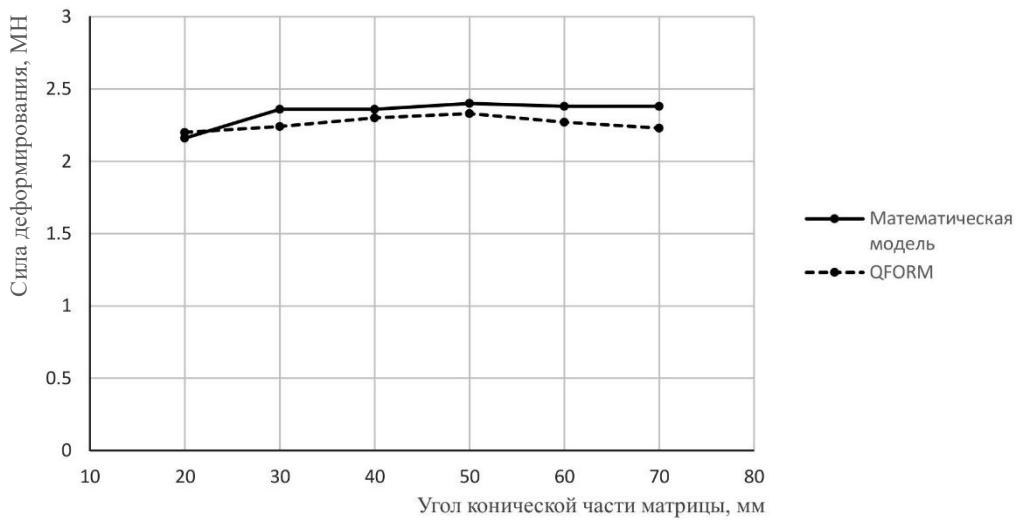


Рисунок 3.8 – Результаты моделирования в QForm при различных углах конической части матрицы



а)



б)

Рисунок 3.9 – Диаграммы максимальной силы деформирования в зависимости от угла конической части матрицы на первом (а) и втором (б) этапах

На основе полученных данных построены сравнительные диаграммы максимальной силы деформирования.

На рисунке 3.9. представлены диаграммы максимальной силы деформирования на каждом этапе процесса в зависимости от угла конической части матрицы.

На рисунке 3.11. представлены диаграммы максимальной силы деформирования на каждом этапе процесса в зависимости от высоты фланца.

На рисунке. 3.13. представлены диаграммы максимальной силы деформирования на каждом этапе процесса в зависимости от коэффициента трения между заготовкой и инструментом.

На рисунке 3.15. представлена диаграмма максимальной силы деформирования на втором этапе процесса в зависимости от радиуса пуансона.

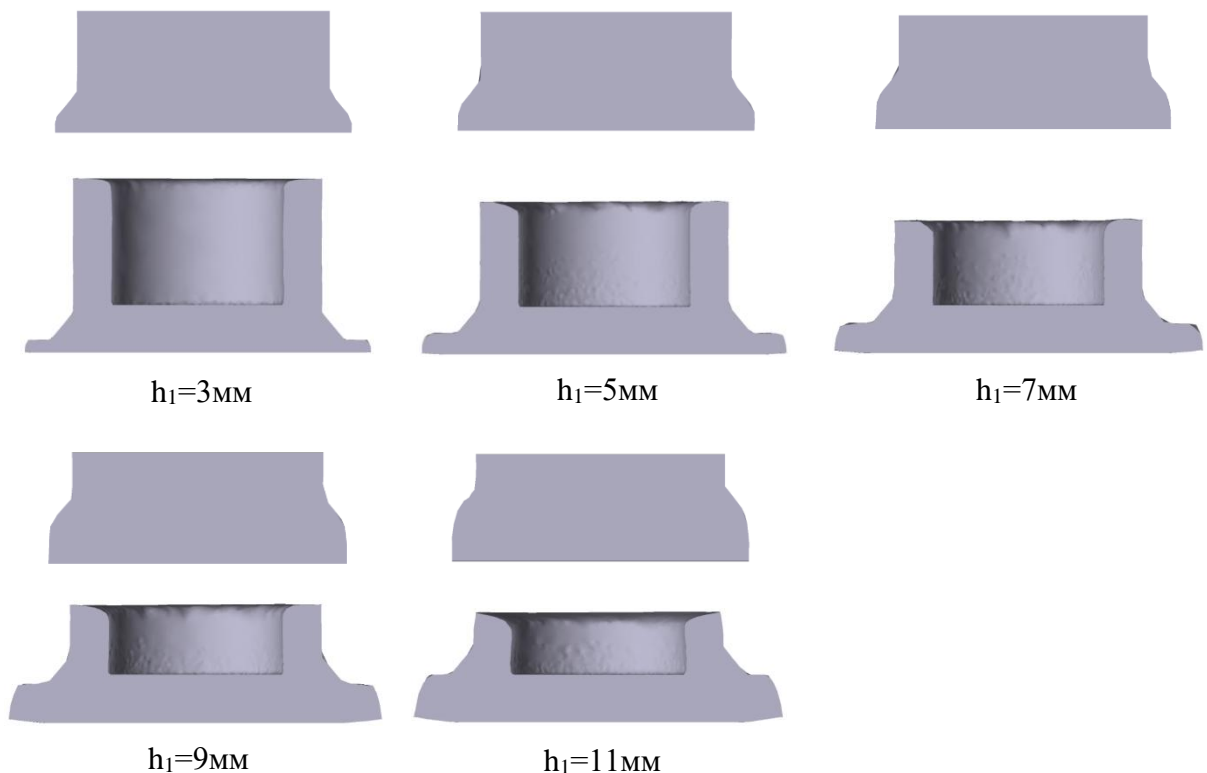
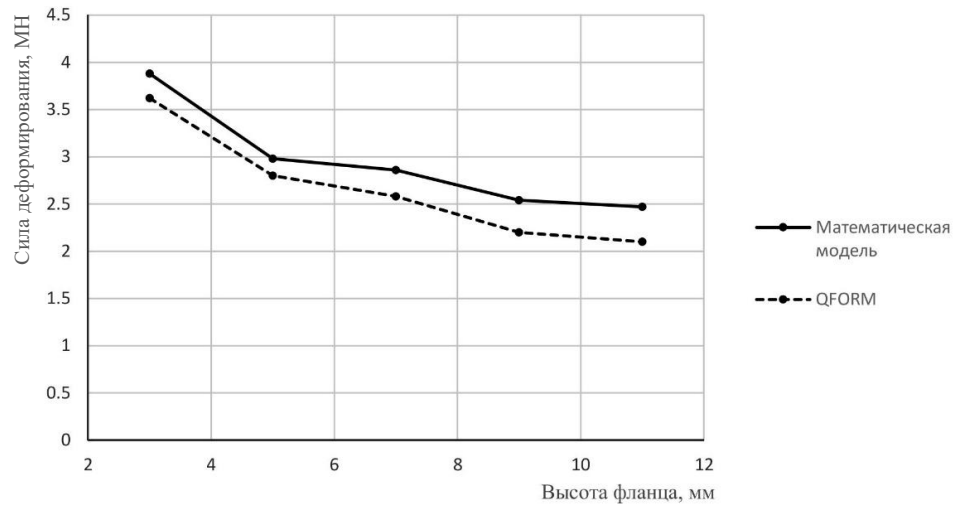
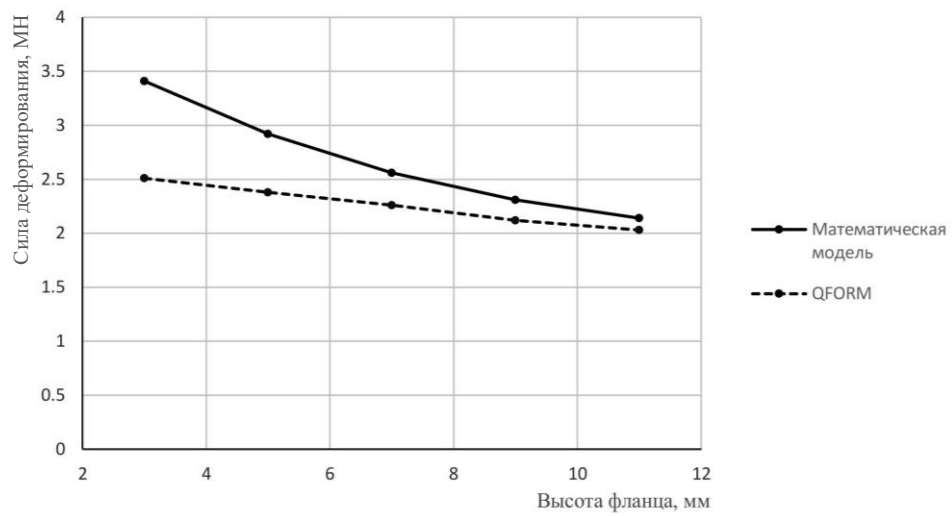


Рисунок 3.10 – Результаты моделирования в QForm при различных высотах фланца



а)



б)

Рисунок 3.11 – Диаграммы максимальной силы деформирования в зависимости от высоты фланца на первом (а) и втором (б) этапах

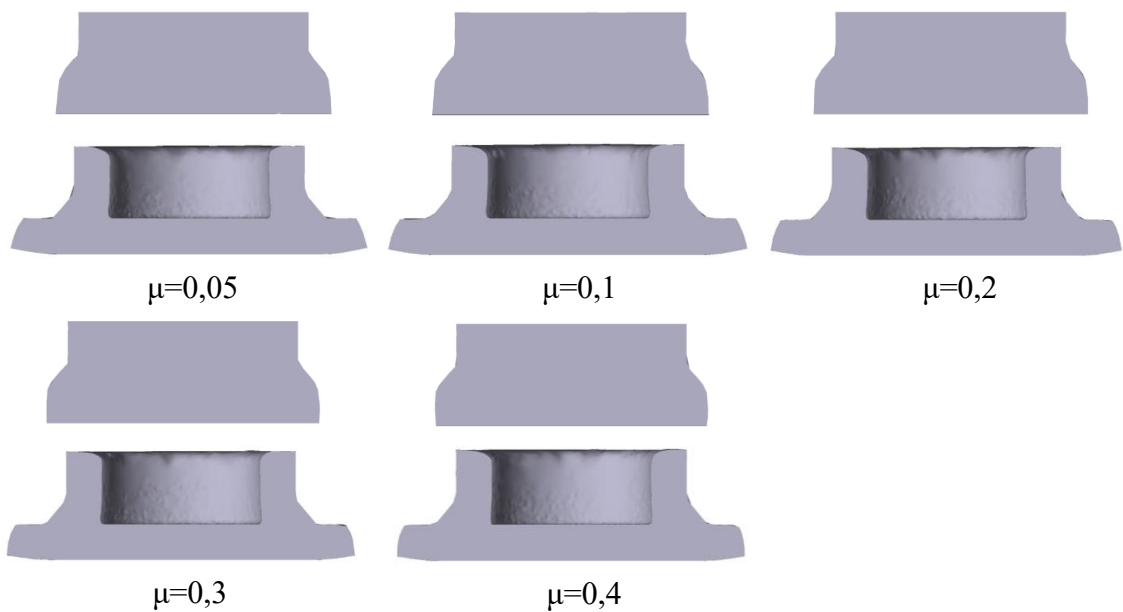
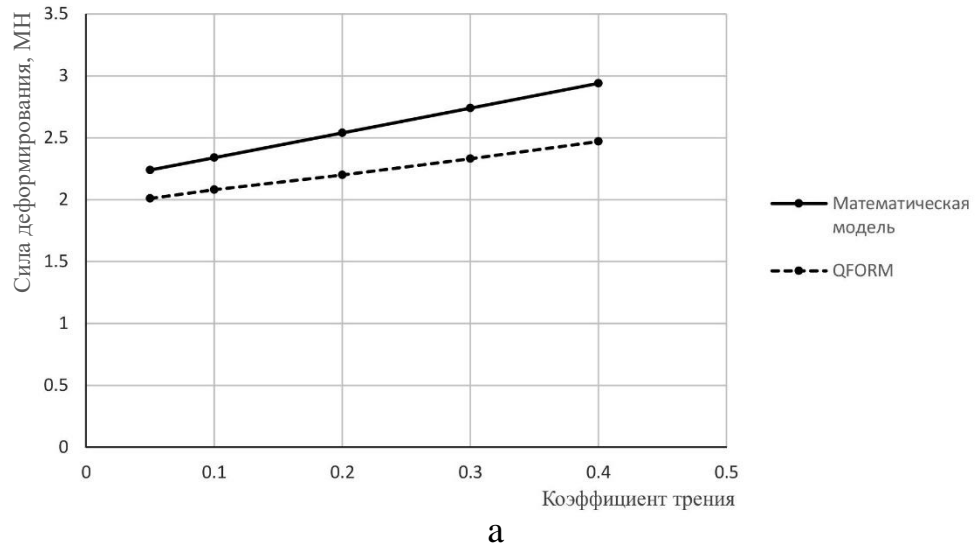
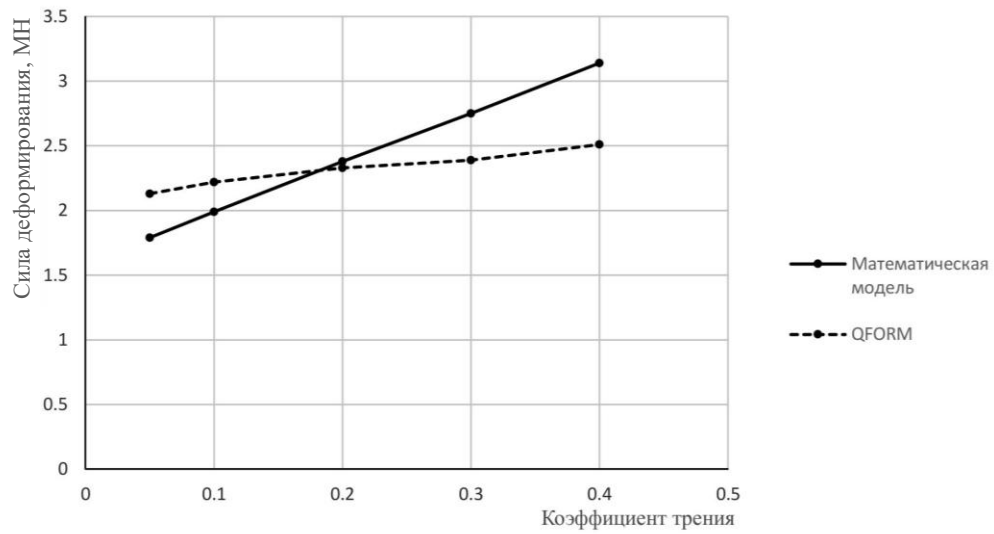


Рисунок 3.12 – Результаты моделирования в QForm при различных коэффициентах трения



а



б

Рисунок 3.13 – Диаграммы максимальной силы деформирования в зависимости от коэффициента трения на первом (а) и втором (б) этапах

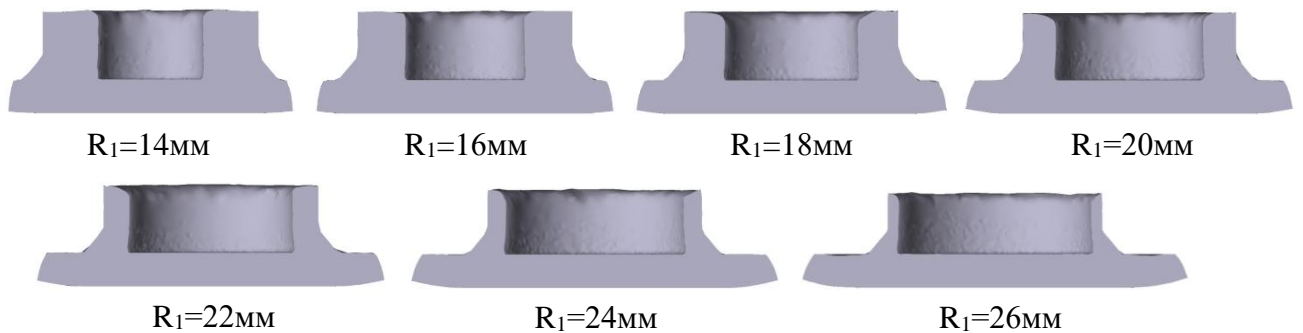


Рисунок 3.14 – Результаты моделирования в QForm при различных радиуса пуансона на втором этапе

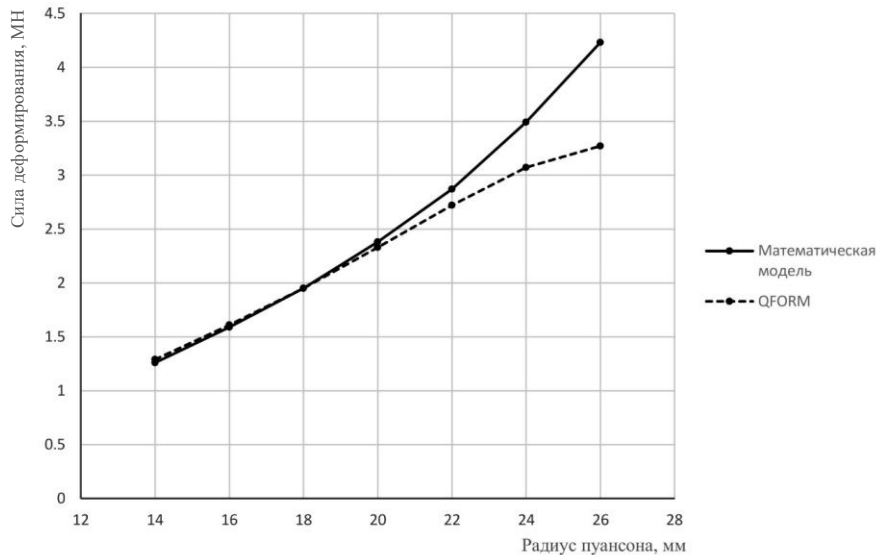


Рисунок 3.15 – Диаграмма максимальной силы деформирования в зависимости от радиуса пуансона на втором этапе

На основе диаграммы (рисунок 3.7) можно отметить, что при расчёте математической модели без учёта упрочнения материала значения силы деформирования значительно отличаются от результатов, полученных с помощью моделирования в QForm, а также от математической модели с учётом упрочнения. Таким образом, в случае игнорирования упрочнения использование метода баланса мощностей для определения силы деформирования даёт недостоверные результаты, что, в свою очередь, влияет на точность прогноза при выборе подходящего пресса и инструмента.

Кроме того, диаграмма показывает, что расхождение между значениями силы деформирования, полученными с помощью моделирования в QForm и математической модели с учётом упрочнения, не является значительным и не превышает 15%.

Согласно диаграмме на рисунке 3.9, значения максимальной силы деформирования на двух этапах при различных углах конической части матрицы, полученные двумя методами моделирования, незначительно различаются (не более чем на 11%) в диапазоне углов от 20 до 60 градусов.

Согласно диаграмме на рисунке 3.11, расхождение между значениями максимальной силы деформирования, полученными двумя методами моделирования при различных значениях высоты фланца, не превышает 18% в

случае, когда высота фланца составляет более 5 см, что соответствует более 15% исходной высоты заготовки.

Кроме того, можно отметить, что при увеличении высоты фланца наблюдается снижение значения максимальной силы деформирования. Это связано с тем, что при большей высоте фланца увеличивается объём материала, вовлечённого в радиальное выдавливание. Это приводит к уменьшению нагрузки на инструмент, что является преимуществом радиального выдавливания в штамповочных операциях.

Согласно диаграмме на рисунке 3.15, значения максимальной силы деформирования на втором этапе (на комбинированном выдавливании) при различных значениях радиуса пуансона, полученные двумя методами, отличаются не более чем на 14% в диапазоне радиусов пуансона менее 24 мм, что соответствует менее 85% радиуса матрицы, то есть максимального радиуса зоны обратного течения материала.

Кроме того, можно отметить, что при уменьшении радиуса пуансона наблюдается снижение значения максимальной силы деформирования. Это связано с тем, что при меньшем радиусе пуансона увеличивается объём материала, вовлечённого в процесс обратного выдавливания, что приводит к снижению общего сопротивления деформации. Таким образом, обратное выдавливание, как и радиальное, позволяет эффективно снизить нагрузку на инструмент.

Согласно диаграмме на рисунке 3.13, при изменении коэффициента трения между заготовкой и инструментом значения максимальной силы деформирования, полученные двумя методами моделирования, отличаются не более чем на 13% в диапазоне коэффициентов трения менее 0,3. Это указывает на достаточно хорошее совпадение результатов двух подходов при низком уровне трения.

Однако с увеличением коэффициента трения наблюдается рост расхождения между двумя методами. Это связано с тем, что аналитическая модель основана на ряде упрощений, включая линейную модель трения и идеализированное распределение напряжений, в то время как моделирование в QForm позволяет учитывать сложные контактные условия и реальное течение материала в процессе

деформации. В результате, при более высоких значениях трения вклад сил трения в общую силу деформирования возрастает, а точность аналитической оценки снижается.

3.4 Выводы по главе 3

1. По результатам испытаний на осадку построены кривые упрочнения для сталей 10 и 20. Полученные зависимости показывают изменение сопротивления пластической деформации с ростом степени деформации и могут быть использованы как исходные данные при математическом и конечно-элементном моделировании процессов холодной объёмной штамповки.

2. Численное моделирование в программном комплексе QForm показало, что геометрические параметры инструмента и технологические условия существенно влияют на распределение напряжений, деформаций и величину силы деформирования при комбинированном радиальном и обратном выдавливании. Это подтверждает необходимость учёта параметров пуансона, матрицы, высоты фланца и условий трения при проектировании процесса.

3. Сравнение результатов аналитического расчёта и конечно-элементного моделирования показало, что при рациональном выборе технологических и геометрических параметров расхождение максимальных значений силы деформирования не превышает 20 %. Это подтверждает возможность применения разработанной математической модели на этапе предварительного проектирования процесса комбинированного выдавливания.

4. Установлено, что для оценки требуемой силы деформирования необходимо совместно учитывать геометрические размеры заготовки, свойства материала и параметры инструмента. Полученные результаты позволяют определять диапазон сил деформирования, выбирать подходящее прессовое оборудование и использовать математическую модель при разработке методики получения сложного составного изделия типа «ступица» методом комбинированного выдавливания.

ГЛАВА 4. ЗАВИСИМОСТЬ ВЕЛИЧИНЫ ТВЕРДОСТИ ОТ ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ И СТЕПЕНИ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ХОЛОДНОЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКЕ

Целью данного этапа исследования является установление закономерностей изменения твёрдости металла в процессе пластического деформирования и определение её зависимости от интенсивности напряжений и интенсивности деформации. Изучение этой зависимости имеет важное практическое значение, так как твёрдость является интегральным показателем, характеризующим степень упрочнения материала.

Построение тарировочных кривых твёрдости служит основой для последующего использования экспериментальных данных при анализе процессов упрочнения материала цилиндрической заготовки, которая в рамках данной работы рассматривается как основной деформируемый элемент при формировании сложного составного изделия типа «ступица». Кроме того, результаты данного исследования позволяют оценивать степень упрочнения после холодной объёмной штамповки и использовать полученные зависимости для прогнозирования распределения механических свойств изделия на этапе численного моделирования в программном комплексе QForm.

4.1 Построение тарировочных графиков зависимости твердости интенсивности напряжений и степени деформации

В четвертой главе приведены экспериментальные исследования зависимости твердости деформированного металла от интенсивности напряжений и интенсивности деформации при пластическом деформировании. Построен тарировочный график зависимости твёрдости от величины деформации для стали 10 и стали 20. Исследована и установлена точность построения кривой упрочнения при одноосном сжатии между зазорами величины деформации металла и твердостью при пластическом деформировании.

Измерение твёрдости проводилось при температуре окружающей среды $(23\pm 5)^\circ\text{C}$, тип прибора для измерения твердости по методу Роквелла TR5006M в соответствии с ГОСТ 9013-59 [39] в лаборатории «Материаловедение» МОСПОЛИТЕХа. Измерения проводились по шкале В. Шероховатость поверхности образцов не превышает $Ra_{1,25}$ по ГОСТ 2789-73 [40]. Перед измерением твёрдости поверхности образцов были очищены от посторонних веществ.

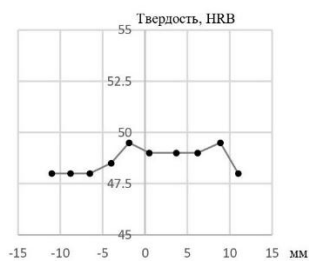
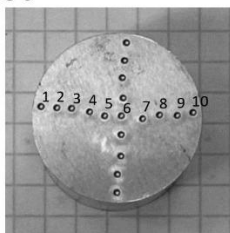
На рисунках 4.1 и 4.2 представлены экспериментальные данные измерений величин твердости на торцевой поверхности в различных местах образцов из сталей 10 и 20.

На рисунках 4.3 и 4.4 представлены графики измерений твердости на торцевой поверхности образцов в зависимости от величины осадки и величины деформации для сталей 10 и 20.

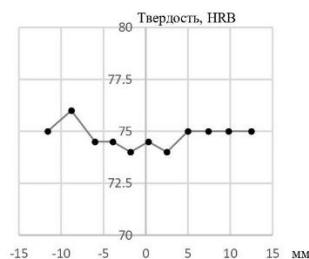
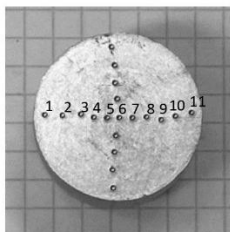
Для построения тарировочного графика «интенсивность напряжения σ_i – твердость – интенсивность логарифмических деформаций ε_i » необходимо рассчитать среднее значение твердости при различных величинах деформации тела, напряженно-деформированное состояние которого было изучено в третьей главе (таблица 4.1).

Таблица 4.1. Средние значения твердости на торцевой поверхности образцов в зависимости от степени деформации и интенсивности напряжений

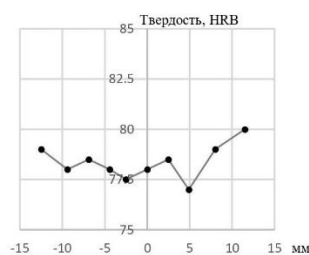
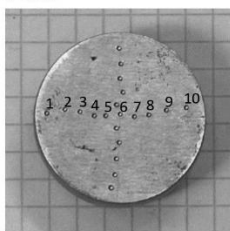
Сталь 10							
Степень деформации	0	0.23	0.37	0.5	0.77	1.0	1.2
Интенсивность напряжений	205	446.6	491.9	512.8	535.9	567.3	615.0
Средняя твердость	48.7	74.8	78.4	80.7	85.2	88.1	89.3
Сталь 20							
Степень деформации	0	0.15	0.6	0.93	1.46	1.9	
Интенсивность напряжений	0	542.8	660.9	714.4	827.1	992.3	
Средняя твердость	69.9	87.4	94.9	97.0	101.4	103.3	

$\epsilon=0$ 

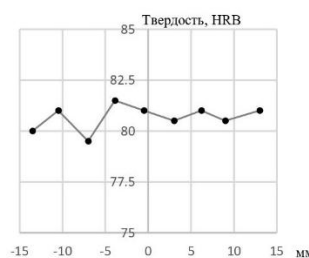
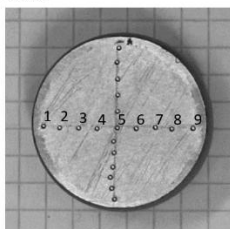
Точка	Твердость, HRB	Точка	Твердость, HRB
1	48	6	49
2	48	7	49
3	48	8	49
4	48.5	9	49.5
5	49.5	10	48

 $\epsilon=0.23$ 

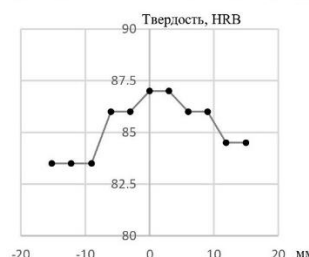
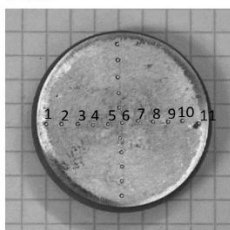
Точка	Твердость, HRB	Точка	Твердость, HRB
1	75	7	74
2	76	8	75
3	74.5	9	75
4	74.5	10	75
5	74	11	75
6	74.5		

 $\epsilon=0.37$ 

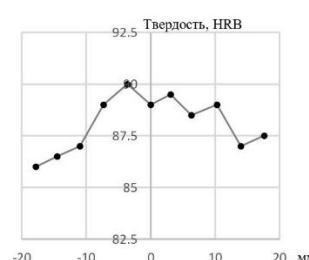
Точка	Твердость, HRB	Точка	Твердость, HRB
1	79	6	78
2	78	7	78.5
3	78.5	8	77
4	78	9	79
5	77.5	10	80

 $\epsilon=0.5$ 

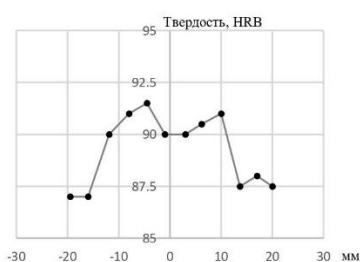
Точка	Твердость, HRB	Точка	Твердость, HRB
1	80	6	80.5
2	81	7	81
3	79.5	8	80.5
4	81.5	9	81
5	81		

 $\epsilon=0.77$ 

Точка	Твердость, HRB	Точка	Твердость, HRB
1	83.5	7	87
2	83.5	8	86
3	83.5	9	86
4	86	10	84.5
5	86	11	84.5
6	87		

 $\epsilon=1.0$ 

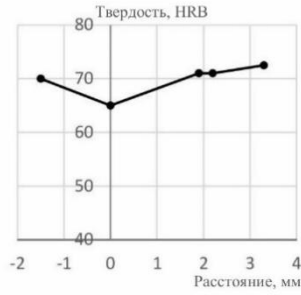
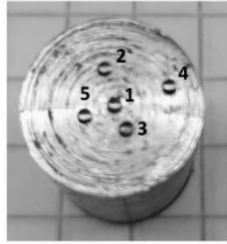
Точка	Твердость, HRB	Точка	Твердость, HRB
1	86	7	89.5
2	86.5	8	88.5
3	87	9	89
4	89	10	87
5	80	11	87.5
6	89		

 $\epsilon=1.2$ 

Точка	Твердость, HRB	Точка	Твердость, HRB
1	87	7	90
2	87	8	90.5
3	90	9	91
4	91	10	87.5
5	91.5	11	88
6	90	12	87.5

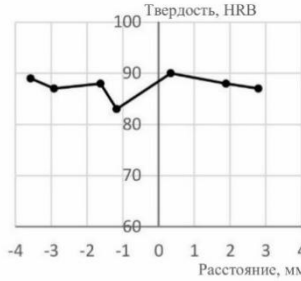
Рисунок 4.1 – Экспериментальные данные измерений величин твердости на торцевой поверхности в местах образцов из стали 10

$\epsilon = 0$



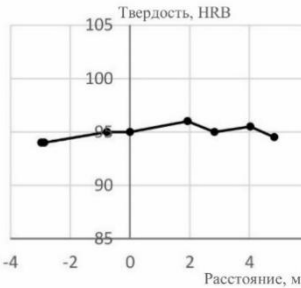
Точка	Твердость, HRB
1	65
2	71
3	71
4	72.5
5	74

$\epsilon = 0.15$



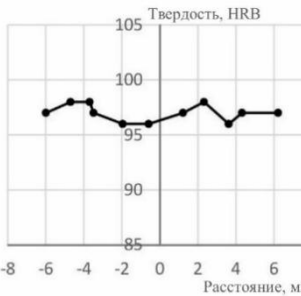
Точка	Твердость, HRB
1	90
2	87
3	83
4	89
5	88
6	88
7	87

$\epsilon = 0.6$



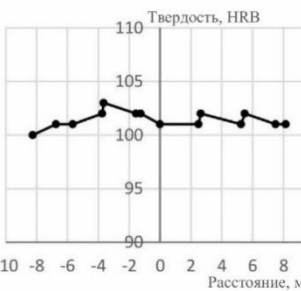
Точка	Твердость, HRB
1	95
2	96
3	95.5
4	94
5	95
6	94.5
7	95
8	94

$\epsilon = 0.93$



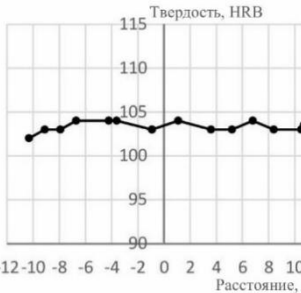
Точка	Твердость, HRB	Точка	Твердость, HRB
1	96	9	96
2	97	10	97
3	96	11	98
4	98		
5	97		
6	98		
7	97		
8	97		

$\epsilon = 1.46$



Точка	Твердость, HRB	Точка	Твердость, HRB
1	101	9	101
2	101	10	101
3	102	11	102
4	101	12	103
5	102	13	101
6	102	14	100
7	101	15	101
8	102		

$\epsilon = 1.9$



Точка	Твердость, HRB	Точка	Твердость, HRB
1	103	9	103
2	104	10	104
3	103	11	103
4	103	12	103
5	103.5	13	104
6	104	14	104
7	103	15	103
8	102		

Рисунок 4.2 – Экспериментальные данные измерений величин твердости на торцевой поверхности в местах образцов из стали 20

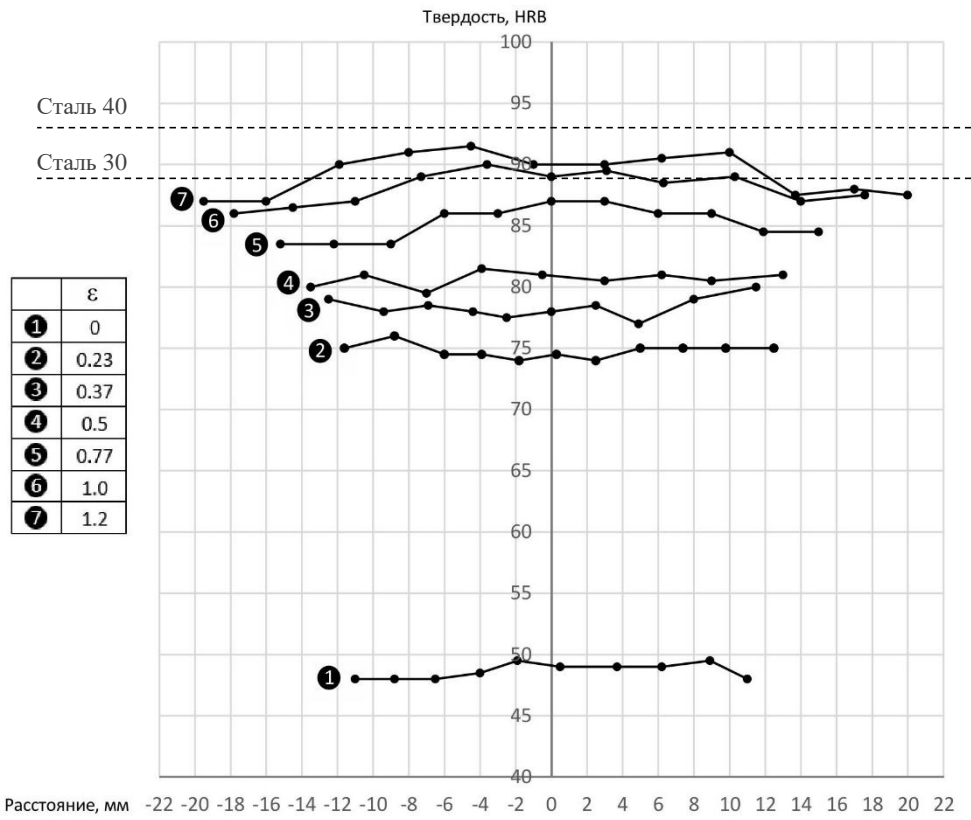


Рисунок 4.3 – График измерений твердости на торцевой поверхности образцов в зависимости от величины осадки и величины деформации

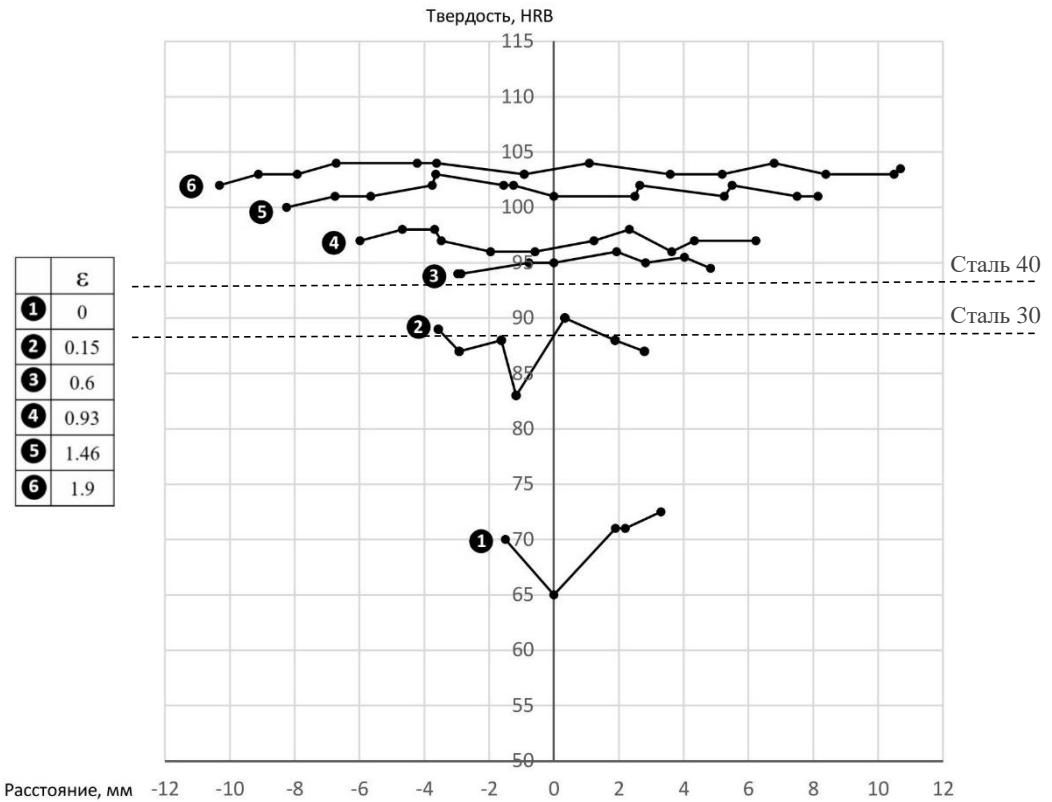


Рисунок 4.4 – График измерений твердости на торцевой поверхности образцов в зависимости от величины осадки и величины деформации

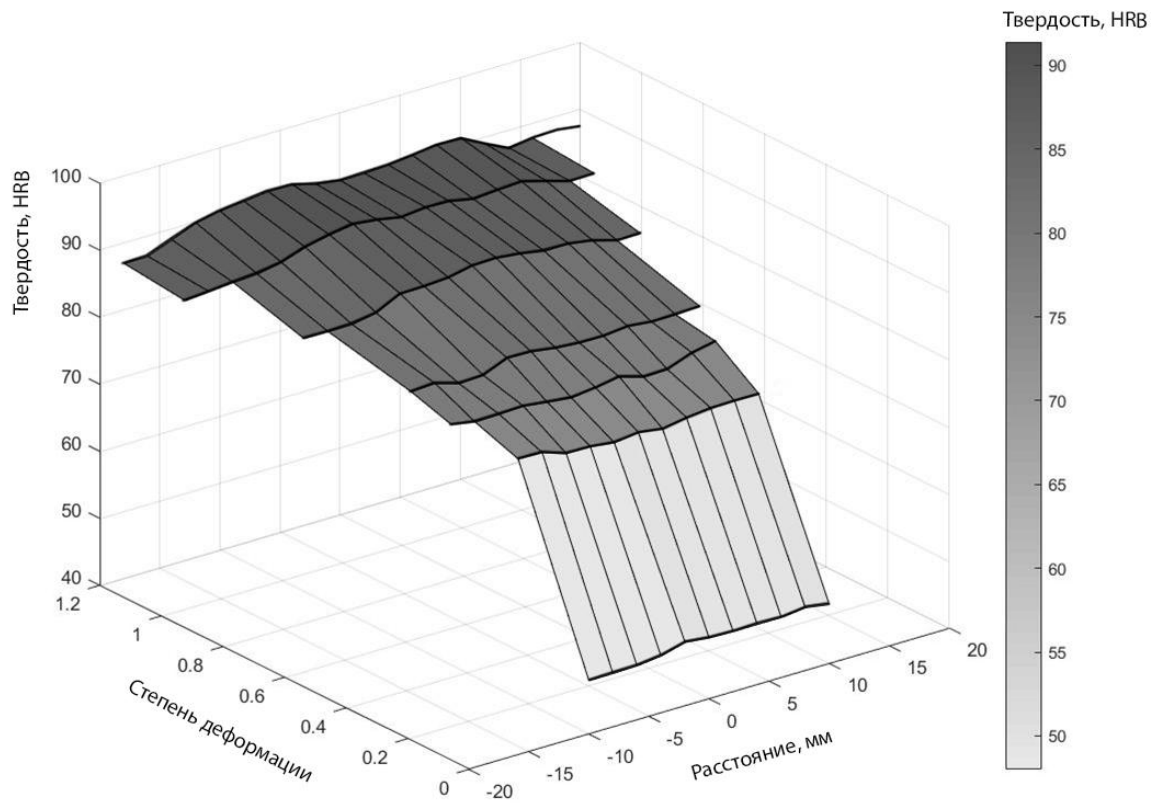


Рисунок 4.5 – График «Твердость-степень-расстояние» для стали 10

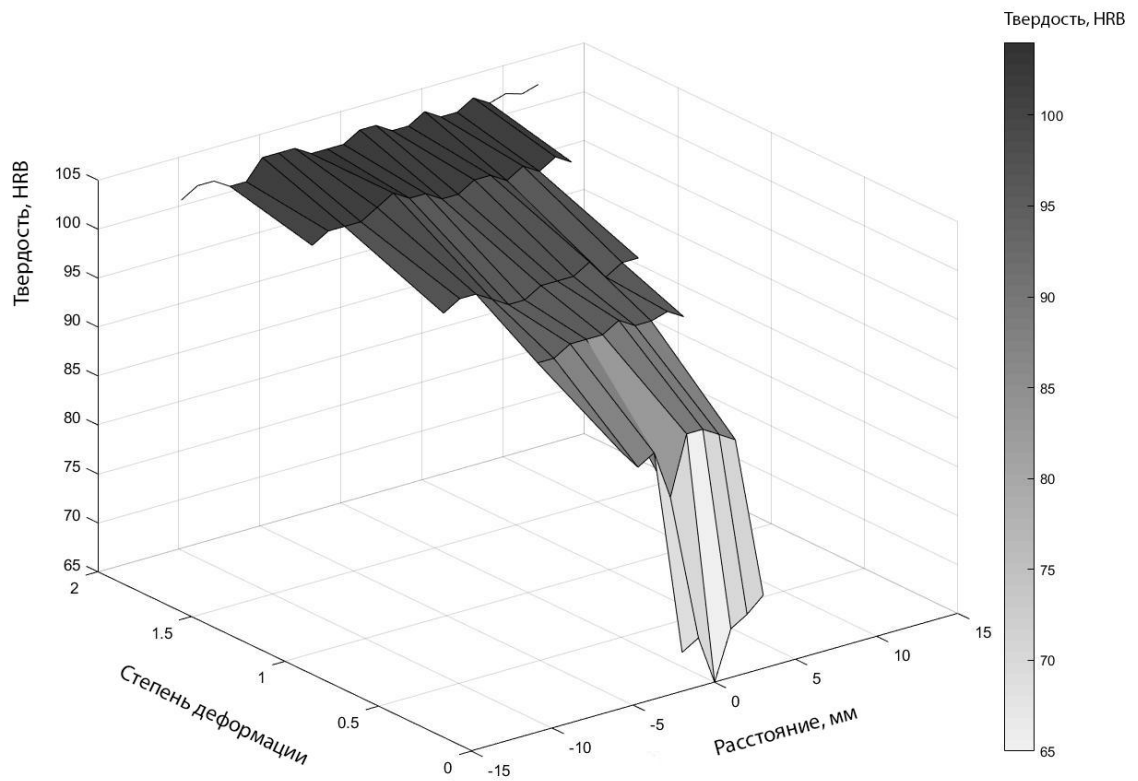


Рисунок 4.6 – График «Твердость-степень-расстояние» для стали 20

Для уменьшения погрешности, связанной с возможным различием исходной твердости исследуемого тела и тарировочных образцов, тарировочный график при определении деформаций следует строить в координатах «интенсивность деформации – приращение твердости».

Построение тарировочного графика путем испытания на сжатие, позволяющая установить зависимость между напряжением, твердостью и логарифмической деформацией в области $\varepsilon = 0 \dots 1,2$ (для стали 10) и $\varepsilon = 0 \dots 1,9$ (для стали 20). При разработке реальных технологических процессах холодной объемной штамповки деталей можно применять приближенное математическое выражение кривой упрочнения, так как применение его удобно и обеспечивает высокую точность.

При обработке экспериментальных данных для построения кривой упрочнения была использована аппроксимация зависимости твердости от напряжения и степени деформации. Аппроксимация выполнялась на основе принципа наименьших квадратов путём подбора параметров в эмпирической формуле для минимизации отклонений между экспериментальными и расчётными значениями. Достоверность полученной зависимости оценивалась по коэффициенту детерминации R^2 . Применение эмпирической зависимости соответствует общепринятым методикам обработки экспериментальных данных и обеспечивает адекватное представление закономерностей упрочнения материала.

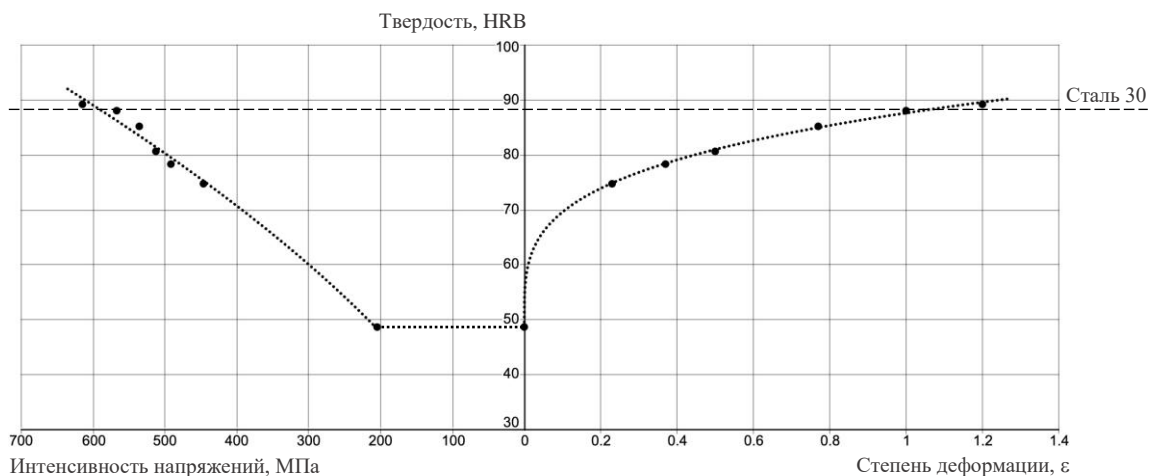


Рисунок 4.7 – Тарировочный график зависимости твердости HRB от деформации и напряжения для стали 10

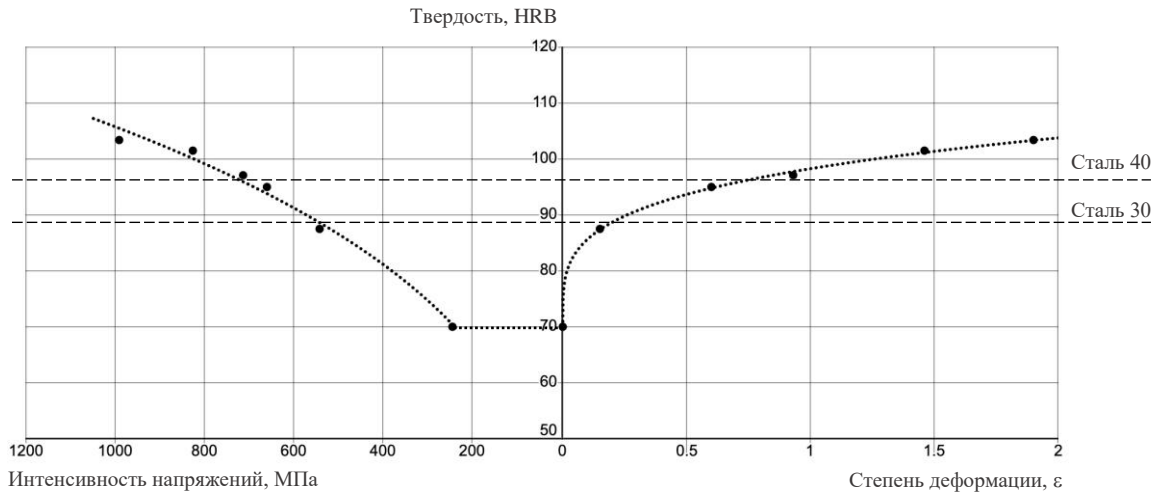


Рисунок 4.8 – Тарировочный график зависимости твердости HRB от деформации и напряжения для стали 20

После выполнения аппроксимации получена зависимость твёрдости (HRB) от деформации и напряжения, представленная в следующем виде:

$$\text{Сталь 10: } HRB = f_1(\varepsilon) = 48,65 + 39,02 \cdot \varepsilon^{0,27} \quad (R^2=0,9996) \quad (4.1)$$

$$\text{и } HRB = g_1(\sigma) = 2,37 \cdot \sigma^{0,57} \quad (R^2=0,978); \quad (4.2)$$

$$\text{Сталь 20: } HRB = f_2(\varepsilon) = 69,91 + 28,27 \cdot \varepsilon^{0,26} \quad (R^2=0,999) \quad (4.3)$$

$$\text{и } HRB = g_2(\sigma) = 14,33 \cdot \sigma^{0,29} \quad (R^2=0,984). \quad (4.4)$$

На рисунках 4.7 и 4.8 представлены тарировочных графиков зависимости твердости HRB от деформации и напряжения для стали 10 и 20. При небольших деформациях (до 20-30%) твердость металла интенсивно растет, после 60% деформации твердость меняется незначительно. Объясняется это уменьшением упрочняемости металлов с возрастанием деформации.

По графикам сравнения значений твердости в зависимости от величины деформации (рисунки 4.7 и 4.8) видно, что после осадки образцов при степени деформации около 1,0 значения твёрдости для стали 10 достигают 88 HRB, а при деформации 0,8 — значения твёрдости для стали 20 составляют 97 HRB. Эти показатели соответствуют твёрдости недеформированных сталей 30 и 40, поставляемых с металлургических предприятий. Таким образом, детали, полученные методом холодной объёмной штамповки из сталей 10 и 20, после

формообразования упрочняются и по своим механическим свойствам соответствуют сталям 30 или 40.

При значениях напряжений, меньших предела текучести материала – 205 МПа для стали 10 и 245 МПа для стали 20 – наблюдается постоянство твердости. Это связано с тем, что при данных уровнях напряжений в материале отсутствуют пластические деформации, и реализуется только упругая область деформирования. В результате не происходит упрочнения. Лишь после достижения предела текучести материал переходит в стадию пластического течения, что сопровождается ростом твердости вследствие деформационного упрочнения.

Построенные графики позволяют при разработке технологического процесса холодной объемной штамповки деталей по величине деформации при формообразовании определять соответствующее значение твердости (величина деформации – твердость).

При значении накопленной деформации при формообразовании детали по величине твердости стали в соответствии с чертежом изделия это даёт возможность обоснованной замены металла для штамповки деталей. В таблице 4.2 представлены данные о нормированной твердости сталей с содержанием углерода $0,3 \div 0,45\%$.

Таблица 4.2 – Значение твердости сталей с содержанием углерода $0,3 \div 0,45\%$

Марка стали	Сталь 30	Сталь 35	Сталь 40	Сталь 45
Твердость, HRB	< 88.4	< 95	< 96.5	< 98

4.2 Влияние однородности определения деформации при построении тарировочного графика

Исследовалось влияние однородности при определении деформации, когда происходит построение тарировочного графика зависимости твердости от интенсивности напряжений и величины деформации при одноосном сжатие образца. При процессе формоизменения при испытании образцов на одноосное сжатие при построении тарировочного графика определялись локальные явления, в том числе однородность определения деформации и изменение твердости по

полю течения. Исследовано и установлено влияние однородности определения величины деформации по результатам замеров диаметра на точность построения тарировочного графика при одноосном сжатии по результатам определения деформации и твердости на торцевой поверхности и на разрезе вдоль оси осаживаемого образца металла.

Для проведения экспериментов и исследования была выбрана сталь 10. В таблице 4.3 приведены величины измерений диаметров в осаживаемом образце как по схеме на чертеже (рисунок 4.9) и приведены данные расчетов величин деформации в каждом образце в процессе формообразования.

Таблица 4.3 – Величины измерений диаметров и деформации при осадке образцов

№	d_1 , мм	d_2 , мм	ε_1	ε_2
1	25	25	0	0
2	27.1	28	0.16	0.23
3	28.8	30.1	0.28	0.37
4	30	32.1	0.36	0.5
5	34.8	36.8	0.66	0.77
6	39.2	41.3	0.90	1.0
7	42.8	45.5	1.08	1.2

Для определения величины деформации в образце при осадке использовались следующие формулы [41]:

$$\varepsilon_{i1} = 2 \ln \frac{d_0}{d_1}, \quad \varepsilon_{i2} = 2 \ln \frac{d_0}{d_2}$$

где ε_i – интенсивность деформации;

d_1 – наименьший диаметр образцов после осадки;

d_2 – наименьший диаметр образцов после осадки;

Диаметр d_2 является диаметром центрального сечения образца вдоль оси симметрии. Для определения твердости внутренних частей образца, особенно в центральном сечении, образцы были разрезаны вдоль оси (рисунок 4.10). На рисунке 4.11 представлены разрезные образцы вдоль оси для исследования.

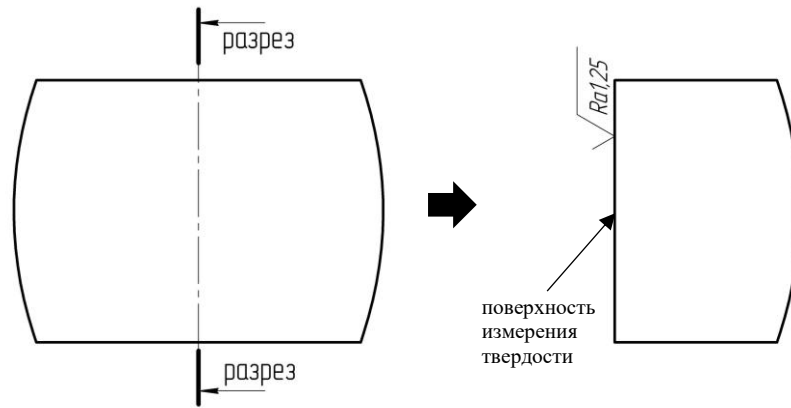


Рисунок 4.10 – Чертеж разрезных образцов для измерения твердости на поверхности разреза вдоль оси

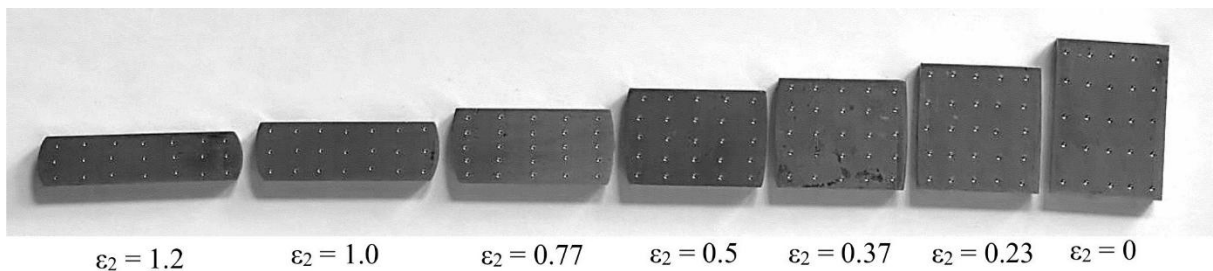


Рисунок 4.11 – Измерение твердости на поверхности на разрезе вдоль оси осаживаемых образцов

Замеры твёрдости проводилось на приборе тип Роквелл мод. TP-5006 по шкале В ГОСТ 9013-59. Шероховатость поверхности образцов Ra1,25 по ГОСТ 2789-73. Экспериментальные замеры величин твердости на поверхности разреза вдоль оси в различных местах образцов и результаты в зависимости от величины осадки и величины деформации приведены на рисунке 4.12.

На рисунке 4.13 представлены значения измерений твердости на торцевой поверхности и по центральному сечению образцов вдоль оси симметрии (на поверхности разреза) в зависимости от расстояния от центра к периферии по сечению по оси симметрии при осадке цилиндрических образцов.

На рисунок 4.14 представлены графики твердости в зависимости от величины деформации и расстояния от центра к периферии по сечению по оси симметрии при измерении

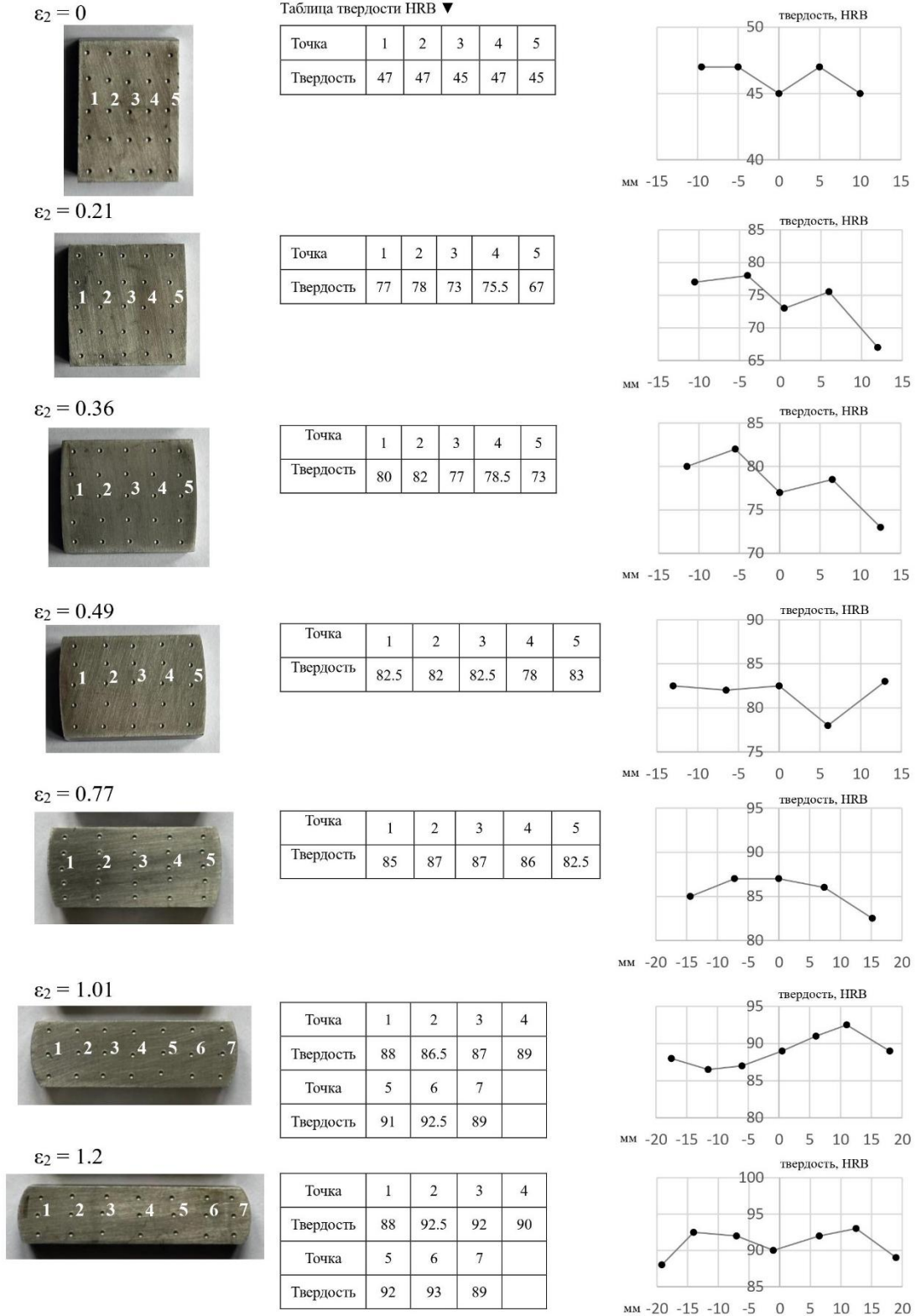


Рисунок 4.12 – Экспериментальные данные на поверхности
разреза вдоль оси в различных местах образцов

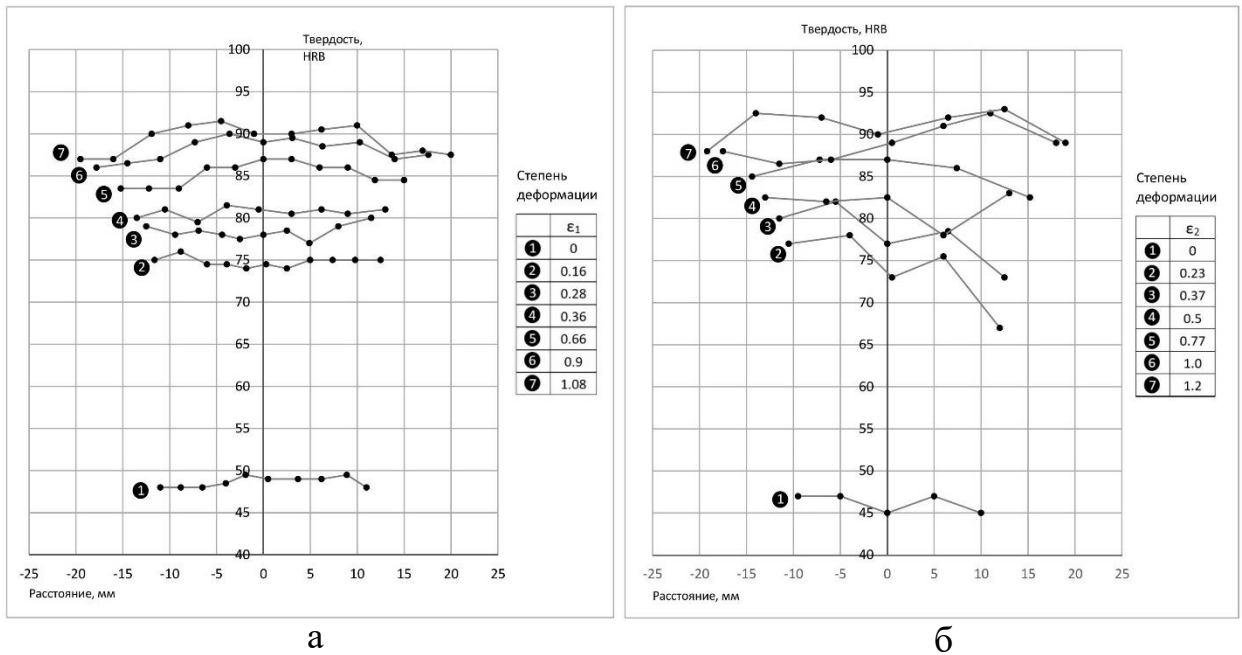


Рисунок 4.13 – Графики измерений твердости на торцевой поверхности (а) и на разрезе вдоль оси (б) образцов в зависимости от величины осадки и величины деформации

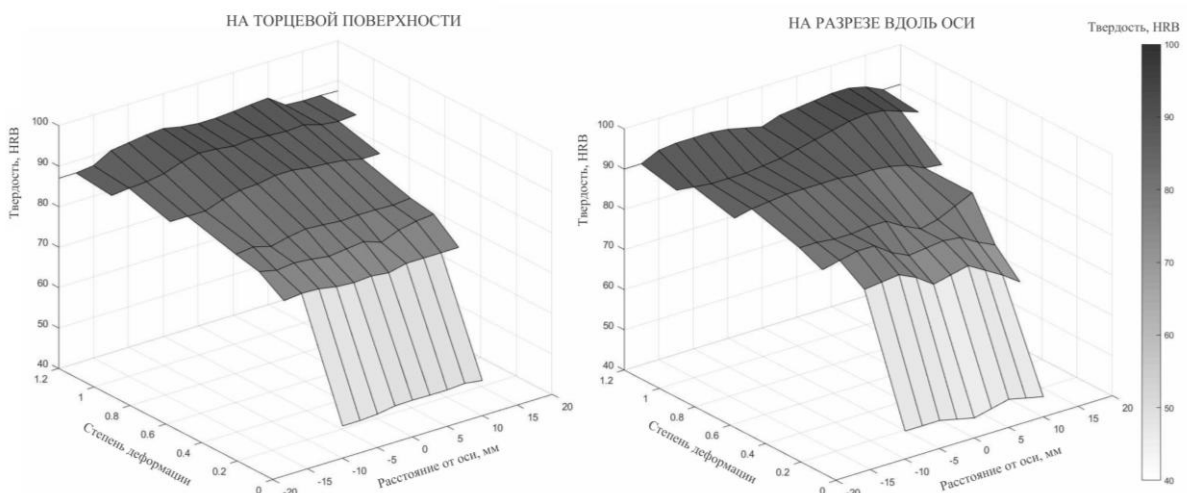


Рисунок 4.14 – Графики «Твердость-степень-расстояние» при измерении твердости на торцевой поверхности и на разрезе вдоль оси образцов из стали 10

На рисунке 4.15 представлен график характера изменения величины твердости в зависимости от деформации и напряжения при осадке цилиндрических образцов.

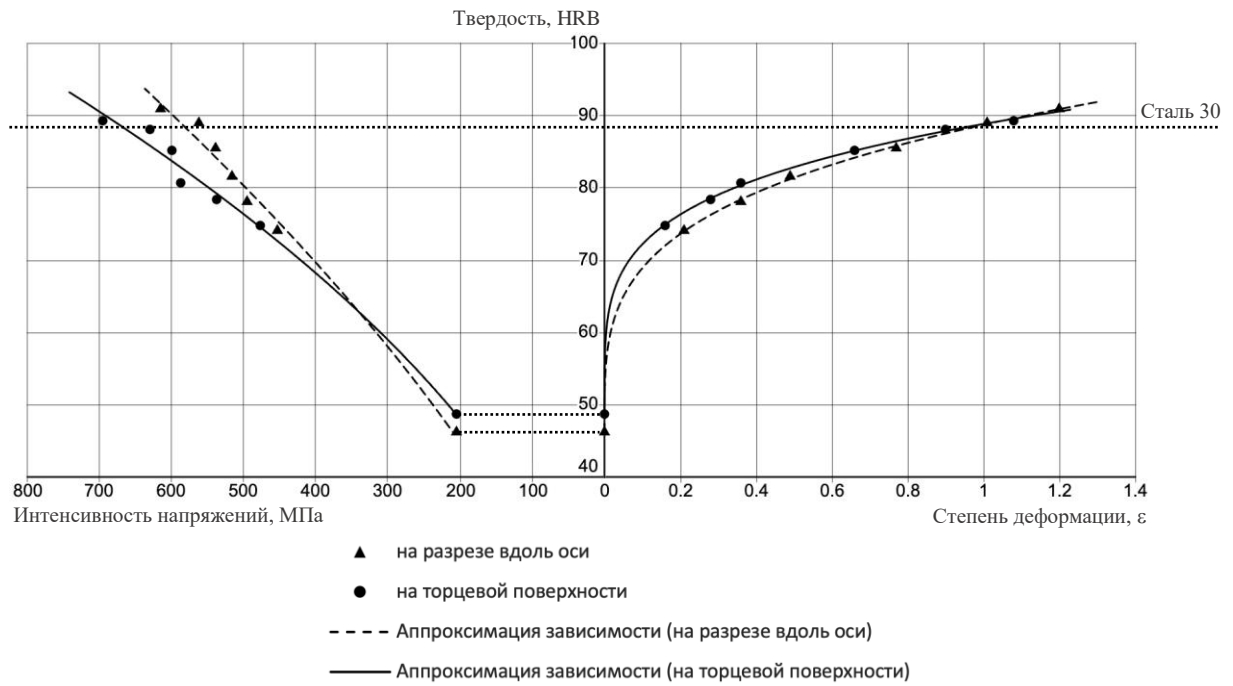


Рисунок 4.15 – Зависимость величины твердости от деформации и напряжения при осадке цилиндрического образца из стали 10

4.3 Точности измерения твердости в зависимости от величины деформации при осадке цилиндрического образца

Для оценки точности измерения твердости в зависимости от степени деформации при осадке цилиндрического образца необходимо провести статистический анализ полученных значений твердости. Наиболее подходящим методом является расчет среднеквадратического отклонения, которое характеризует степень разброса экспериментальных данных относительно среднего значения. Данный метод позволяет количественно определить вариации твердости, обусловленные неоднородностью пластической деформации, неоднородностью структуры материала и возможными погрешностями измерений.

$$D(x) = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n},$$

$$\delta = \sqrt{D},$$

где x_i – значение твёрдости, полученное при i -м измерении;

\bar{x} – среднее арифметическое всех измерений твёрдости;

n – количество измерений;

$D(x)$ – дисперсия значений твёрдости;

δ – среднеквадратическое отклонение значений твёрдости, характеризующее разброс результатов.

Таблица 4.4 – Значения среднеквадратического отклонения при различных величинах деформации

Сталь 10								
Степень деформации		0	0.23	0.37	0.5	0.77	1.0	1.2
На торцевой поверхности	Среднее значение твердости, HRB	48.7	74.8	78.4	80.7	85.2	88.1	89.3
	Среднеквадратическое отклонение	0.59	0.54	0.81	0.58	1.3	1.28	1.64
На разрезе вдоль оси	Среднее значение твердости, HRB	46.4	75.9	79.3	81.6	85.4	89.1	90.8
	Среднеквадратическое отклонение	2.29	2.41	2.24	1.48	2.2	1.54	1.56
Сталь 20								
Степень деформации		0	0.15	0.6	0.93	1.46	1.9	
Среднее значение твердости (на торцевой поверхности), HRB		69.9	87.4	94.9	97.0	101.4	103.3	
Среднеквадратическое отклонение		2.58	2.06	0.65	0.74	0.71	0.57	

На таблице 4.4 представлены значения среднеквадратического отклонения при различных величинах деформации на торцевой поверхности и на поверхности разреза вдоль оси образцов из сталей 10 и 20.

На рисунках 4.16 и 4.17 представлены поле распределения значений при измерении твердости образцов из сталей 10 и 20.

При осадке цилиндрических образцов неравномерное распределение напряжений и деформаций приводит к различиям в значениях твердости на различных участках образца. Торцевая поверхность испытывает в основном осевое сжатие и незначительное растяжение в радиальном направлении, что способствует более равномерному упрочнению материала. В центральном сечении вдоль оси симметрии наблюдается сложное напряженно-деформированное состояние, связанное с градиентом пластической деформации, что приводит к более значительным колебаниям твердости. Кроме того, в центральных областях

возможно образование неоднородностей, вызванных дифференциальным течением материала и его термомеханическим изменением. Это объясняет, почему значения твердости на торцевой поверхности отклоняются в меньшей степени по сравнению с центральным сечением.

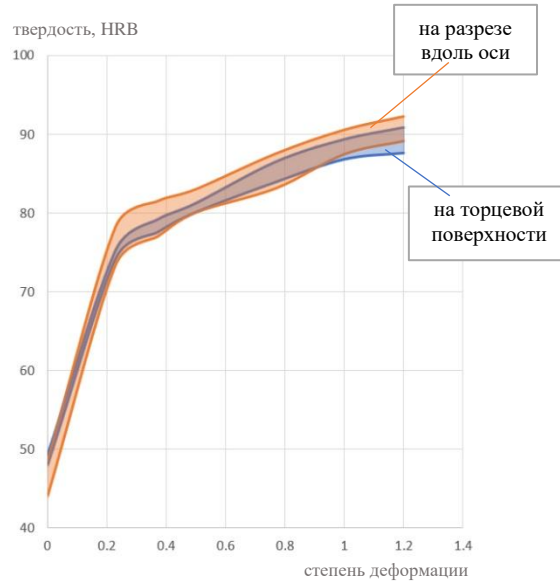


Рисунок 4.16 – Поле распределения значений при измерении твердости на поверхности и на разрезе вдоль оси образцов из стали 10

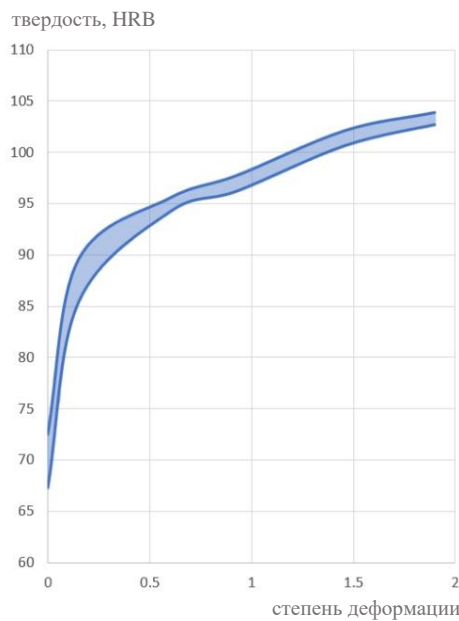


Рисунок 4.17 – Поле распределения значений при измерении твердости на поверхности образцов из стали 20

4.4 Применение полученной зависимости твёрдости в программных комплексах моделирования

Полученные тарировочные зависимости твёрдости от степени деформации для сталей 10 и 20, выраженные формулами (4.1) и (4.3), были интегрированы в пользовательскую подпрограмму программного комплекса QForm. Данная подпрограмма позволяет в ходе моделирования отображать поле распределения твёрдости в объёме деформируемой заготовки на основе текущих значений интенсивности деформации, тем самым обеспечивая наглядное представление процессов упрочнения материала при холодной объёмной штамповке.

Помимо использования встроенных средств QForm, разработано дополнительное приложение в среде Matlab, позволяющее автоматически считывать результаты расчётов из файлов формата .csv, экспортируемых QForm, и визуализировать распределение твёрдости на поверхности и в объёме деформированной детали. Такой подход обеспечивает независимую проверку корректности реализации подпрограммы и даёт расширенные возможности анализа полученных данных.

Практическое применение разработанной методики расчёта и отображения твёрдости будет продемонстрировано в главе 5, где она используется при разработке технологического процесса комбинированного выдавливания сложного составного изделия типа «ступица» диска сцепления автомобиля. Реализация поля твёрдости позволяет оценить однородность упрочнения, потенциальные зоны концентрации напряжений и влияние режимов деформирования на конечные механические свойства детали.

Для реализации пользовательской зависимости твёрдости материала в программном комплексе QForm была разработана подпрограмма на языке Lua, позволяющая вычислять значение твёрдости по формуле

$$HRB = A + B \cdot \varepsilon^C$$

где ε – накопленная пластическая деформация, а A , B , C – параметры модели упрочнения.

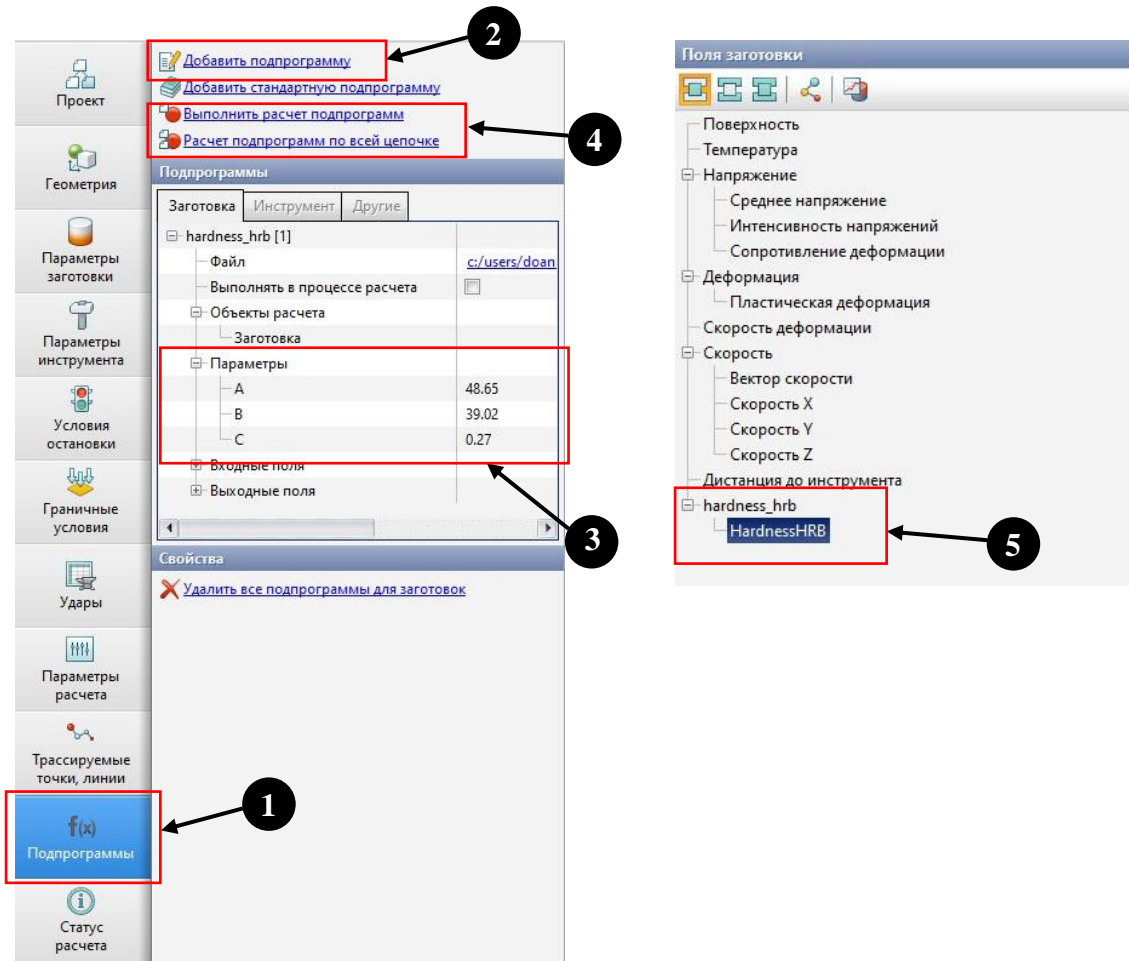


Рисунок 4.18 – Алгоритм подключения и выполнения подпрограммы в QForm

Алгоритм подключения и выполнения подпрограммы включает следующие этапы (рисунок 4.18):

1. Выбрать пункт «Подпрограмма» на панели инструментов;
2. Нажать «Добавить подпрограмму» и загрузить Lua-файл;
3. Указать параметры модели упрочнения A , B , C ;
4. Выполнить расчёт подпрограммы.
5. В окне результатов выбрать поле HardnessHRB для отображения распределения твёрдости.

4.5 Выводы по главе 4

1. По результатам измерения твердости и обработки экспериментальных данных установлены зависимости твердости от степени деформации и интенсивности напряжений для сталей 10 и 20. Полученные тарировочные графики показывают, что в процессе пластического деформирования исследуемые материалы упрочняются, а достигнутый уровень твердости может быть сопоставим с более прочными сталями 30 и 40.

2. Сравнение результатов измерения твердости на торцевой поверхности и на продольном разрезе осаживаемого образца показало, что неоднородность распределения деформации влияет на точность построения тарировочных зависимостей. Установлено, что торцевая поверхность испытывает преимущественно осевое сжатие и лишь незначительное радиальное растяжение, что обеспечивает более равномерное упрочнение материала и позволяет использовать результаты измерений твердости на торце для построения тарировочных графиков с достаточной точностью.

3. Полученные зависимости твердости от степени деформации и интенсивности напряжений позволяют оценивать степень упрочнения сталей 10 и 20 после пластического деформирования и прогнозировать распределение механических свойств в объеме деталей сложной формы. Реализация этих зависимостей в пользовательской подпрограмме QForm создает основу для анализа распределения твердости при моделировании процесса получения сложного составного изделия типа «ступица» диска сцепления автомобиля.

ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ СЛОЖНОГО СОСТАВНОГО ИЗДЕЛИЯ ТИПА «СТУПИЦА» ДИСКА СЦЕПЛЕНИЯ АВТОМОБИЛЯ МЕТОДОМ КОМБИНИРОВАННОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ

Производство деталей типа «ступица» диска сцепления автомобиля в настоящее время осуществляется на предприятии конструктивно сложном и трудоемком в наладке, обслуживании и ремонте оборудовании с использованием устаревших технологий, с большими энергозатратами и высоким отходом металла. Холодная объемная штамповка занимает значительную производственную площадь.

Изготовление деталей методом холодной штамповки в настоящее время очень распространено. В частности, завод «ТРИЯЛ-ДИСК» изучает технологический процесс изготовления сложного составного изделия «ступица» диска сцепления автомобиля путём совмещённого формообразования двух заготовок различного материала методом холодной объемной штамповки.

5.1 Анализ базовой технологии производства изделия «ступица»

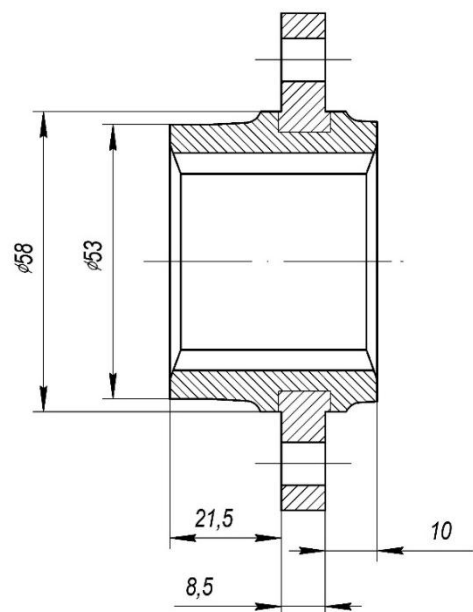


Рисунок 5.1 – Эскиз детали «ступица» диска сцепления автомобиля

На рисунке 5.1 представлен эскиз изучаемой детали «ступица» диска сцепления автомобиля.

На ООО «Триял-Диск» производство данной детали осуществляется по совмещённому формообразованию холодным выдавливанием двух компонентов из различных материалов.

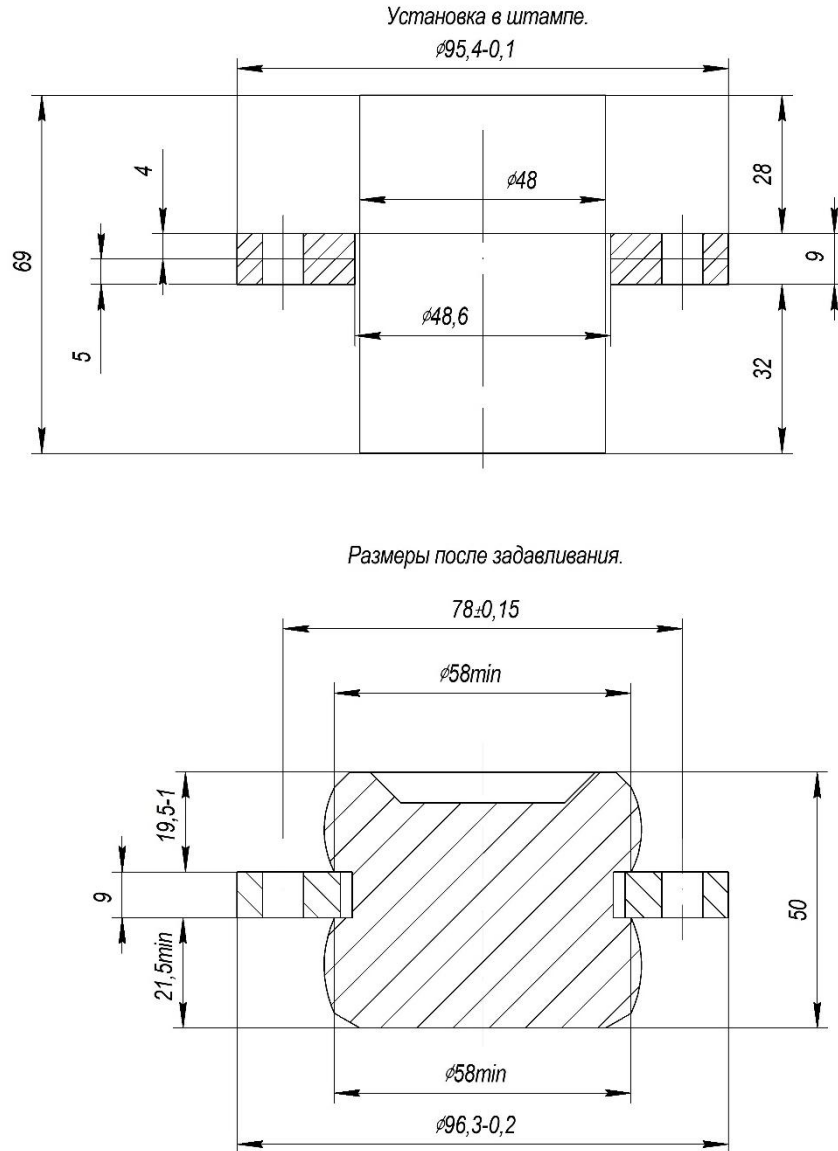


Рисунок 5.2 – Геометрическая модель и схема с размерами при установке и после задавливания

В совмещённое формообразование входит 2 заготовки – охватываемая деталь (бобышка) и охватывающая деталь (фланец). Геометрическая модель и схема с размерами при установке и после задавливания показаны на рисунке 5.2.

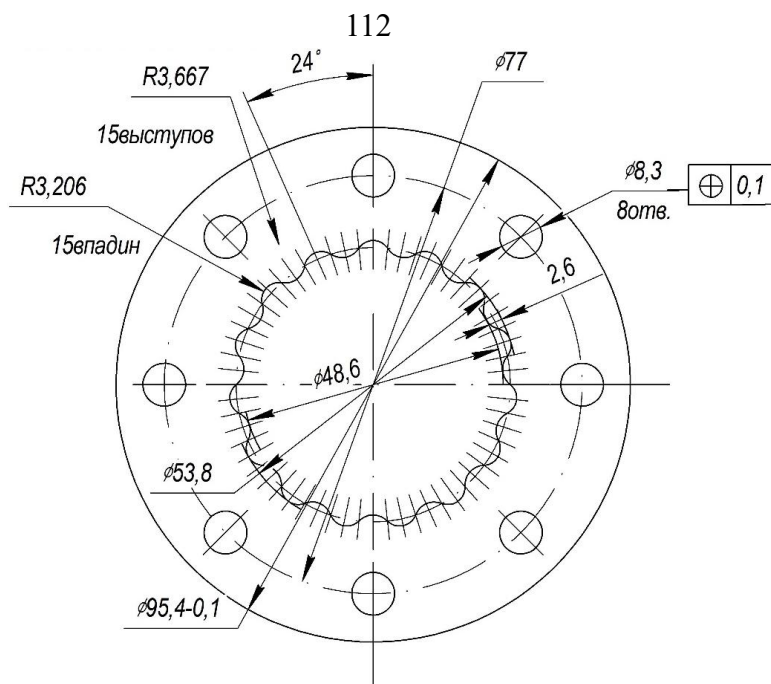


Рисунок 5.3 – Геометрическая модель и схема с размерами фланца

Геометрическая модель и схема фланца с размерами показаны на рисунке 5.3. Фланец имеет профильное центральное отверстие. Профильное отверстие состоит из 15 выступов 15 впадин. Фланец вырубается в штампе.

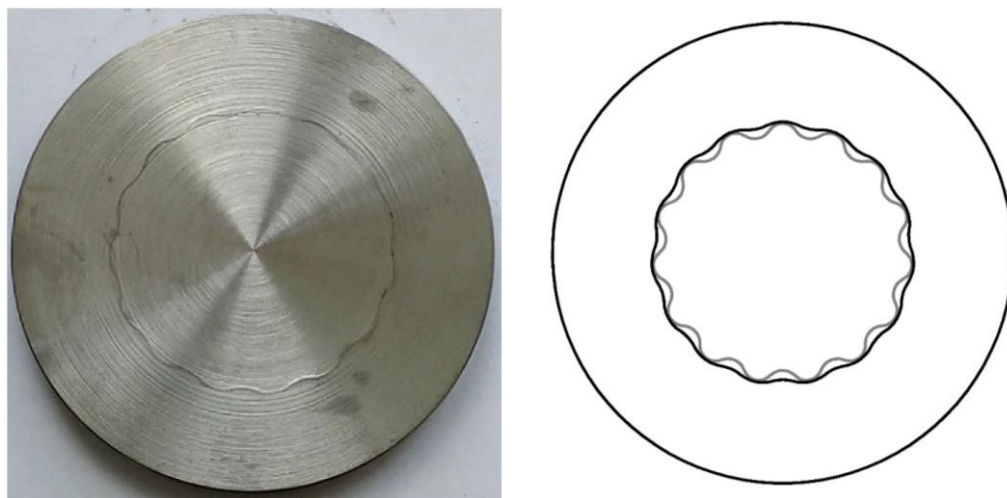


Рисунок 5.4 – Изменение профиля «волновой» фланца до (серая) и после (черная линия) соединения с бобышкой

На рисунке 5.4 представлено изменение профиля «волновой» фланца до и после задавливания с бобышкой. Профиль фланца сильно деформируется, почти принимая круглую форму. После деформации размер ограничивающего диаметра выступа увеличился с 48,6 мм до 52,0 мм, размер ограничивающего диаметра

впадины – с 53,8 мм до 54,4 мм. Таким образом, выступ сдвинулся на 1,7 мм в радиальном направлении от центра профильного отверстия, а впадина – на 0,6 мм.

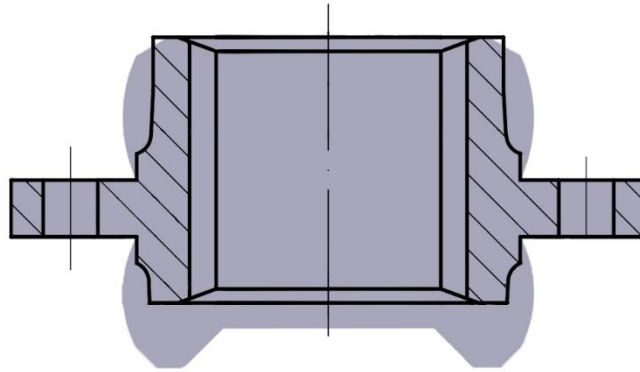


Рисунок 5.5 – Сравнение готовой детали «ступица» с изделием, полученным по базовой технологии на заводе ТРИАЛ-ДИСК

На рисунке 5.5 представлено сравнение готовой детали «ступица» с изделием, полученным по базовой технологии на заводе ТРИАЛ-ДИСК.

Базовый процесс изготовления заключался в следующем: заготовку формировали путём холодного выдавливания бобышки из стали 20 вместе с фланцем из стали 40. Далее выполнялась механическая обработка, которая обеспечивала получение требуемых размеров и чистоты поверхности изделия «ступица».

Данная технология имела ряд недостатков:

- низкий КИМ (35%);
- ненадежность при больших крутящих моментах.

5.2 Разработка методики получения сложного составного изделия типа «ступица» диска сцепления автомобиля

В рамках диссертационной работы разработана поэтапная методика получения сложного составного изделия типа «ступица» диска сцепления автомобиля методом холодной объёмной штамповки. Разработанная методика основана на последовательном использовании результатов теоретических,

экспериментальных и численных исследований, выполненных в главах 2–4. Алгоритм методики включает следующие этапы:

1) Формирование технологической схемы процесса. На первом этапе разрабатывается принципиальная схема формообразования сложного составного изделия типа «ступица» с учётом конструктивных особенностей детали и функциональных требований к её работе. На данном этапе определяется последовательность операций технологического процесса, направленных на обеспечение требуемой формы изделия при комбинированном выдавливании;

2) Определение геометрических параметров заготовок, инструмента и разработка штамповой оснастки. Исходя из эскиза готовой детали и принятой технологической схемы, выполняется определение геометрических параметров заготовок, а также основных элементов инструмента (матрицы, пуансона, опорных элементов) для расчета сил деформирования по разработанной математической модели. Одновременно разрабатывается конструкция штамповой оснастки, обеспечивающая реализацию процесса комбинированного выдавливания;

3) Обоснованный выбор материала заготовок. Выбор материала заготовок осуществляется на основе расчётов силы деформирования с использованием математической модели, разработанной во второй главе, а также с учётом производственных ограничений. Дополнительно учитываются результаты экспериментальных исследований упрочнения материала, представленные в четвёртой главе, позволяющие оценить изменение механических свойств при пластической деформации. Такой подход обеспечивает обоснованный выбор материала, сочетающего достаточную пластичность и требуемый уровень упрочнения после штамповки;

4) Численное моделирование процесса. На данном этапе выполняется моделирование разработанного технологического процесса в программном комплексе QForm. В ходе моделирования анализируются характер течения материала, величины силы деформирования, распределение интенсивности деформации и формирование неразъёмного соединения бобышки с фланцем. Для оценки процессов упрочнения используется пользовательская подпрограмма,

реализующая экспериментально установленную зависимость твёрдости от степени деформации;

5) Анализ и оценка результатов. Заключительный этап включает анализ результатов численного моделирования и их сопоставление с расчётными данными, полученными с использованием математической модели. Оценивается соответствие силы деформирования возможностям применяемого оборудования, качество формообразования изделия, а также распределение механических свойств в объёме формируемой заготовки. На основании полученных данных делается вывод о реализуемости и эффективности предлагаемой технологии получения сложного составного изделия типа «ступица».

Этап 1 – Формирование технологической схемы процесса.

Новый технологический процесс должен устранить недостатки, характерные для базовой технологии производства. Изделия «ступица», изготовленные по базовой технологии, оказались неподходящими для эксплуатации в условиях значительных крутящих моментов. Основной причиной этого является интенсивная деформация волнового профильного отверстия фланца в процессе выдавливания, что приводит к изменению исходной геометрии и нарушению равномерности распределения напряжений в зоне сопряжения.

Поэтому при разработке новой технологической схемы холодного выдавливания особое внимание уделено анализу деформационных процессов в области профильного отверстия фланца. Применяемый метод обязан минимизировать деформирование отверстия фланца, обеспечивая при этом надежные прочностные характеристики изделия при передаче высоких крутящих моментов.

Разработан технологический процесс холодного комбинированного выдавливания, направленный на совершенствование формообразования сложного составного изделия типа «ступица» диска сцепления. Процесс состоит из двух этапов и позволяет получить цельную конструкцию из двух заготовок различного материала за счёт комбинированного выдавливания бобышки с последующим

формированием неразъемного соединения с фланцем, имеющим профильное отверстие типа «прямоугольные зубья»:

- Первый этап – Выдавливание верхней части бобышки и формирование нижней части в соответствии с зубчатым профилем отверстия фланца;

- Второй этап – Совмещение фланца с бобышкой по зубчатому профилю и окончательное выдавливание, обеспечивающее неразъемное соединение двух деталей.

- При этом каждый этап включает две операции: первая операция – осадка, вторая – комбинированное выдавливание, обеспечивающее формирование стенок и снижение силы деформирования.

Этап 2 – Определение геометрических параметров заготовок, инструмента и разработка штамповой оснастки.

Новая технология должна уделять особое внимание КИМ, поскольку это является одним из ключевых показателей эффективности производственного процесса. В базовом технологическом процессе этот показатель был низким – 35%, что приводило к значительным потерям сырья.

Для повышения КИМ необходимо тщательно подходить к выбору оптимальной геометрии инструментов. Оптимизация размеров инструментов должна быть направлена на обеспечение максимального соответствия между формой заготовки и конечным изделием. Это также снижает трудоемкость механической обработки, требуемой для получения готового изделия.

На рисунке 5.6 представлены чертежи заготовок технологического процесса для изделия «ступица», включая бобышка и фланец.

Предлагается реализовать технологический процесс изготовления изделия «ступица» с использованием гидравлического пресса. На рисунках 5.7 и 5.8 показан штамп с комплектом для изготовления изделия «ступица». Конструкция штампа выполнена достаточно универсальной: один и тот же блок может использоваться на двух этапах процесса при условии замены основных рабочих элементов. Рабочие чертежи основных деталей штампа приведены в приложении Г.

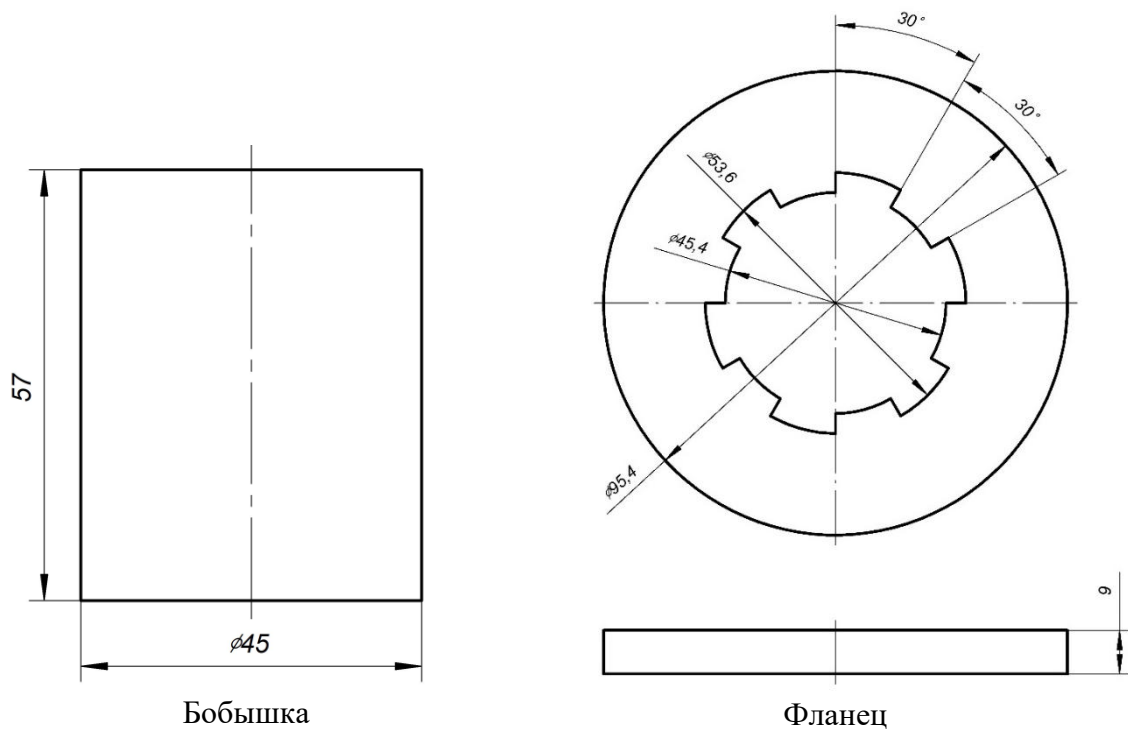


Рисунок 5.6 – Чертежи бобышки и фланца

В верхней части предусмотрено устройство для выталкивания готовой детали (позиция 8). Элементы позиций 5 и 16 выполняют роль пуансонодержателей, фиксируя пуансон в рабочем положении.

Съемник имеет простую и универсальную конструкцию. При замене съемного кольца (позиция 9) можно переналадить это устройство для другой детали.

На верхний выталкиватель (позиция 14) сила передается от пружин, устанавливаемых между прокладкой (позиция 4) и верхней плитой (позиция 1).

Нижний выталкиватель (позиции 12 и 20) соединяется с пружинным устройством или пневмобуфером для выталкивания после разгрузки.

Бандаж (позиция 15) удерживает фланец в фиксированном положении в процессе штамповки.

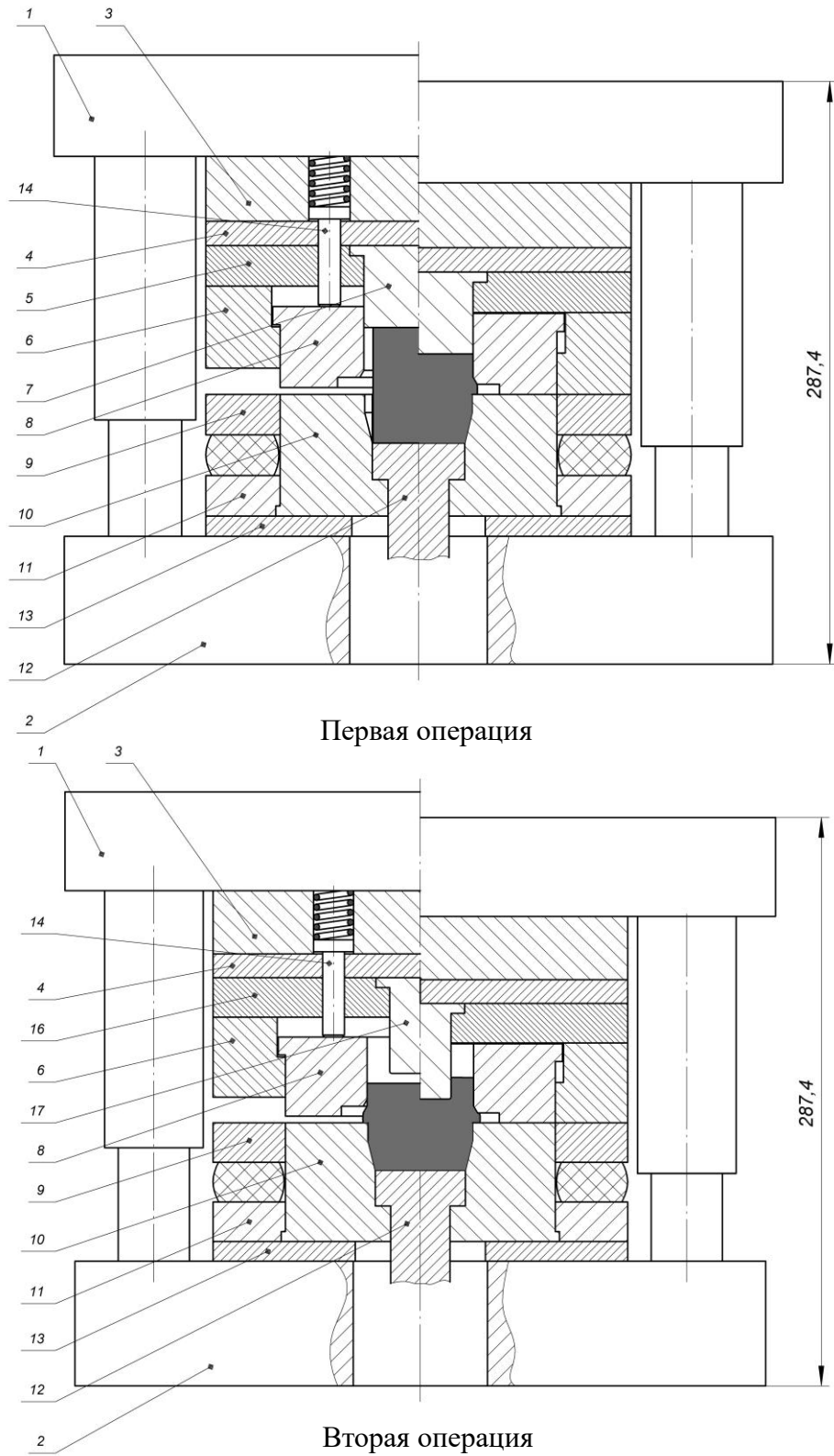


Рисунок 5.7 – Производственные штампы изделия «ступица»
диска сцепления автомобиля на первом этапе

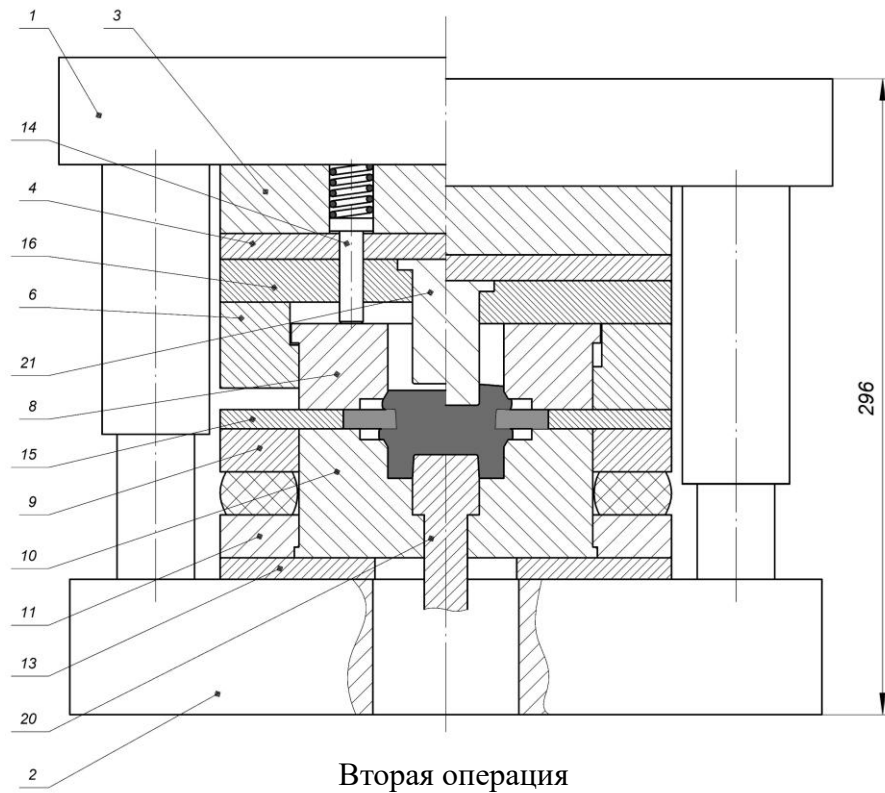
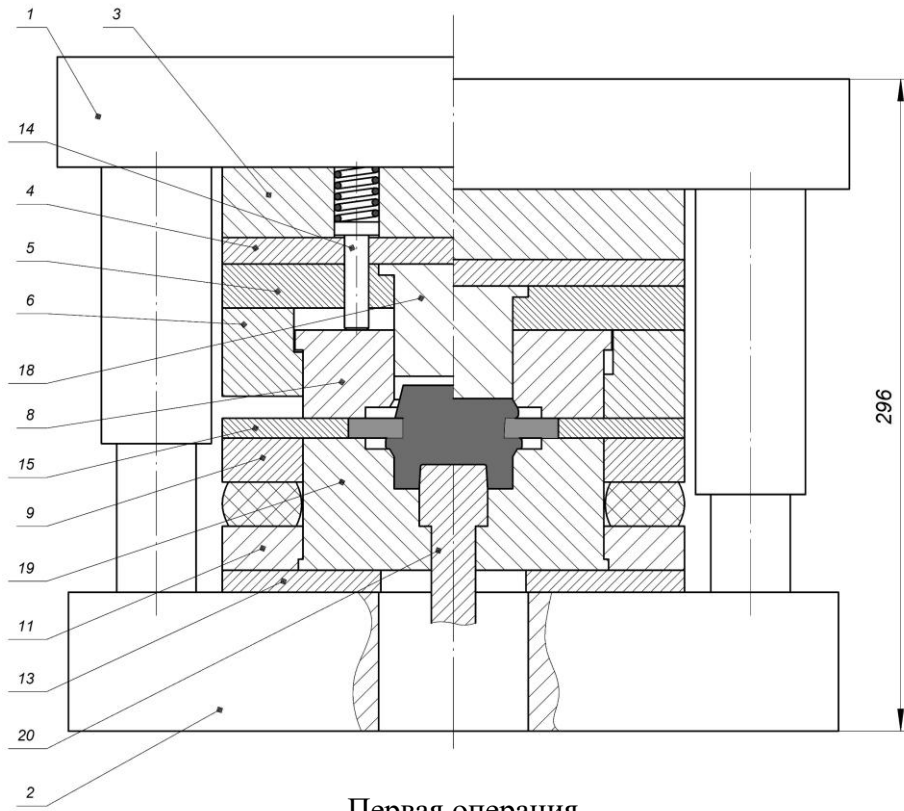


Рисунок 5.8 – Производственные штампы изделия «ступица»
диска сцепления автомобиля на втором этапе

Этап 3 – Обоснованный выбор материала заготовок.

Разработанный технологический процесс ориентирован на реализацию в производственных условиях ООО «ТРИАЛ-ДИСК» (г. Серпухов) с использованием гидравлического прессы усилием 3 МН. В этих условиях математическая модель, разработанная во второй главе, применяется для расчёта силы деформирования и анализа его изменения при варьировании геометрических параметров заготовки и инструмента, а также реологических характеристик материала. Полученные расчётные данные совместно с результатами экспериментальных исследований упрочнения, представленных в четвёртой главе, используются для обоснованного выбора материала бобышки и подтверждения возможности реализации предлагаемого технологического процесса в заданных производственных условиях.

На рисунке 5.9 представлены графики расчётных значений силы деформирования, полученные с использованием разработанной математической модели, для различных этапов процесса комбинированного выдавливания бобышки при применении заготовок из сталей 10, 15, 20 и 22.

Анализ графиков показывает, что при использовании бобышки из стали 10 максимальная расчётная сила деформирования в процессе комбинированного выдавливания не превышает 2,3 МН, что соответствует возможностям гидравлического прессы усилием 3 МН и обеспечивает необходимый технологический запас по силе на случай возможных отклонений реальных условий процесса от расчётных.

Экспериментальные результаты, полученные в главе 4, свидетельствуют о том, что при накопленной деформации $\epsilon > 0,5$ твердость стали 10 превышает 80 HRB, что указывает на выраженное упрочнение материала в процессе холодной пластической деформации. Указанные результаты подтверждают целесообразность применения стали 10 в качестве материала бобышки в рассматриваемом технологическом процессе. Распределение твердости по объёму деформированной заготовки будет дополнительно проанализировано на основе

численного моделирования с использованием пользовательской подпрограммы в программном комплексе QForm.

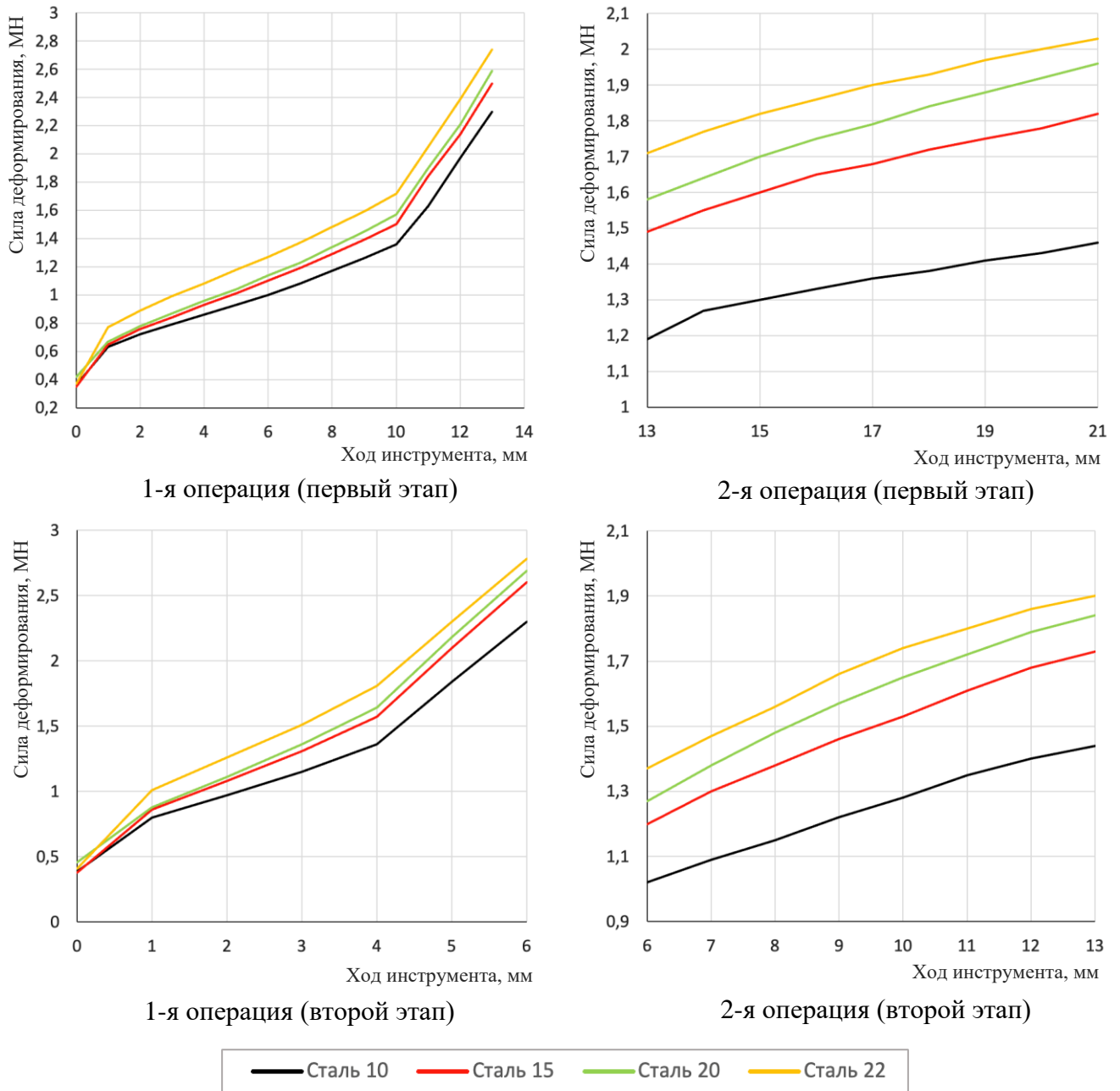


Рисунок 5.9 – Расчётные значения силы деформирования при комбинированном выдавливании бобышки, полученные по математической модели

Таким образом, в качестве материала бобышки выбрана сталь 10, обладающая высокой пластичностью и хорошей деформируемостью, что обеспечивает её эффективное участие в процессе холодной объёмной штамповки и

соответствует ограничениям по силе деформирования, заданным условиями производства.

В качестве материала фланца принята сталь 40, характеризующаяся более высокой прочностью и твердостью. Конструктивно и технологически фланец участвует в формообразовании в минимальной степени, что позволяет сохранить его геометрию и механические свойства и обеспечить надежное неразъемное соединение с бобышкой при комбинированном выдавливании.

Этап 4 – Численное моделирование процесса.

Для изучения особенностей формообразования при изготовлении сложного составного изделия «ступица» методом холодной объемной штамповки применялось конечно-элементное моделирование на ЭВМ. Такой подход позволил рассмотреть процесс в изделиях и проследить их развитие на всех стадиях.

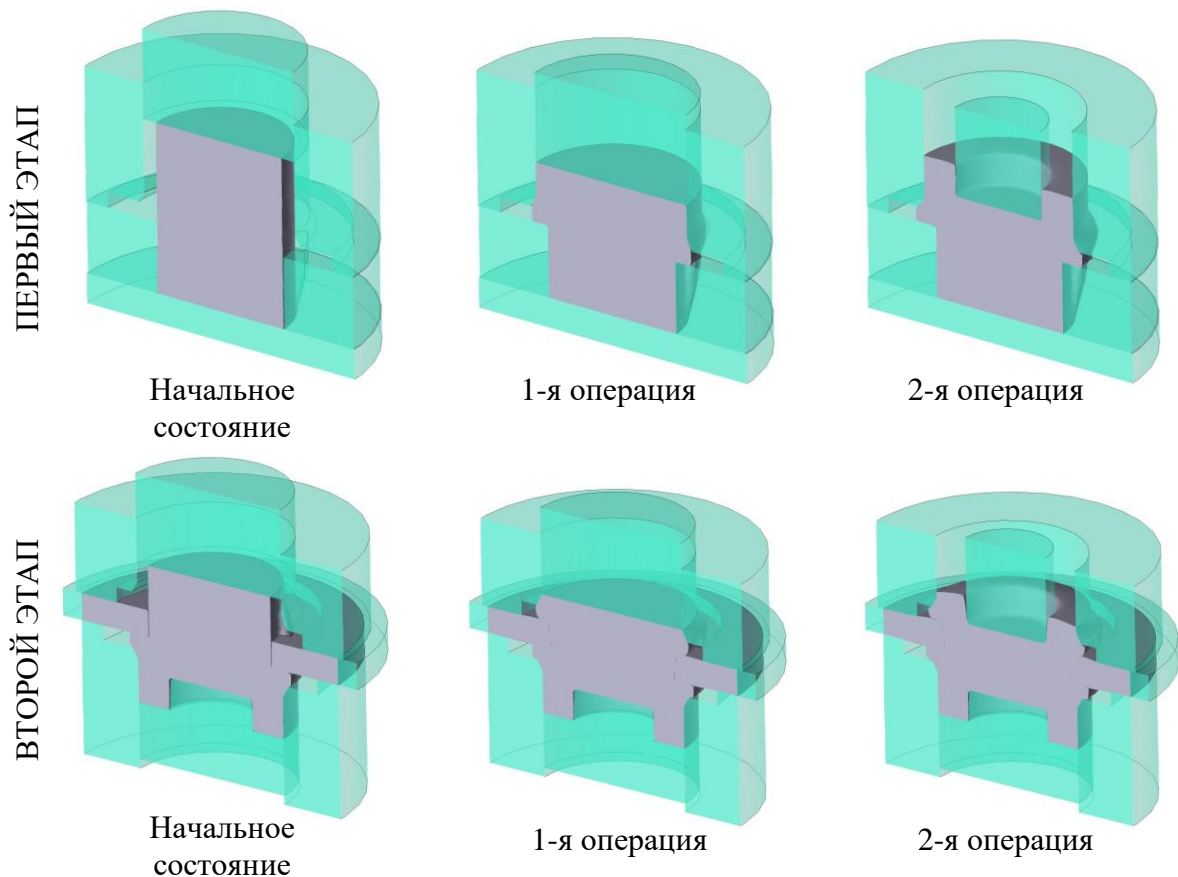


Рисунок 5.10 – Последовательность операций, характеризующих технологический процесс изготовления изделия «ступица»

В работе использовался программный комплекс QForm, обеспечивающий построение картины пластической деформации и оценку параметров

технологического процесса, включая распределение накопленной деформации, изменение предела текучести и силы, необходимые для выдавливания. Применение данного инструмента позволяет существенно сократить затраты времени на экспериментальную проверку и получить достоверные прогнозы ещё до практического этапа.

Этапы моделирования технологического процесса:

1) Первый этап – первая операция (рисунок 5.11)

Исходные данные:

- размеры заготовки (бобышки) соответствуют чертежу, представленному на рисунке 5.6;
- геометрия матриц и пуансона соответствует деталям 7, 8, 10 и 12 на рисунке 5.7;
- модель материала: сталь 10, кривая упрочнения приведена в разделе 3.1;
- температура процесса: 20 °С;
- коэффициент трения: 0,2;
- ход инструмента: 13 мм.

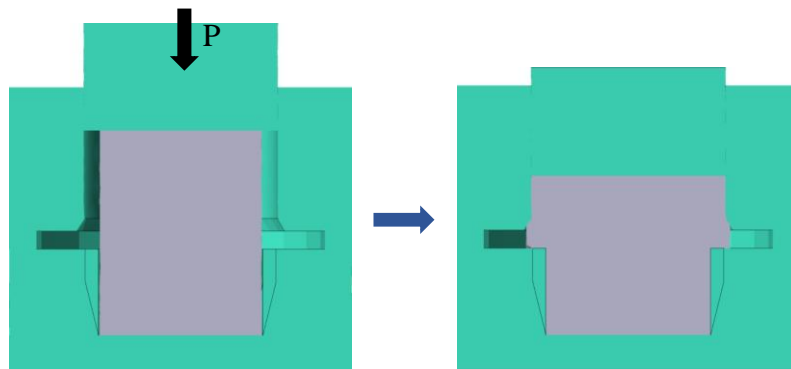


Рисунок 5.11 – Процесс моделирования первой операции первого

2) Первый этап – вторая операция (рисунок 5.12)

Исходные данные:

- геометрия матриц сохраняется прежней; изменён только пуансон (см. соответствующий элемент 17 на рисунке 5.7);
- температура процесса: 20 °С;
- коэффициент трения: 0,2;

- ход инструмента: 8 мм.

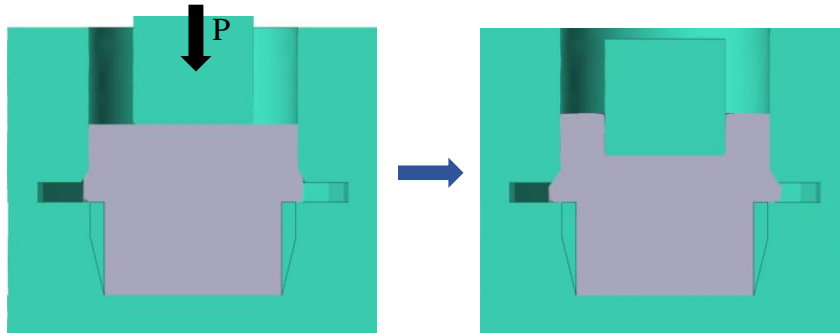


Рисунок 5.12 – Процесс моделирования второй операции первого

3) Второй этап – первая операция (рисунок 5.13)

Исходные данные:

- размеры фланца соответствуют чертежу, представленному на рисунке 5.6;
 - геометрия матриц и пуансона соответствует деталям 18, 8, 15, 19 и 20 на рисунке 5.8;

- модель материала фланца: сталь 40;

- температура процесса: 20 °С;

- коэффициент трения: 0,2;

- ход инструмента: 6 мм.

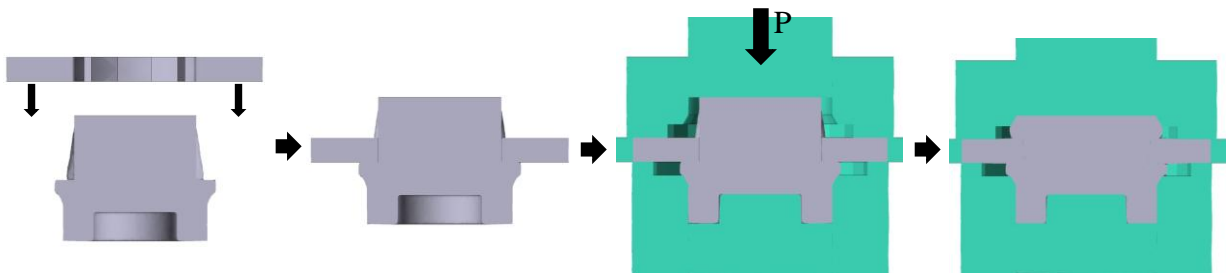


Рисунок 5.13 – Процесс моделирования первой операции второго этапа

4) Второй этап – вторая операция (рисунок 5.14)

Исходные данные:

- геометрия матриц сохраняется прежней; изменён только пуансон (см. соответствующий элемент 21 на рисунке 5.8);

- температура процесса: 20 °С;

- коэффициент трения: 0,2;

- ход инструмента: 7 мм.

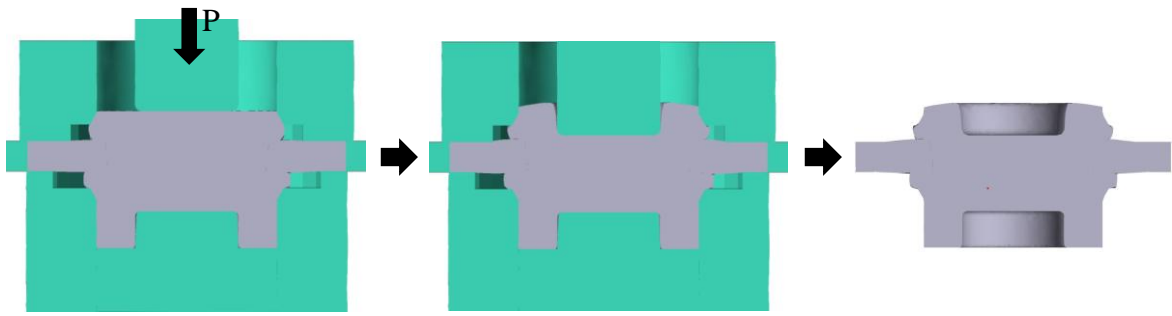


Рисунок 5.14 – Процесс моделирования второй операции второго этапа

Этап 5 – Анализ и оценка результатов.

На рисунках 5.15 и 5.16 представлены поля распределения предела текучести материала и накопленной деформации, полученные в результате моделирования в системе QForm.

В процессе совмещенного формообразования механические свойства бобышки из стали 10 существенно изменяются: вследствие интенсивной пластической деформации металл упрочняется, что подтверждается распределением твердости (рисунок 5.17). Минимальные значения составляют около 80 HRB, тогда как основная часть твердости лежит в диапазоне 85–92 HRB, что соответствует уровню упрочнения сталей более высокого класса прочности.

Полученное поле твердости позволяет оценить степень и равномерность упрочнения заготовки, определить отсутствие локальных зон перегрузки или недоупрочнения и тем самым подтвердить, что заготовка обладает достаточной прочностью и стабильностью структуры для дальнейшего использования в качестве поковки. Это особенно важно, поскольку ступица после штамповки подвергается последующей механической обработке (точению, растачиванию, формированию посадочных поверхностей), и равномерное упрочнение материала обеспечивает минимальные деформации, высокую геометрическую точность и прогнозируемое поведение заготовки при обработке резанием.

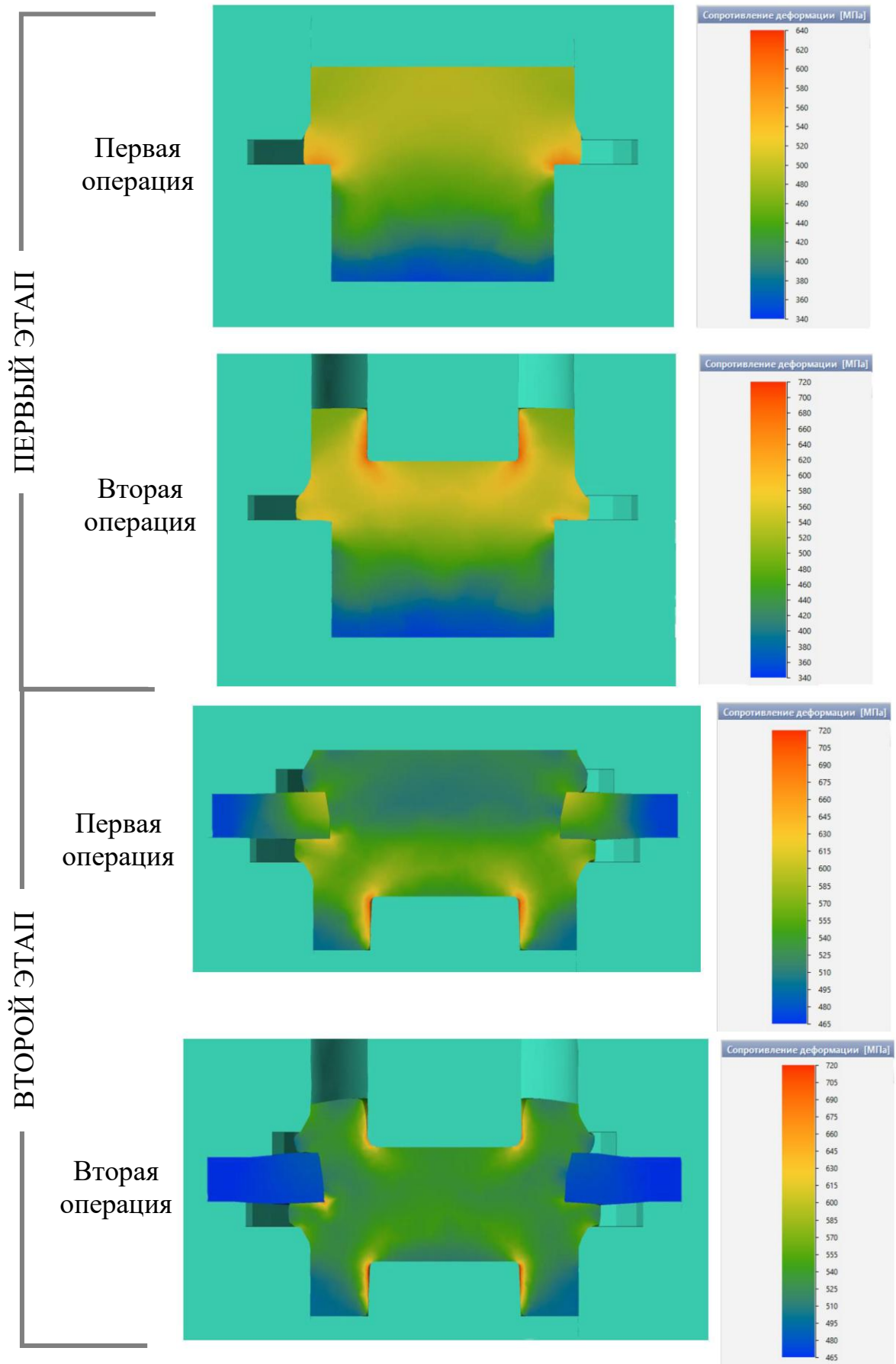


Рисунок 5.15 – Поле распределения предела текучести
в 1-й операции (а) и 2-й операции (б)

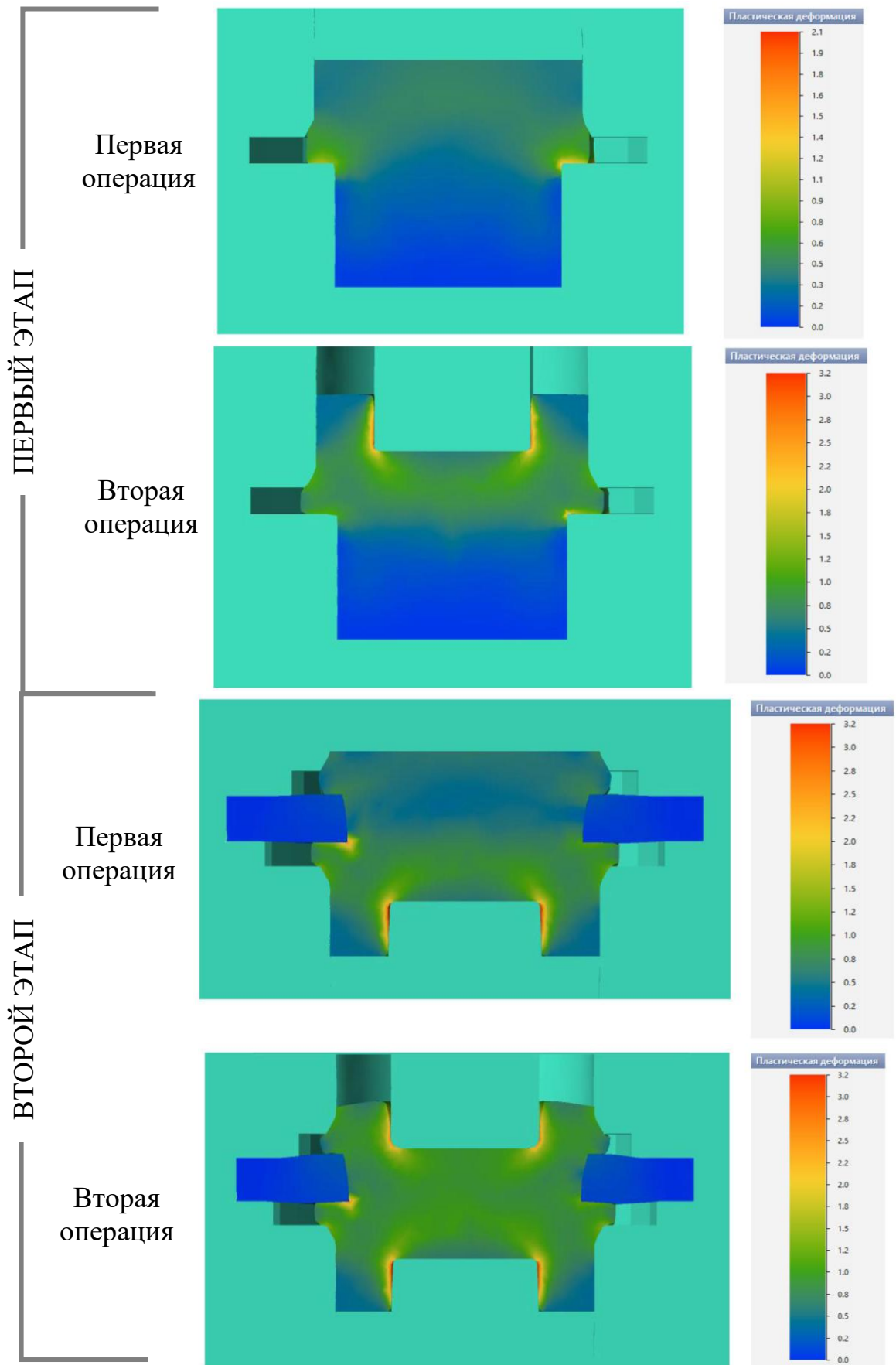


Рисунок 5.16 – Поле распределения накопленной деформации
в 1-й операции (а) и 2-й операции (б)

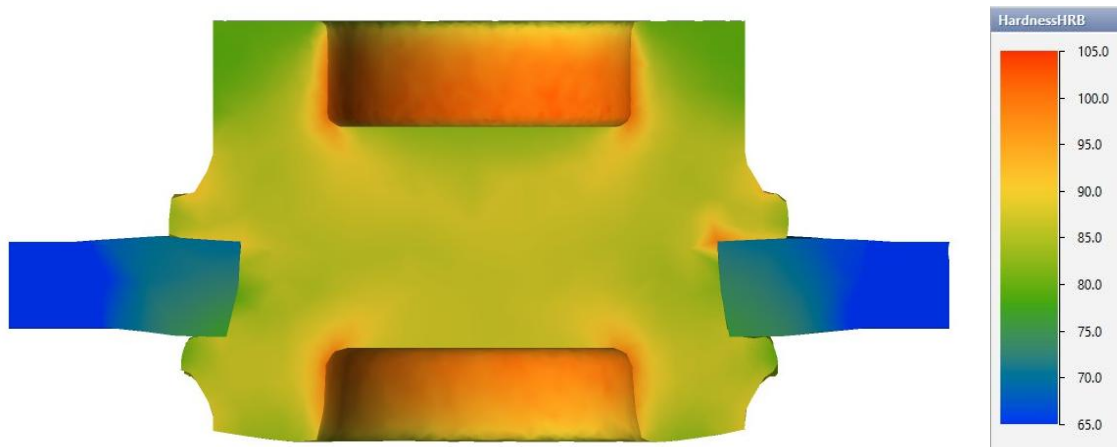


Рисунок 5.17 – Поле распределения твердости бобышки из стали 10

На рисунке 5.18 представлен график изменения силы деформирования, полученный по результатам моделирования технологического процесса в программном комплексе QForm и расчетов по математической модели. Сопоставление данных показывает хорошее совпадение результатов двух методов. Согласно моделированию, максимальная сила деформирования составляет не более 3 МН. Таким образом, с учетом производственных условий применение гидравлического прессы усилием 3 МН является целесообразным и оптимальным для данного процесса.

На рисунке 5.19 представлено изменение профильного отверстия фланца в процессе выдавливания. Видно, что форма отверстия сохраняется, глубина зубьев остается практически неизменной, что обеспечивает стабильность сопряжения с бобышкой и достаточную площадь контакта для надежной передачи крутящего момента без проскальзывания.

На рисунке 5.20 представлено сравнение геометрических размеров готового изделия «ступица» с результатом моделирования в системе конечно-элементного анализа QForm. Коэффициент использования заготовки (КИМ) при применении нового технологического процесса составляет около 56 %.

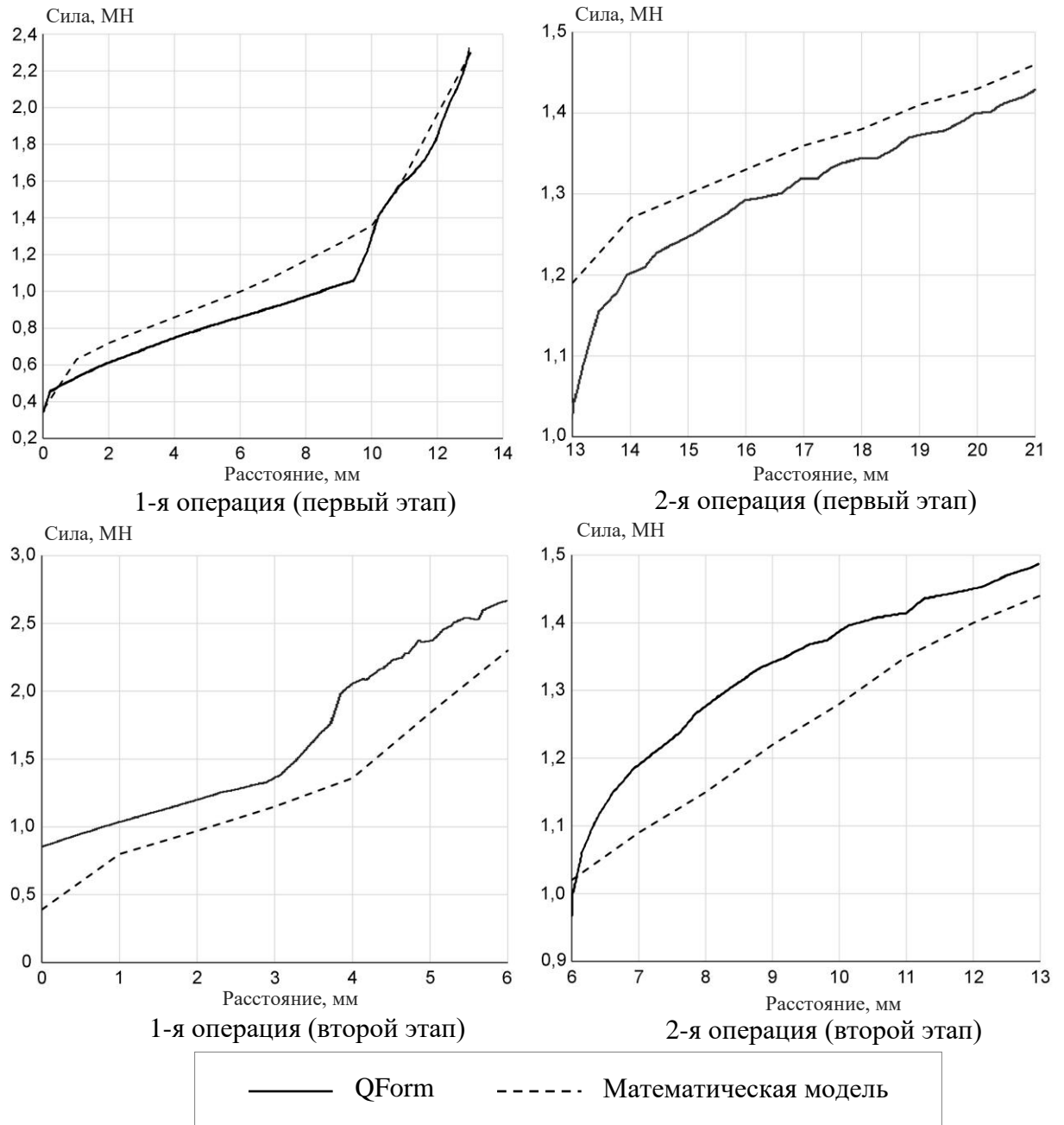


Рисунок 5.18 – График силы для выдавливания в 1-й и 2-й операций

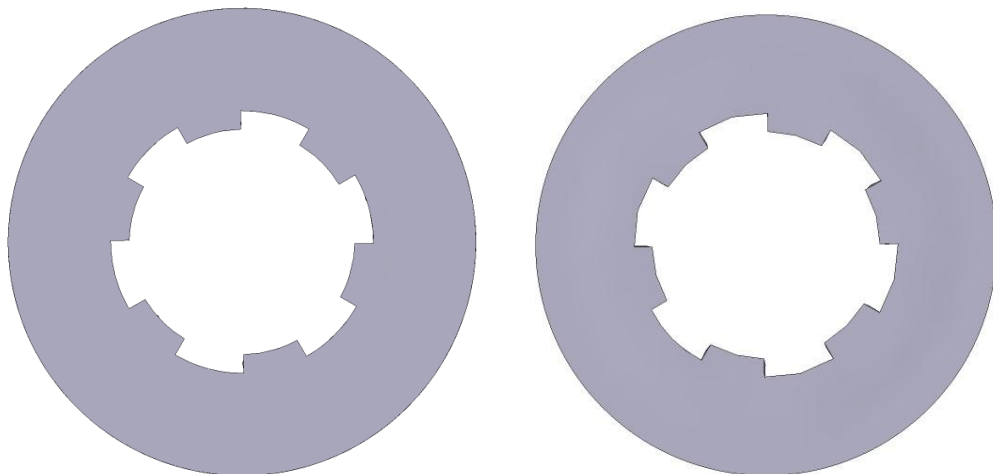


Рисунок 5.19 – Изменение фланца до и после выдавливания

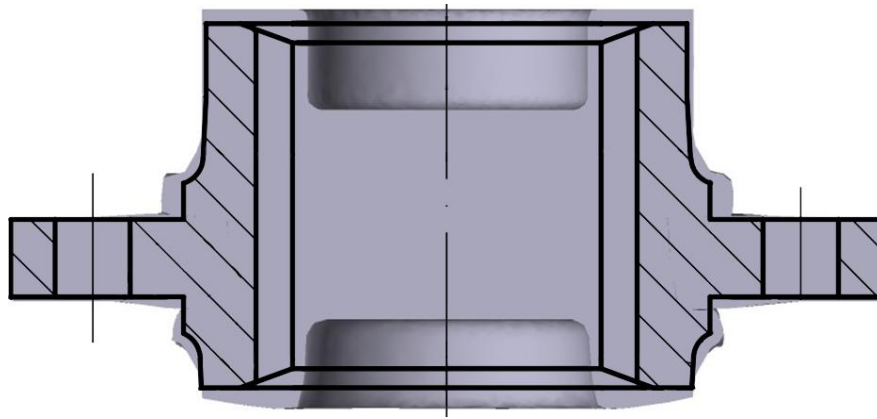


Рисунок 5.20 – Сравнение готового изделия «ступица» с моделями в системе конечно-элементного моделирования QFORM

Анализ результатов моделирования показывает, что предложенная технология позволяет не только обеспечить получение требуемой формы сложного составного изделия типа «ступица», но и создать более рациональное сочетание свойств его отдельных функциональных зон. Фланец, выполненный из более прочного материала, сохраняет необходимую жесткость и обеспечивает работоспособность соединения. В то же время бобышка из низкоуглеродистой стали в процессе холодного комбинированного выдавливания подвергается упрочнению, что приводит к повышению её твердости и сопротивления деформации.

Такой подход является целесообразным, поскольку низкоуглеродистая сталь обладает более высокой пластичностью и ударной вязкостью, что важно для дальнейшего формирования шлицевой части ступицы при последующей механической обработке. В результате предложенная технология обеспечивает не только снижение трудоемкости и повышение коэффициента использования материала, но и создает предпосылки для повышения работоспособности изделия за счет более обоснованного распределения свойств между фланцем и бобышкой.

5.3 Выводы по главе 5

1. На основе анализа базовой технологии изготовления ступицы диска сцепления установлено, что существующий процесс характеризуется значительной трудоемкостью механической обработки и недостаточно рациональным использованием материала. Это подтвердило целесообразность разработки методики получения сложного составного изделия типа «ступица» методом холодной объёмной штамповки с применением комбинированного выдавливания.

2. Использование результатов математического моделирования, экспериментальных данных по упрочнению материала и численного моделирования в QForm позволило обосновать основные параметры предлагаемого технологического процесса. Установлено, что применение стали 10 для бобышки и стали 40 для фланца обеспечивает рациональное сочетание пластичности, прочности и способности материала к упрочнению при холодной объёмной штамповке.

3. Расчетные данные и результаты моделирования показали, что максимальная сила деформирования не превышает 3 МН, что подтверждает возможность реализации разработанного технологического процесса на имеющемся гидравлическом прессе. Согласование результатов математической модели и QForm также подтверждает применимость предложенного подхода для предварительного обоснования параметров процесса.

4. По результатам анализа распределения твердости установлено, что после деформирования бобышка из стали 10 получает существенное упрочнение: основная часть значений твердости находится в диапазоне 85–92 HRB. Это показывает, что низкоуглеродистая сталь 10 после холодного комбинированного выдавливания может обеспечивать требуемый уровень механических свойств, при этом сохраняя преимущества по пластичности и ударной вязкости, важные для последующего формирования шлицевой части ступицы.

5. Применение составной конструкции позволяет более рационально распределить свойства отдельных частей изделия: фланец из стали 40 обеспечивает

жесткость и прочность соединения, а бобышка из стали 10 формируется с дополнительным упрочнением в процессе деформации. Такое сочетание материалов создает предпосылки для повышения работоспособности изделия при эксплуатационных нагрузках.

6. Разработанный технологический процесс изготовления сложного составного изделия типа «ступица» обеспечивает повышение коэффициента использования заготовки до 56 % и снижение трудоемкости механической обработки. Это подтверждает практическую значимость предложенной методики и возможность её использования при проектировании процессов изготовления других изделий с фланцем, имеющих сходные конструктивные и функциональные особенности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе метода баланса мощности разработана математическая модель комбинированного процесса радиального и обратного выдавливания в конической матрице. Проведена оценка её применимости при различных геометрических размерах заготовок, что позволило определить диапазоны корректного использования модели. Разработанная математическая модель обеспечивает оперативное определение силы деформирования и позволяет оценивать влияние геометрических и технологических параметров на процесс формирования заготовки типа «стакан с фланцем», являющийся ключевым этапом при получении сложного составного изделия типа «ступица».

2. Проведено сопоставление максимальных сил деформирования, полученных аналитическим путём и методом конечно-элементного моделирования в QForm, при варьировании технологических и геометрических параметров – угла конической части матрицы, радиуса пуансона, высоты фланца и коэффициента трения. Установлено, что при рациональном выборе параметров расхождение между аналитическими расчётами и результатами моделирования не превышает допустимых значений (до 20 %), что подтверждает возможность применения разработанной модели на этапе предварительного проектирования технологического процесса.

3. Исследовано напряжённо-деформированное состояние цилиндрических образцов из сталей 10 и 20 при пластическом деформировании. Построены кривые упрочнения и установлены зависимости твёрдости от интенсивности напряжений и степени деформации для указанных материалов. На основе экспериментальных данных получены тарировочные графики, позволяющие прогнозировать изменение механических свойств при холодной объёмной штамповке. Разработанные зависимости реализованы в программном комплексе QForm посредством пользовательской подпрограммы и использованы для отображения распределения твёрдости при формировании сложного составного изделия типа «ступица».

4. При значениях накопленной деформации $\varepsilon \approx 1,0$ для стали 10 и $\varepsilon \approx 0,8$ для стали 20 достигаемый уровень твёрдости соответствует твёрдости сталей 30 и 40 в исходном состоянии соответственно. Полученный результат показывает принципиальную возможность обоснованного выбора и замены материала при штамповке деталей с учётом упрочнения, возникающего в процессе холодной объёмной деформации.

5. Уточнена точность определения твердости в зависимости от величины деформации при осадке цилиндрических образцов. Показано, что торцевая поверхность испытывает преимущественно осевое сжатие и лишь незначительное радиальное растяжение, что способствует более равномерному упрочнению материала.

6. Разработана методика обоснования технологического процесса изготовления сложного составного изделия типа «ступица» диска сцепления автомобиля методом комбинированного выдавливания цилиндрической заготовки с последующим формированием неразъёмного соединения с фланцем, основанная на совместном использовании математической модели расчёта сил деформирования (глава 2) и экспериментально установленной зависимости твёрдости от степени деформации (глава 4), реализованных в рамках численного моделирования в QForm.

7. Разработан новый технологический процесс холодной объёмной штамповки сложного составного изделия «ступица» диска сцепления автомобиля, основанный на комбинированном выдавливании бобышки из стали 10 с последующим формированием неразъёмного соединения с фланцем из стали 40, имеющим профильное отверстие типа «прямоугольные зубья». Технологический процесс принят к внедрению на предприятии ООО «Триал-Диск» (г. Серпухов) и обеспечивает повышение коэффициента использования заготовки до 56 %, снижение трудоемкости механической обработки, а также создает конструктивные предпосылки для надежной передачи крутящего момента в соответствии с функциональными требованиями к изделию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Евстифеев, В. В. Научное обоснование, обобщение и разработка новых технологий холодной объемной штамповки: дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. / Евстифеев Валентин Васильевич – Москва: МГТУ им. Баумана, 1994. – 422 с.
2. Унксов, Е. П. Теория пластических деформаций металлов: учебник / Е. П. Унксов, У. Джонсон, В. Л. Колмогоров [и др.]. – Москва: Машиностроение, 1983. – 598 с.
3. Сосенушкин, Е. Н. Прогрессивные процессы объемной штамповки: учебное пособие / Е. Н. Сосенушкин. – Москва: Машиностроение, 2011. – 479 с.
4. Третьюхин, В. В. Повышение эффективности технологических процессов штамповки фланцевых поковок на основе совершенствования методов горячего выдавливания в закрытых штампах: дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. / Третьюхин Виталий Вячеславович – Москва: МГТУ «СТАНКИН», 2009. – 160 с.
5. Коган, Р. Т. Штамповка с противодавлением / Р. Т. Коган. – Текст : непосредственный // Конструирование и технология машиностроения. – Сер. В, 1965. – №2. – С. 1-7.
6. Алиева, Л. И. Исследование процессов холодного выдавливания осесимметричных деталей с фланцем: дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. / Л. И. Алиева – Краматорск: ДГМА, 2006. – 301 с.
7. Каргин, В. Р. Теория обработки металлов давлением: учебное пособие / В. Р. Каргин, Б. В. Каргин – Самара: Изд-во Самарского университета, 2019. – 112 с.
8. Воронцов, А. Л. Исследование штамповки вытяжкой по внутренней поверхности при ограничении радиального течения фланца. Эксперименты / А. Л. Воронцов – Текст : непосредственный // Справочник. Инженерный журнал – 2025. – № 1. – С. 63-73.
9. Воронцов, А. Л. Получение внутреннего выступа в трубной заготовке радиальным выдавливанием. Актуальность и постановка задачи. Ч. 1 / А. Л.

Воронцов, Е. О. Решиков. – Текст : непосредственный // Технология металлов – 2025. – № 7. – С. 26-34.

10. Воронцов, А. Л. Теория и расчеты процессов обработки металлов давлением: учеб. пособие: в 2 т. / А. Л. Воронцов. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014 – 398 с.

11. Петров, Б. В. Обратное выдавливание в ступенчатой матрице: дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. / Петров Борис Владимирович – Тула: Тульский гос. ун-т, 2004. – 152 с.

12. Ларин, С. Н. Напряженно-деформированное состояние заготовки в процессе комбинированного выдавливания / С. Н. Ларин, В. И. Трегубов, А. Н. Исаева [и др.]. – Текст : непосредственный // Известия Тульского государственного университета. Технические науки – 2020. – № 2. – С. 375-381.

13. Абхари, П. Б. Теоретический анализ процесса выдавливания деталей с фланцем в закрытых матрицах / П. Б. Абхари – Текст : непосредственный // Вестник Херсонского национального технического университета – 2017. – № 2 (61). – С. 11-18.

14. Петров, М. А. Оценка степени износа инструмента для холодной объемной штамповки экспериментальными и численными методами / М. А. Петров, Д. А. Елесин, Д. А. Екимов. – Текст : непосредственный // Известия ТулГУ. Технические науки – 2022. – № 9. – С 366-375.

15. Компьютерное моделирование многопереходного процесса объемной штамповки: монография / С. Ю. Звонов, А. Г. Шляпугин; под ред. Ф. В. Гречникова – Минобрнауки России: СНИУ им. С. П. Королева. – Самара, 2017. – 95 с.

16. Гладков, Ю. А. Курс: «Математическое моделирование пластических деформаций». Введение. Применение QForm для моделирования и исследования процессов штамповки и прокатки: учеб. пособие / Гладков Ю. А. – МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. – 86 с.

17. Данилин, Г. А. Определение силовых параметров процесса продольно-поперечного выдавливания / Г. А. Данилин, Д. С. Филин. – Текст : непосредственный // Metalloobrabotka – 2014. – № 3 (81). – С. 55-59.

18. Чудин, В. Н. Выдавливание ребер жесткости на корпусных деталях с локальным нагреванием / В. Н. Чудин, А. В. Черняев. – Текст : непосредственный // Вестник машиностроения – 2021. – № 7. – С. 72-74.

19. Недошивин, С. В. Экспериментальное моделирование методом делительных сеток штамповки остроконечных головных частей сердечников пуль / С. В. Недошивин, Г. В. Панфилов, И. А. Гаврилин. – Текст : непосредственный // Известия Тульского государственного университета. Технические науки – 2015. – № 7, ч. 1. – С. 156–163.

20. Болобов, В. И. Зависимости твёрдости металлов от степени пластической деформации при различных способах деформирования / В. И. Болобов, В. С. Бочков, С. А. Чупин [и др.]. – Текст : непосредственный // Заводская лаборатория. Диагностика материалов – 2015. – Т. 81. – № 6. – С. 52–56.

21. Цветков, Ю. Н. Выбор вида механических испытаний металлических образцов для построения зависимости микротвёрдости от интенсивности пластической деформации / Ю. Н. Цветков, В. А. Петров, Н. М. Вихров – Текст : непосредственный // Научные проблемы водного транспорта – 2025. – № 84. – С. 42–55.

22. Ван, В. Разработка технологии изготовления ступицы: бакалаврская работа / Ван Вэньчжэнь – Национальный исследовательский Томский политехнический университет – Томск, 2021. – 139 с.

23. Егоров, Д. Е. Технологический процесс изготовления ступицы Лады Гранта: выпускная квалификационная работа бакалавра. / Д. Е. Егоров – Тольяттинский государственный университет – Тольятти, 2022. – 62 с.

24. Kitayama, S. Technical review on design optimization in forging / S. Kitayama // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology – 2024. – Vol. 132 – P. 4161–4189.

25. Hawryluk, M. Analysis of the industrial process of producing a hub forging used in motorcar power transmission systems – a case study / M. Hawryluk, M. Rychlik, M. Więclaw [et al.]. // Journal of Manufacturing and Materials Processing. – 2021. – Vol. 5 – № 2. – P. 32.

26. Gontarz, A. New Technologies for Producing Bicycle Hub Forging / A. Gontarz, A. Dziubińska, G. Winiarski [et al.]. // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Vol. 220 – Article 02003.

27. Дмитриев, А. М. Расширение области применения холодной объемной штамповки цилиндрических втулок комбинированием их в единую деталь / А. М. Дмитриев, Н. В. Коробова – Текст : непосредственный // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – № 3. – С. 444–453.

28. Алюшин, Ю. А. Энергетические основы механики: учеб. пособие для вузов. / Ю. А. Алюшин. – Москва: Машиностроение, 1999. – 192 с.

29. Джонсон, В. Механика процессов выдавливания металла: учеб. пособие / В. Джонсон, Х. Кудо – Москва: Metallurgia, 1966. – 317 с.

30. Колмогоров, В. Л. Напряжения, деформации, разрушение: учеб. пособие / В. Л. Колмогоров – Москва: Metallurgia, 1970. – 230с.

31. Теорияковки и штамповки: учеб. пособие / Е. П. Унксов, У. Джонсон, В. Л. Колмогоров [и др.]; под ред. Е. П. Унксова, А. Г. Овчинникова. – Москва: Машиностроение, 1999. – 598 с.

32. Евстратов, В. А. Теория обработки металлов давлением: учебник для вузов / В. А. Евстратов – Харьков: Вища школа: Изд-во при Харьк. ун-те, 1981. – 248 с.

33. Сторожев, М. В. Теория обработки металлов давлением: учебник для вузов / М. В. Сторожев, Е. А. Попов – Москва: Машиностроение, 1977. – 423 с.

34. Губкин, С. И. Пластическая деформация металлов: учеб. пособие / С. И. Губкин – Москва: Metallurgizdat, 1961. – 306 с.

35. Теория обработки металлов давлением: учеб. пособие / И. Я. Тарновский, А. А. Поздеев, О. А. Ганаго [и др.]; под ред. И. Я. Тарновский – Москва: Metallurgia, 1963. – 672 с.

36. Степанский, Л. Г. Расчеты процессов обработки металлов давлением: монография / Л. Г. Степанский – Москва: Машиностроение, 1979. – 216с.

37. Колмогоров, В. Л. Механика обработки металлов давлением: учеб. пособие / В. Л. Колмогоров – Москва: Metallurgia, 1986. – 688 с.

38. Алюшин, Ю. А. Энергетические основы механики: учеб. пособие / Ю. А. Алюшин – Москва: Машиностроение, 1999. – 192 с.
39. ГОСТ 9013–59. Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу. – Москва: Издательство стандартов, 1959. – 12 с. – Текст непосредственный.
40. ГОСТ 2789–73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. – Москва: Издательство стандартов, 1973. – 22 с. – Текст непосредственный.
41. Филиппов, Ю. К. Особенности построения кривой упрочнения при испытании образцов на одноосное сжатие в зависимости от величины деформации. / Ю. К. Филиппов, Д. А. Гневашев, Ле Чунг Зунг – Текст : непосредственный // Черные металлы – Москва, 2023. – № 11. – С. 66-69.
42. Weiß, A. Cold forging of gear components by a modified Samanta process / A. Weiß, T. Deliktas, M. Liewald [et al.]. // Forschung im Ingenieurwesen. – 2020. – Vol. 84. – P. 215–221.
43. Pin Bolt: A Case Study Involving Cold Forging Production Process // ETMA Metal Parts. – URL: <https://etmametalparts.com/en/pin-bolt-cold-forging-case-study/> (дата обращения: 04.10.2025). – Текст: электронный.
44. Le, T. K. Cold Forging Effect on the Microstructure of Motorbike Shock Absorbers Fabricated by Tube Forming in a Closed Die. / T. K. Le, T. A. Bui – Текст: электронный // Applied Sciences 11 – 2021 – №5 – URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/5/2142> (дата обращения: 04.10.2025)
45. Молодов, А. В. Разработка технологического процесса холодной объемной штамповки детали «Корпус заряда». / А. В. Молодов – Текст : непосредственный // Известия Тульского государственного университета. Технические науки – 2011. – № 5-3 – С. 213-218.
46. Бовтало, Я. Н. Зависимость механических свойств стали от величины деформации и схемы напряжённого состояния / Я. Н. Бовтало, В. Н. Игнатенко, Ю. К. Филиппов – Текст : непосредственный // Сборник научных трудов №1 (20) – 2009. – Краматорск: Донбасская государственная машиностроительная академия, 2009. – С. 141-144.

47. ГОСТ 25.503–97. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Метод испытания на сжатие : дата введения 01.07.1999. – Москва: Издательство стандартов, 1997. – 27 с. – Текст непосредственный.

48. Калпин, Ю. Г. Образец для механических испытаний материалов методом пластической одноосной осадки. / Ю. Г. Калпин, Ю. К. Филиппов, С. А. Егоров [и др.]. – Текст : непосредственный // Черные металлы – 2019. – № 8. – С. 62-66.

49. Калпин, Ю. Г. Построение кривой упрочнения при больших величинах деформации. / Ю. Г. Калпин, Ю. К. Филиппов, П. А. Петров [и др.] – Текст : непосредственный // Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением: сб. науч. трудов, часть 2. – Тула: ТулГУ – 2002. – С. 19-24.

50. Ле, Ч. З. Разработка технологического процесса холодной объемной штамповки детали «ступица» с применением компьютерного имитационного моделирования / Ле Чунг Зунг, Филиппов Ю.К. – Текст : непосредственный // Вестник МГТУ «Станкин». – 2025. – № 3 (74). – С.49-55.

51. Исаева, А. Н. Построение расширенной кривой упрочнения при помощи сжатия составных цилиндрических образцов / А. Н. Исаева, С. Н. Ларин, В. И. Платонов [и др.] – Текст : непосредственный // Черные металлы – 2022. – № 3 – С. 65-70.

52. ГОСТ 1050-88. Прокат сортовой, калиброванный, со специальной отделкой поверхности из углеродистой качественной конструкционной стали: дата введения 01.01.1991. – Межгосударственный стандарт – 33 с. – Текст непосредственный.

53. Филиппов, Ю. К. Точность определения деформации при построении кривых упрочнения при испытании образцов на одноосное сжатие / Ю. К. Филиппов, Д. А. Гневашев, Ле Чунг Зунг [и др.] – Текст : непосредственный // Черные металлы – 2024. – № 6. – С. 76-81.

54. Рагулин, А. В. Разработка технологии и исследование комбинированного выдавливания полых осесимметричных изделий с коническим участком: дис. на

соиск. уч. степ. канд. техн. наук. / Рагулин Алексей Викторович – Москва: МАМИ, 2006. – 133 с.

55. Авторское свидетельство 1052306 СССР, МКИ В21J 5/10. Способ изготовления деталей типа втулок: № 3452440/25-27; заявлено 11.06.1982 / И. С. Алиев, В. В. Лапин // Открытия. Изобретения – 1983. – № 41. – Текст : непосредственный.

56. Авторское свидетельство 1030081 СССР, МКИ В21J 5/12. Способ изготовления изделий со ступенчатой боковой поверхностью: № 3256982/25-27; заявлено 06.03.1981 / В. Г. Шибиков // Открытия. Изобретения – 1983 – № 2-7. – Текст : непосредственный.

57. Шофман, Л. А. Теория и расчеты процессов холодной штамповки: учеб. пособие / Л. А. Шофман – Москва: Машиностроение, 1964. – 375 с.

58. Филиппов, Ю. К. Влияние на кривую упрочнения однородности распределения величины деформации по сечению образца из стали 10 методом одноосного сжатия при построении кривых упрочнения / Ю. К. Филиппов, Д. А. Гневашев, Ле Чунг Зунг [и др.] – Текст: непосредственный // Черные металлы – 2025. – № 2. – С. 80–85.

59. Томленов, А. Д. Теория пластического деформирования металлов: учеб. пособие / А. Д. Томленов – Москва: Металлургия, 1972. – 408 с.

60. Алиев, И. С. Исследование процесса холодного поперечного выдавливания: дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. / Алиев Играмотдин Серажутдинович – Ленинград: ЛИИ, 1977. – 376 с.

61. Овчинников, А. Г. Определение поля напряжений и удельных усилий при радиальном выдавливании / А. Г. Овчинников, Г. В. Кузнецов – Текст: непосредственный // Известия вузов. Машиностроение. – 1977. – № 12. – С. 114-119.

62. Оленин, Л. Д. Научное обоснование и разработка энергосберегающих процессов холодного выдавливания высокоточных деталей сложной формы с глубокими полостями: дис. на соиск. уч. степ. доктора техн. наук. / Оленин Леонид Дмитриевич – Москва: МГТУ им. Баумана, 1999. – 425 с.

63. Оленин, Л. Д. К выбору оптимальной заготовки под точную объемную штамповку / Л. Д. Оленин // Повышение точности и качества при штамповке. – Москва: МДНТП – 1975. – С. 72-79.

64. Vickers, G.W. Simulation of the Heading Process / G. W. Vickers, A. Plumtree // Transactions of the ASME. – 1975. – № 2. – P. 120-135.

**ПРИЛОЖЕНИЕ А: Программа вычисления математической модели
на языке C#**

```
using System;
using System.Reflection.Metadata;
using System.Security.Cryptography;

class Program
{
    // Вспомогательные функции для интегрирования
    static double IntegrateEi(Func<double, double, double> fen, double x2, double y,
double x1)
    {
        int nx = 50;
        double hx = (x2 - x1) / nx;
        double sum = 0.0;
        for (int i = 0; i < nx; i++)
        {
            double x = x1 + i * hx;
            double xNext = x + hx;
            sum += (fen(x, y) + fen(xNext, y)) / 2 * hx;
        }
        return sum;
    }

    static double IntegrateEiStep2(Func<double, double, double> fen, double x2,
double y, double x1, double xx)
    {
        int nx = 50;
        if (Math.Sqrt(x2 * x2 - xx) > x1)
```

```

{
    x1 = Math.Sqrt(x2 * x2 - xx);
}
double hx = (x2 - x1) / nx;
double sum = 0.0;
for (int i = 0; i < nx; i++)
{
    double x = x1 + i * hx;
    double xNext = x + hx;
    sum += (fen(x, y) + fen(xNext, y)) / 2 * hx;
}
return sum;
}

```

```

static double IntegrateEn(Func<double, double, double> fen, double x1, double x2,
double y1, double y2, double xx)

```

```

{
    int nx = 50;
    int ny = 50;
    double hx = (x2 - x1) / nx;
    double hy = (y2 - y1) / ny;
    double sum = 0.0;

    for (int i = 0; i < nx; i++)
    {
        double x = x1 + (i + 0.5) * hx;
        for (int j = 0; j < ny; j++)
        {
            double y = y1 + (j + 0.5) * hy;
            sum += IntegrateEiStep2(fen, x, y, x1, xx) * x * hx * hy;
        }
    }
}

```

```

    }
}
return sum;
}

```

```

static double IntegrateEnZona3(Func<double,double,double>fen, double x1, double
x2, double h, double R, double tanAlpha)

```

```

{
    int nx=50;
    int ny=50;
    double hx=(x2-x1)/nx;
    double sum=0.0;

    for (int i=0;i<nx;i++)
    {
        double x=x1+i*hx;
        double xNext = x + hx;

        double yMax = h + tanAlpha * (R - x);
        double yMaxNext = h + tanAlpha * (R - xNext);

        double hy=(yMax+yMaxNext)/(2*ny);

        for (int j = 0; j < ny; j++)
        {
            double y = j*hy;
            double yNext = y + hy;

            double f1 = IntegrateEi(fen, x, y, x1) * x;
            double f2 = IntegrateEi(fen, xNext, yNext, x1) * xNext;

```

```

        sum += (f1 + f2) / 2 * hx * hy;
    }
}
return sum;
}

```

```

static double IntegrateEnZona3Step2(Func<double,double,double>fen, double x1,
double x2, double h, double R, double tanAlpha, double xx)

```

```

{
    int nx=50;
    int ny=50;
    double hx=(x2-x1)/nx;
    double sum=0.0;

    for (int i=0;i<nx;i++)
    {
        double x=x1+i*hx;
        double xNext = x + hx;

        double yMax = h + tanAlpha * (R - x);
        double yMaxNext = h + tanAlpha * (R - xNext);

        double hy=(yMax+yMaxNext)/(2*ny);

        for (int j = 0; j < ny; j++)
        {
            double y = j*hy;
            double yNext = y + hy;

            double f1 = IntegrateEiStep2(fen, x, y, x1, xx) * x;

```

```

        double f2 = IntegrateEiStep2(fen, xNext, yNext, x1, xx) * xNext;
        sum += (f1 + f2) / 2 * hx * hy;
    }
}
return sum;
}

```

```

static double Integrate(Func<double, double, double> f, double x1, double x2,
double y1, double y2)

```

```

{
    int nx = 50;
    int ny = 50;
    double hx = (x2 - x1) / nx;
    double hy = (y2 - y1) / ny;
    double sum = 0.0;

    for (int i = 0; i < nx; i++)
    {
        double x = x1 + (i + 0.5) * hx;
        for (int j = 0; j < ny; j++)
        {
            double y = y1 + (j + 0.5) * hy;
            sum += f(x, y) * x * hx * hy;
        }
    }
    return sum;
}

```

```

static double IntegrateZona3(Func<double,double,double>f, double x1, double x2,
double h, double R, double tanAlpha)

```

```
{  
    int nx=50;  
    int ny=50;  
    double hx=(x2-x1)/nx;  
    double sum=0.0;  
  
    for (int i=0;i<nx;i++)  
    {  
        double x=x1+i*hx;  
        double xNext = x + hx;  
  
        double yMax = h + tanAlpha * (R - x);  
        double yMaxNext = h + tanAlpha * (R - xNext);  
  
        double hy=(yMax+yMaxNext)/(2*ny);  
  
        for (int j = 0; j < ny; j++)  
        {  
            double y = j*hy;  
            double yNext = y + hy;  
  
            double f1 = f(x, y) * x;  
            double f2 = f(xNext, yNext) * xNext;  
            sum += (f1+f2)/2 * hx * hy;  
        }  
    }  
    return sum;  
}
```

```
static void Main(string[] args)
```

```
{
//Требуемые переменные

double z0, h0, R0, h1, R1, r1, R2, phiDeg, a, n, sigma0, miu;

Console.WriteLine("Введите геометрические параметры заготовки: ");
Console.Write("- Высота (мм): ");
while (!double.TryParse(Console.ReadLine(), out h0))
{
    Console.Write("Недопустимое значение! Введите значение высоты
заново: ");
}

Console.Write("- Радиус (мм): ");
while (!double.TryParse(Console.ReadLine(), out R0))
{
    Console.Write("Недопустимое значение! Введите значение радиуса
заново: ");
}

Console.WriteLine("Введите геометрические параметры матрицы: ");
Console.Write("- R1 (мм): ");
while (!double.TryParse(Console.ReadLine(), out R1))
{
    Console.Write("Недопустимое значение! Введите значение R1 заново:
");
}

Console.Write("- R2 (мм): ");
while (!double.TryParse(Console.ReadLine(), out R2))
```

```
{  
    Console.WriteLine("Недопустимое значение! Введите значение R2 заново:  
");  
}  
  
Console.WriteLine("- Угол  $\Phi$  (град.): ");  
while (!double.TryParse(Console.ReadLine(), out phiDeg))  
{  
    Console.WriteLine("Недопустимое значение! Введите значение  $\Phi$  заново: ");  
}  
  
Console.WriteLine("- h1 (мм): ");  
while (!double.TryParse(Console.ReadLine(), out h1))  
{  
    Console.WriteLine("Недопустимое значение! Введите значение h1 заново:  
");  
}  
  
Console.WriteLine("Введите значение радиуса пуансона во втором этапе:  
");  
  
Console.WriteLine("- r1 (мм): ");  
while (!double.TryParse(Console.ReadLine(), out r1))  
{  
    Console.WriteLine("Недопустимое значение! Введите значение r1 заново: ");  
}  
  
Console.WriteLine("Введите свойства материала заготовки: ");  
Console.WriteLine("- sigma0 (МПа): ");  
while (!double.TryParse(Console.ReadLine(), out sigma0))  
{
```

```

    Console.WriteLine("Недопустимое значение! Введите значение sigma0
заново: ");
}

Console.WriteLine("- a (МПа): ");
while (!double.TryParse(Console.ReadLine(), out a))
{
    Console.WriteLine("Недопустимое значение! Введите значение a заново: ");
}

Console.WriteLine("- n: ");
while (!double.TryParse(Console.ReadLine(), out n))
{
    Console.WriteLine("Недопустимое значение! Введите значение n заново: ");
}

Console.WriteLine("Введите коэффициент трения: ");
while (!double.TryParse(Console.ReadLine(), out miu))
{
    Console.WriteLine("Недопустимое значение! Введите значение
коэффициента трения заново: ");
}

double Vn = 100;
double phi = phiDeg * Math.PI / 180;
double tanPhi = Math.Tan(phi);
double hstep = 0.1;
double zstep = 0.5;
double pi = Math.PI;
double h2 = h1 + tanPhi * (R2 - R1);

```

```

double R4 = R2;
double hstar0 = 0;
double e01 = 0;
double e02 = 0;

double[,] result = new double[200, 2];
int t = 0;

//Первый этап - осадка
double znext = h0 * R0 * R0 / (R1 * R1);
for (double z1 = h0; z1 > znext; z1 -= zstep)
{
    double R3 = R0 * Math.Sqrt(h0 / z1);
    double en = Math.Log(h0 / z1);
    double sigma = sigma0 + a * Math.Pow(en, n);
    //Мощность деформации
    double Wd = sigma * pi * R3 * R3 * Vn;
    //Мощность трения
    double Wtr = 2 * pi * miu * sigma * Vn * Math.Pow(R3, 3) / (3 * z1);
    //Сумма
    double W = Wd + Wtr;

    double p = W / Vn;

    result[t, 0] = z1;
    result[t, 1] = p;
    // result[t, 2] = p;
    t = t + 1;
}

```

```

//Первый этап - радиальное выдавливание
//Определить исходную высоту инструмента
if (znext - Math.Truncate(znext) >= 0.5)
{
    z0 = Math.Truncate(znext) + 0.5;
}
else
{
    z0 = Math.Truncate(znext);
}

//Определить мощности
znext = h2 + (h0 * R0 * R0 - h1 * R2 * R2 - 1.0 / 3 * (h2 - h1) * (R1 * R1 + R2
* R2 + R1 * R2)) / (R1 * R1);
for (double z1 = z0; z1 > znext; z1 -= zstep)
{
    //Определить R3 и h3
    double a0 = 2 * tanPhi;
    double b0 = -3 * (h1 + tanPhi * R2);
    double d0 = 3 * R0 * R0 * h0 - 3 * R1 * R1 * (z1 - h2) + tanPhi * R1 * R1 *
R1;

    double delta = b0 * b0;
    double k = (-2 * b0 * b0 * b0 - 27 * a0 * a0 * d0) / (2 *
Math.Sqrt(Math.Pow(delta, 3)));
    double R3 = (2 * Math.Sqrt(delta) * Math.Cos(Math.Acos(k) / 3 - 2 * pi / 3)
- b0) / (3 * a0);
    double h3 = h1 + tanPhi * (R2 - R3);

    ////////////Зона 1//////////
    double en1 = Math.Log(h0 / z0);

```

```

double sigma1 = sigma0 + a * Math.Pow(en1, n);
//Мощность трения
double W1tr = 2 * pi * miu * sigma1 * Vn * R1 * (z1 - h2);
//Сумма
double W1 = W1tr;

//////////Зона 2//////////
double en2 = Math.Log(z0 / z1);
double sigma2 = sigma0 + a * Math.Pow(en2, n);
//Мощность деформации
double W2d = sigma2 * pi * R1 * R1 * Vn;
//Мощность трения
double W2tr = pi * miu * sigma2 * Vn * Math.Pow(R1, 3) / (3 * h2);
//Мощность срезы
double W2sr = pi * sigma2 * Vn * Math.Pow(R1, 3) / (3 * Math.Sqrt(3) *
h2);

//Сумма мощностей
double W2 = W2d + W2tr + W2sr;

//////////Зона 3//////////
double hx = h3 + tanPhi * R3;
double T3 = pi * R3 * R3 * h3 + 1.0 / 3 * pi * (h2 - h3) * (R1 * R1 + R3 *
R3 + R1 * R3) - pi * R1 * R1 * h2; //Объем зоны 3
double ei3der(double x, double y)
{
    return R1 * R1 * Vn / (2 * Math.Sqrt(3) * x * x * Math.Pow(hx - tanPhi
* x, 3)) * Math.Sqrt(4 * (hx * hx - 3 * hx * tanPhi * x + 3 * tanPhi * tanPhi * x * x) *
(hx - tanPhi * x) * (hx - tanPhi * x) + Math.Pow(hx - 3 * tanPhi * x, 2) * tanPhi *
tanPhi * y * y);
}

```

```

double ei3(double x, double y)
{
    return 1.0 / (Math.Sqrt(3) * x * Math.Pow(hx - tanPhi * x, 2)) *
Math.Sqrt(4 * (hx * hx - 3 * hx * tanPhi * x + 3 * tanPhi * tanPhi * x * x) * (hx - tanPhi
* x) * (hx - tanPhi * x) + Math.Pow(hx - 3 * tanPhi * x, 2) * tanPhi * tanPhi * y * y);
}
double en3 = 2 * pi * IntegrateEnZona3(ei3, R1, R3, h3, R3, tanPhi) / T3;
double sigma3 = sigma0 + a * Math.Pow(en3, n);
//Мощность деформации
double W3d = 2 * pi * sigma3 * IntegrateZona3(ei3der, R1, R3, h3, R3,
tanPhi);
//Мощность трения
double W3tr = pi * miu * sigma3 * Vn * R1 * R1 * Math.Log(h2 / h3) /
tanPhi;
//Мощность срезы
double W3sr = pi * sigma3 * Vn * R1 * (2 * h2 - tanPhi * R1) / (2 *
Math.Sqrt(3));
//Сумма мощностей
double W3 = W3d + W3tr + W3sr;

//Накопленная деформация для второго этапа
e01 = Math.Log(h0 / z1);
e02 = en3;

//Полная мощность и сила деформирования
double W = W1 + W2 + W3;
double p = W / Vn;

//Вывести результаты
result[t, 0] = z1;

```

```
    result[t, 1] = p;
    t = t + 1;
}

//Второй этап
//Определить исходную высоту инструмента
double z2 = znext;
if (znext - Math.Truncate(znext) >= 0.5)
{
    z0 = Math.Truncate(znext) + 0.5;
}
else
{
    z0 = Math.Truncate(znext);
}

//Установить параметры
double e12T = 0;
double e23T = 0;
double e34T = 0;
double e56T = 0;
double e68T = 0;

//Определить мощности
for (double z1 = z0; z1 > h1; z1 -= zstep)
{
    if (z1 < h2)
    {
        hstar0 = z1;
    }
}
```

```

else
{
    hstar0 = h2;
}

double Wmin = 0;
double hstarmin = 0;
double e12plus = 0;
double e23plus = 0;
double e34plus = 0;
double e56plus = 0;
double e68plus = 0;

//Рассчитать минимальную суммарную мощность
for (double hstar = hstar0 - hstep; hstar > h1; hstar -= hstep)
{

    double tan = (hstar - h1) / (R2 - R1);

    ////////////Зона 1//////////
    double en1 = Math.Log(h0 / z1);
    double sigma1 = sigma0 + a * Math.Pow(en1, n);
    //Мощность деформации
    double W1d = sigma1 * pi * hstar * r1 * r1 * Vn / z1;
    //Мощность трения
    double W1tr = pi * miu * sigma1 * Vn * Math.Pow(r1, 3) / (3 * z1);
    //Сумма
    double W1 = W1d + W1tr;

    ////////////Зона 2//////////

```

```

double xx2 = r1 * r1 * (z0 - z1) / z1;
double T2 = pi * hstar * (R1 * R1 - r1 * r1);
double ei2(double x, double y)
{
    return 2.0 / (Math.Sqrt(3) * x);
}
double en2 = e01 + (e12T + 2 * pi * IntegrateEn(ei2, r1, R1, 0, hstar,
xx2)) / T2;
double sigma2 = sigma0 + a * Math.Pow(en2, n);
//Мощность деформации
double W2d = 2 * pi * sigma2 * Vn * r1 * r1 * hstar * Math.Log(R1 /
r1) / (Math.Sqrt(3) * z1);
//Мощность трения
double W2tr = pi * miu * sigma2 * Vn * r1 * r1 * (R1 - r1) / z1;
//Мощность срезы
double W2sr = pi * sigma2 * Vn * r1 * hstar * hstar / (Math.Sqrt(3) *
z1);
//Сумма мощностей
double W2 = W2d + W2tr + W2sr;

//////////Зона 3//////////
double xx3 = r1 * r1 * (z0 - z1) / z1;
double r0 = h1 + tan * R2;
double T3 = pi * R2 * R2 * h1 + 1.0 / 3 * pi * (hstar - h1) * (R1 * R1 +
R2 * R2 + R1 * R2) - pi * R1 * R1 * hstar; //Объем зоны 3
double ei3der(double x, double y)
{
    return hstar * r1 * r1 * Vn / (2 * Math.Sqrt(3) * z1 * x * x *
Math.Pow(r0 - tan * x, 3)) * Math.Sqrt(4 * (r0 * r0 - 3 * r0 * tan * x + 3 * tan * tan * x
* x) * (r0 - tan * x) * (r0 - tan * x) + Math.Pow(r0 - 3 * tan * x, 2) * tan * tan * y * y);
}

```

```

}
double ei3(double x, double y)
{
    return 1.0 / (Math.Sqrt(3) * x * Math.Pow(r0 - tan * x, 2)) *
Math.Sqrt(4 * (r0 * r0 - 3 * r0 * tan * x + 3 * tan * tan * x * x) * (r0 - tan * x) * (r0 - tan
* x) + Math.Pow(r0 - 3 * tan * x, 2) * tan * tan * y * y);
}
double en3 = e02 + (e23T + 2 * pi * IntegrateEnZona3Step2(ei3, R1,
R2, h1, R2, tan, xx3)) / T3;
double sigma3 = sigma0 + a * Math.Pow(en3, n);
//Мощность деформации
double W3d = 2 * pi * sigma3 * IntegrateZona3(ei3der, R1, R2, h1, R2,
tan);
//Мощность трения
double W3tr = pi * miu * sigma3 * Vn * hstar * r1 * r1 *
Math.Log(hstar / h1) / (z1 * tan);
//Мощность срезы
double W3sr = pi * sigma3 * Vn * r1 * r1 * tan * hstar / (2 *
Math.Sqrt(3) * z1);
//Сумма мощностей
double W3 = W3d + W3tr + W3sr;

//////////Зона 4//////////
double W4 = 0;
if (R4 > R2)
{
    double T4 = pi * (R4 * R4 - R2 * R2) * h1;
    double en4 = (2.0 / Math.Sqrt(3) * (R4 * R4 / (R4 * R4 - R2 * R2) *
Math.Log(R4 / R2) - 1 / 2) + e34T) / T4;
    double sigma4 = sigma0 + a * Math.Pow(en4, n);

```

```

//Мощность деформации
double W4d = 2 * pi / Math.Sqrt(3) * sigma4 * Vn * hstar * r1 * r1 *
Math.Log(R4 / R2) / z1;

//Мощность трения
double W4tr = 2 * pi * miu * sigma4 * Vn * hstar * r1 * r1 * (R4 -
R2) / (z1 * h1);

//Мощность срезы
double W4sr = pi * sigma4 * Vn * hstar * r1 * r1 * tan / (2 *
Math.Sqrt(3) * z1);

//Сумма мощностей
W4 = W4d + W4tr + W4sr;
}

//////////Зона 5//////////
double en5 = Math.Log(h0 / z1);
double sigma5 = sigma0 + a * Math.Pow(en5, n);
//Мощность деформации
double W5d = pi * sigma5 * Vn * r1 * r1 * (z1 - hstar) / z1;
//Сумма мощностей
double W5 = W5d;

//////////Зона 6//////////
double xx6 = r1 * r1 * (z0 - z1) / z1;
double T6 = pi * (R1 * R1 - r1 * r1) * (z1 - hstar);
double ei6der(double x, double y)
{
    return Vn * r1 * r1 / (Math.Sqrt(3) * x * x * z1 * (R1 * R1 - r1 * r1))
* Math.Sqrt(3 * Math.Pow(x, 4) + Math.Pow(R1, 4));
}
double ei6(double x, double y)

```

```

{
    return 2.0 / (Math.Sqrt(3) * x * (R1 * R1 - x * x)) * Math.Sqrt(3 *
Math.Pow(x, 4) + Math.Pow(R1, 4));
}
double en6 = e01 + (e56T + 2 * pi * IntegrateEn(ei6, r1, R1, hstar, z1,
xx6)) / T6;
double sigma6 = sigma0 + a * Math.Pow(en6, n);
//Мощность деформации
double W6d = 2 * pi * sigma6 * Integrate(ei6der, r1, R1, hstar, z1);
//Мощность срезы
double W6sr = pi * sigma6 * Vn * R1 * R1 * r1 * Math.Pow(z1 - hstar,
2) / (Math.Sqrt(3) * z1 * (R1 * R1 - r1 * r1));
//Сумма мощностей
double W6 = W6d + W6sr;

//////////Зона 8//////////
double T8 = pi * (R1 * R1 - r1 * r1) * (z2 - z1);
double en8 = e68T / T8;
double sigma8 = sigma0 + a * Math.Pow(en8, n);
//Мощность трения
double W8tr1 = 2 * pi * miu * sigma8 * r1 * (z2 - z1) * Vn * (r1 * r1 *
(z1 - hstar) / (z1 * (R1 * R1 - r1 * r1)) + 1);
double W8tr2 = 2 * pi * miu * sigma8 * R1 * (z2 - h2) * Vn * r1 * r1 *
(z1 - hstar) / (z1 * (R1 * R1 - r1 * r1));
//Сумма мощностей
double W8 = W8tr1 + W8tr2;

//////////Сумма мощностей//////////
double W = W1 + W2 + W3 + W4 + W5 + W6 + W8;

```

```

////Определить минимальную мощность////
if (Wmin == 0)
{
    Wmin = W;
}
else
{
    if (W < Wmin)
    {
        Wmin = W;
        hstarmin = hstar;
        e12plus = en1 * pi * r1 * r1 * zstep * hstar / z1;
        e23plus = en2 * pi * r1 * r1 * zstep * hstar / z1;
        e34plus = en3 * pi * r1 * r1 * zstep * hstar / z1;
        e56plus = en5 * pi * r1 * r1 * zstep * (z1 - hstar) / z1;
        e68plus = en6 * pi * r1 * r1 * zstep * (z1 - hstar) / z1;
    }
}
}

//Накопленная деформация на следующий шаг
e12T += e12plus;
e23T += e23plus;
e34T += e34plus;
e56T += e56plus;
e68T += e68plus;

//Рассчитать нагрузку привода
double p = Wmin / Vn;

```

```

//Обновление данных
R4 = R4 + (hstarmin * r1 * r1 * zstep) / (2 * z1 * h1 * R4);
z2 = (h0 * R0 * R0 - R4 * R4 * h1 - 1.0 / 3 * tanPhi * (R2 * R2 * R2 - R1 *
R1 * R1) + tanPhi * (R2 - R1) * R1 * R1 - r1 * r1 * z1 + R1 * R1 * h1) / (R1 * R1 - r1
* r1);

//Вывести результаты
result[t, 0] = z1;
result[t, 1] = p;
// result[t, 2] = p;
t = t + 1;
}

/////Вывести все результаты процесса
Console.WriteLine("!!! Результаты: ");

for (int i = 0; i < 200; i++)
{
    if (result[i, 0] == 0)
    { break; }
    Console.Write("z1 = " + result[i, 0] + " мм; p = " + result[i, 1] + " H");
    Console.WriteLine();
}
}
}

```

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б: Подпрограмма для отображения распределения
твёрдости в QForm**

-- В каком объекте рассчитывать поле (заготовка)

set_target_workpiece()

-- Параметры модели твёрдости:

-- $HRB = A + B * (\text{strain} \wedge C)$, где strain – пластическая деформация

A = parameter("A", 48.65)

B = parameter("B", 39.02)

C = parameter("C", 0.27)

-- Результат – пользовательское поле твёрдости

HRB = result("HardnessHRB")

function UserFields (T, strain, strain_rate)

-- strain – накопленная пластическая деформация из QForm

local x = strain or 0.0

if x < 0 then x = 0 end

-- расчёт твёрдости

local h = A + B * (x ^ C)

-- сохранить значение в пользовательское поле

store(HRB, h)

end

ПРИЛОЖЕНИЕ В: Подпрограмма для отображения распределения твёрдости в MATLAB

```

%% === 0) Имя файла и константы модели твёрдости ===
fn = 'your_export.csv3d'; % файл, экспортированный из QForm
A = 60; B = 110; C = 0.20; % HRB = A + B * x^C, где x = strain_plast

%% === 1) Импорт файла CSV3D из QForm ===
T = readtable(fn, 'FileType','text', 'Delimiter',';');
T.Properties.VariableNames = lower(T.Properties.VariableNames);

% Преобразование строк с запятой в числовой формат
toNum = @(v) double( isnumeric(v).*v) + ...
    (~isnumeric(v)).*str2double(strrep(string(v),',','')) );

% Считывание координат и пластической деформации
X = toNum(T.x);
Y = toNum(T.y);
Z = toNum(T.z);
xpl = toNum(T.strain_plast); % накопленная пластическая деформация

% Фильтрация недопустимых значений
mask = isfinite(X) & isfinite(Y) & isfinite(Z) & isfinite(xpl);
X = X(mask); Y = Y(mask); Z = Z(mask); xpl = xpl(mask);

%% === 2) Выделение осевого сечения |Y| < tol ===
if range(Y) == 0
    tol = 0; % данные уже на плоскости симметрии
else
    tol = 0.02 * range(Y); % 2% диапазона Y

```

```
end
```

```
idx = abs(Y) <= tol;           % фильтрация точек сечения
X = X(idx); Z = Z(idx); xpl = xpl(idx);
```

```
% Если точек слишком мало — увеличить допуск
```

```
if nnz(idx) < 50
    tol = 0.10 * range(Y);
    idx = abs(Y) <= tol;
    X = toNum(T.x(idx));
    Z = toNum(T.z(idx));
    xpl = toNum(T.strain_plast(idx));
end
```

```
end
```

```
%% === 3) Расчёт твёрдости HRB ===
```

```
HRB = A + B .* (xpl .^ C);
```

```
% Удаление NaN/Inf
```

```
ok = isfinite(X) & isfinite(Z) & isfinite(HRB);
X = X(ok); Z = Z(ok); HRB = HRB(ok);
```

```
% Удаление дублирующихся узлов
```

```
[XZuniq, ia] = unique([X Z], 'rows', 'stable');
X = XZuniq(:,1); Z = XZuniq(:,2); HRB = HRB(ia);
```

```
%% === 4) Быстрый просмотр данных (диаграмма scatter) ===
```

```
figure;
scatter(X, Z, 10, HRB, 'filled');
axis equal; grid on;
xlabel('R (или X)');
```

```

ylabel('Z');
title('Распределение твёрдости HRB (scatter)');
colormap turbo;
cb = colorbar; cb.Label.String = 'HRB';

%% === 5) Интерполяция и построение сглаженной карты твёрдости ===
nx = 300; nz = 300;
[xq, zq] = meshgrid( linspace(min(X),max(X),nx),linspace(min(Z),max(Z),nz) );

% Интерполятор
F = scatteredInterpolant(X, Z, HRB, 'natural', 'none');
hq = F(xq, zq);

% Заполнение пустых точек с помощью метода ближайшего соседа
F.Method = 'nearest';
maskHole = ~isfinite(hq);
hq(maskHole) = F(xq, zq)(maskHole);

% Построение цветовой карты без сетки
figure;
imagesc([min(X) max(X)], [max(Z) min(Z)], hq);
set(gca,'YDir','normal'); axis image; grid off; box on;
xlabel('R (или X)');
ylabel('Z');
title('Интерполированное поле твёрдости HRB');
colormap turbo;
cb = colorbar; cb.Label.String = 'HRB';

%% === 6) (Опционально) Фиксация диапазона шкалы ===
% caxis([40 110]); % пример фиксированного диапазона HRB

```

```
%% === 7) (Опционально) Экспорт данных в CSV ===  
out = table(X, Z, HRB, 'VariableNames', {'x','z','HRB'});  
writetable(out, 'HRB_section.csv', 'Delimiter',';');
```

ПРИЛОЖЕНИЕ Г: Чертежи деталей штамповой оснастки

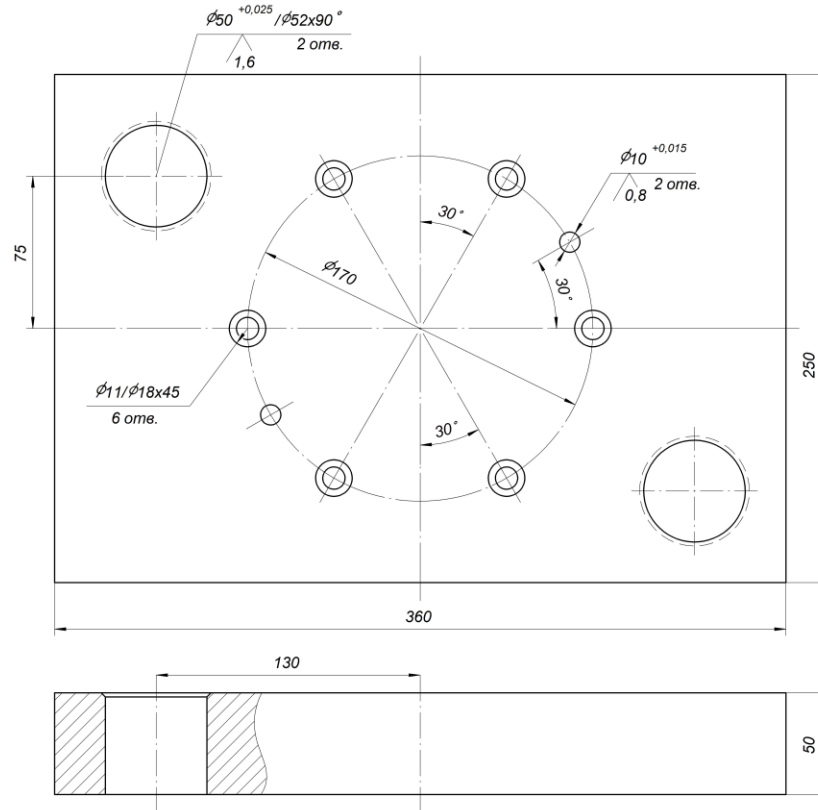


Рисунок Г.1 – Чертеж верхней плиты (позиция 1)

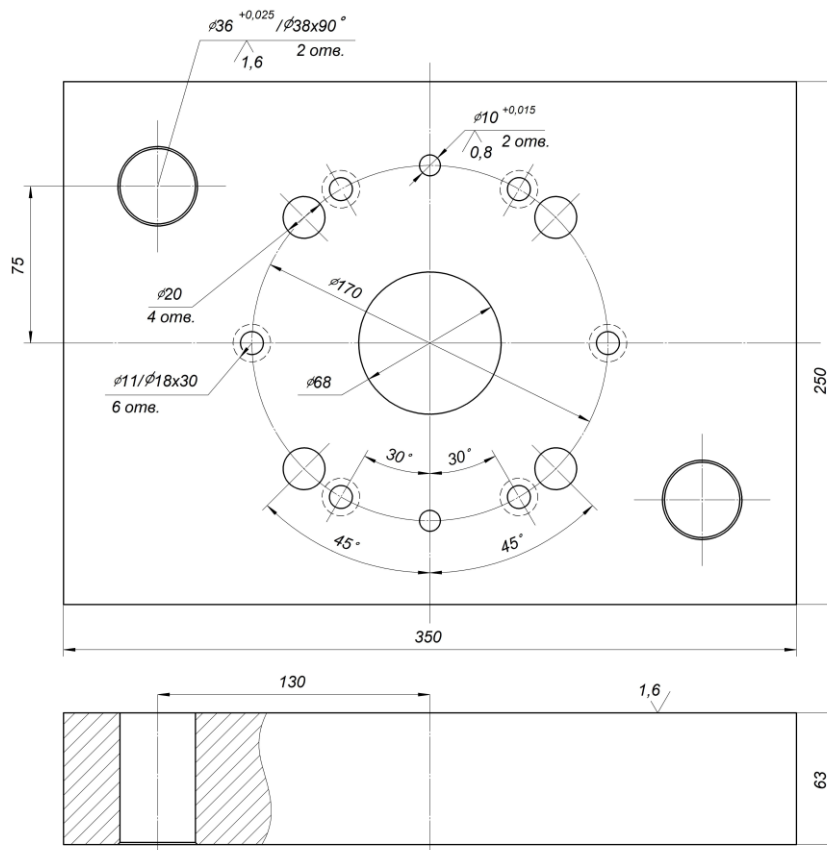


Рисунок Г.2 – Чертеж нижней плиты (позиция 2)

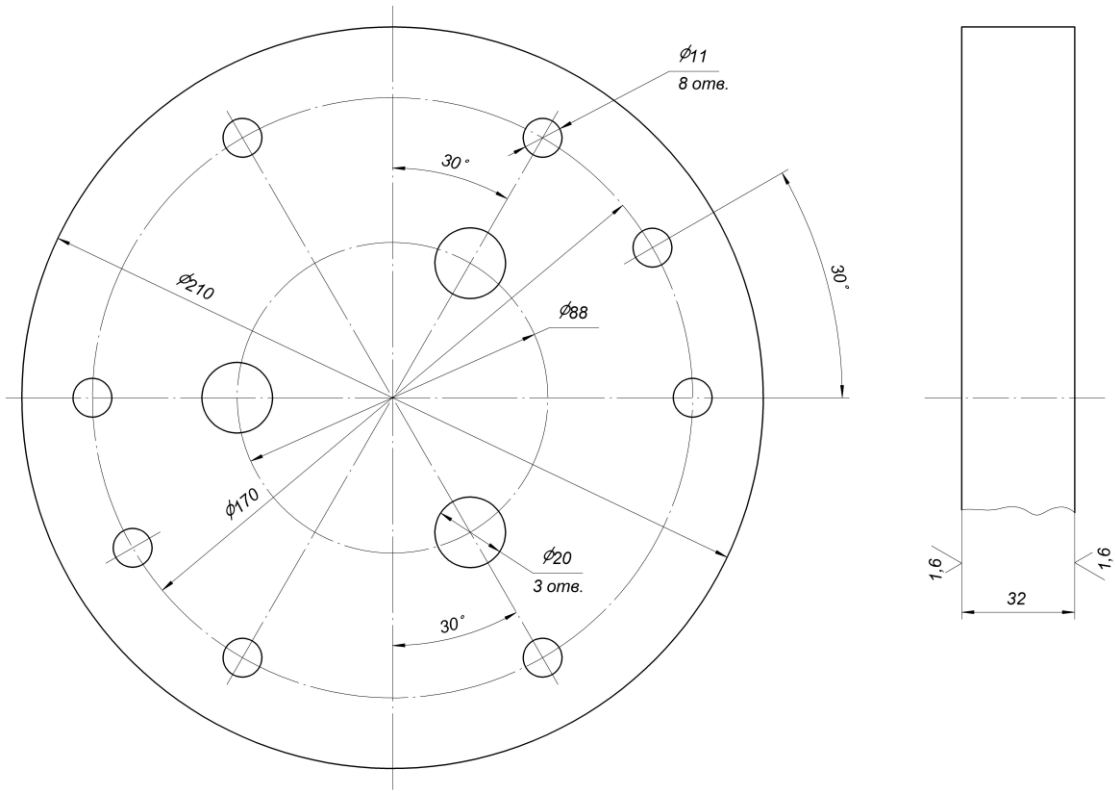


Рисунок Г.3 – Чертеж прокладки (позиция 3)

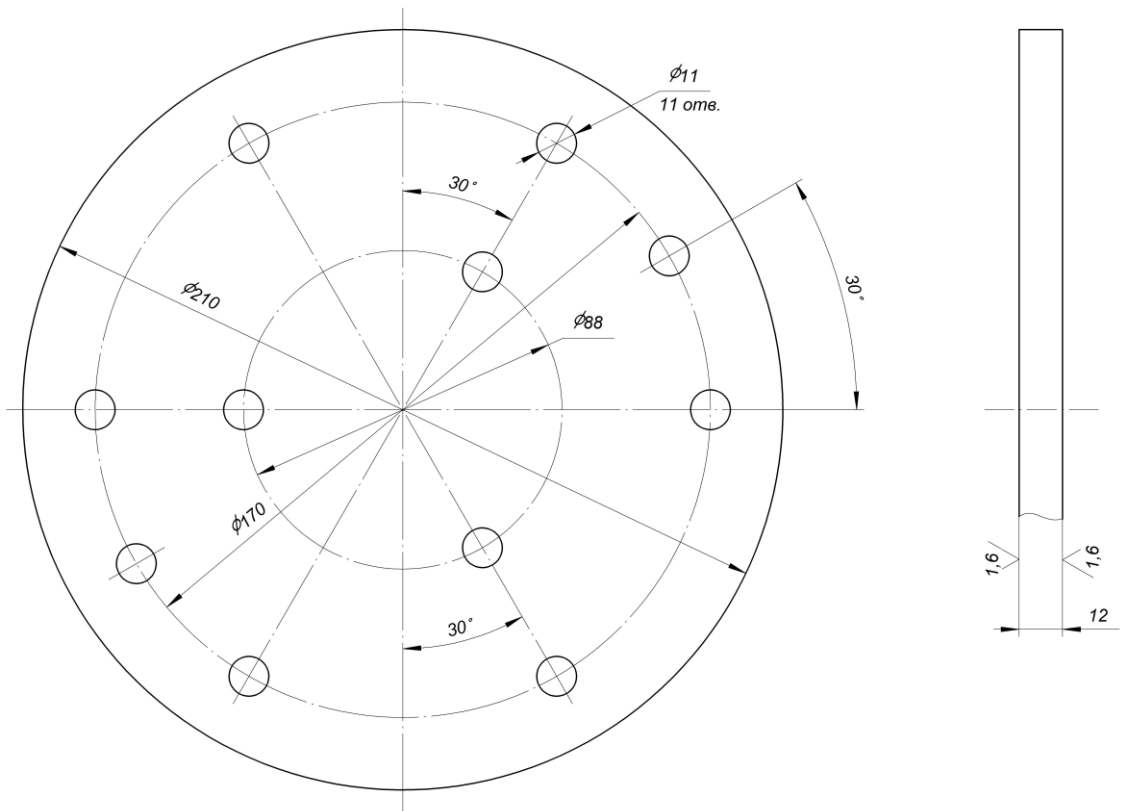


Рисунок Г.4 – Чертеж прокладки (позиция 4)

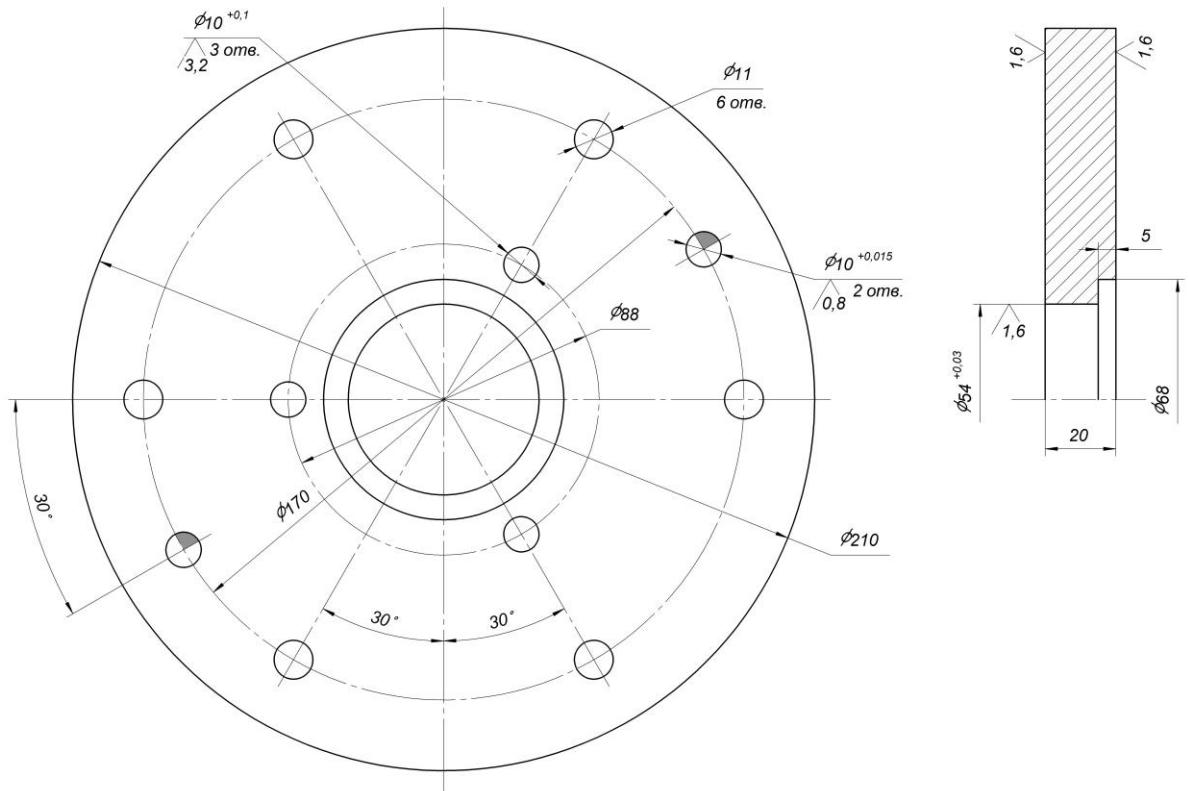


Рисунок Г.7 – Чертеж пуансонодержателя (позиция 5)

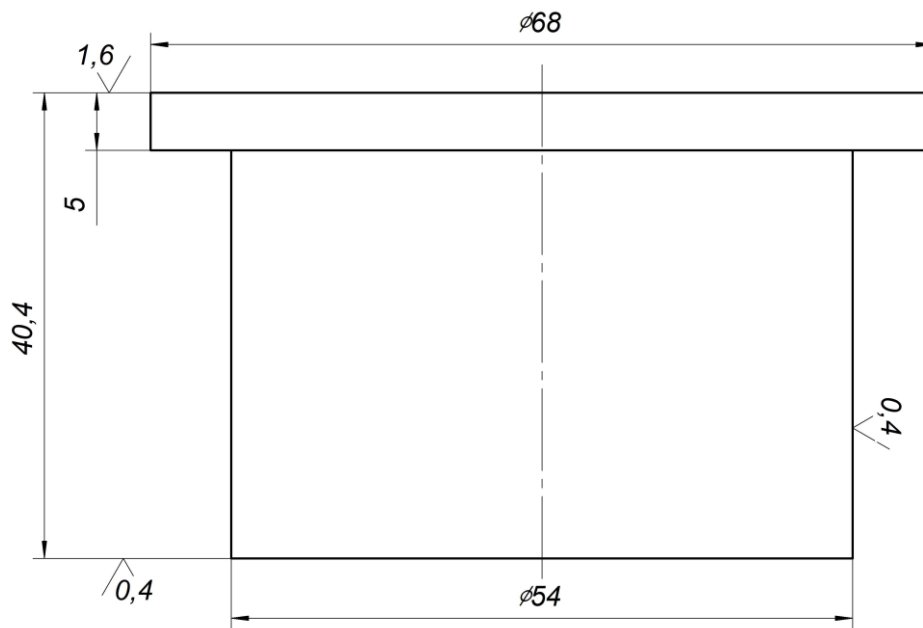


Рисунок Г.8 – Чертеж пуансона (позиция 7)

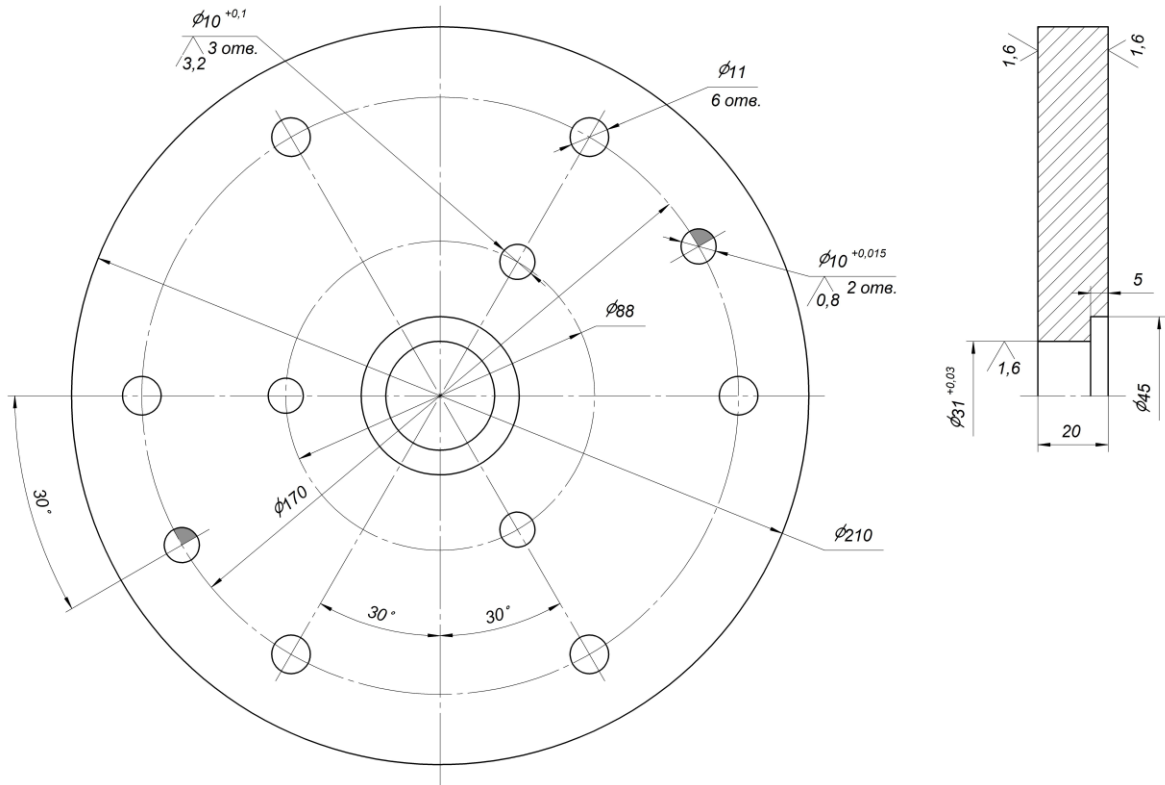


Рисунок Г.9 – Чертеж пуансонодержателя (позиция 16)

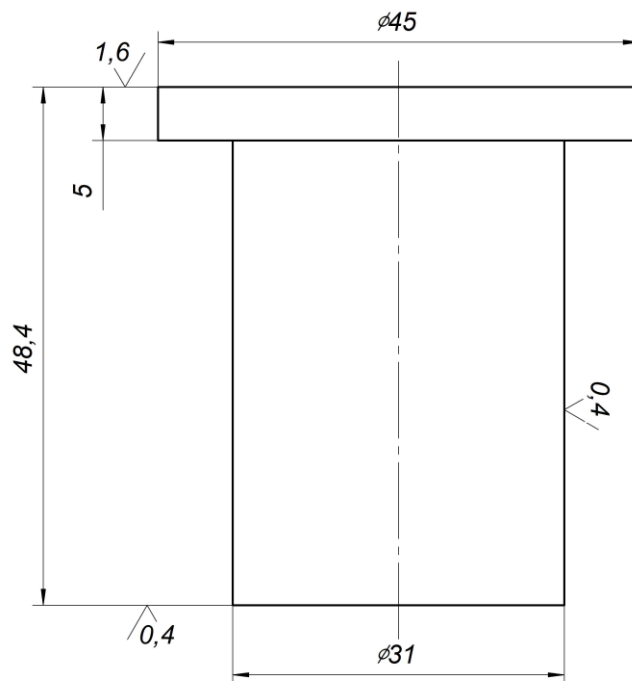


Рисунок Г.10 – Чертеж пуансона (позиция 17)

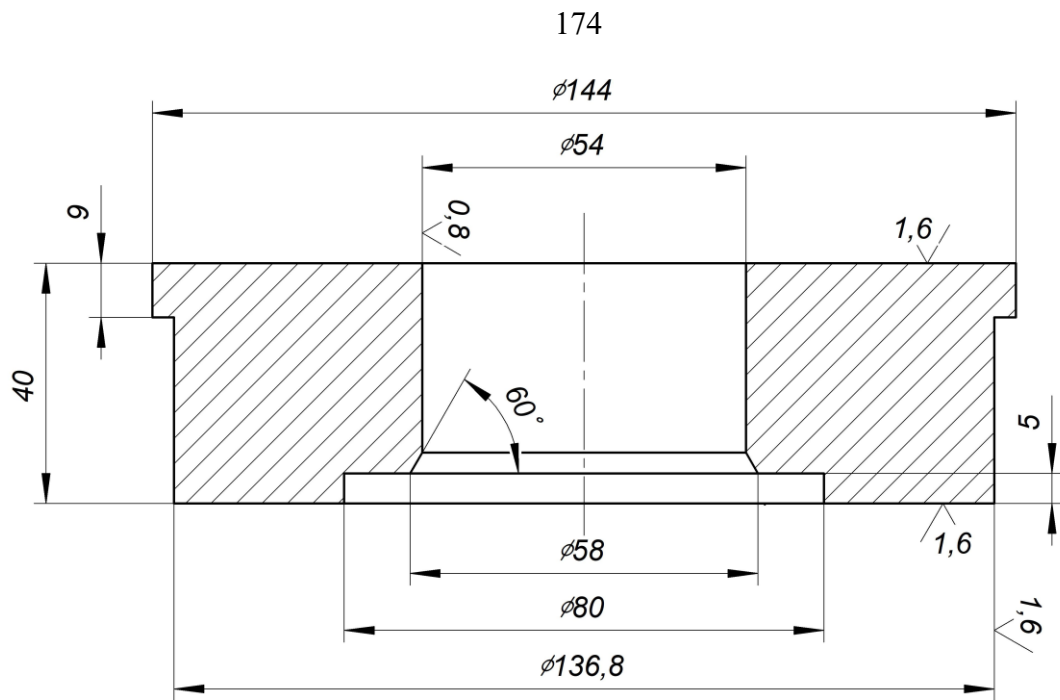


Рисунок Г.11 – Чертеж выталкиватель (позиция 8)

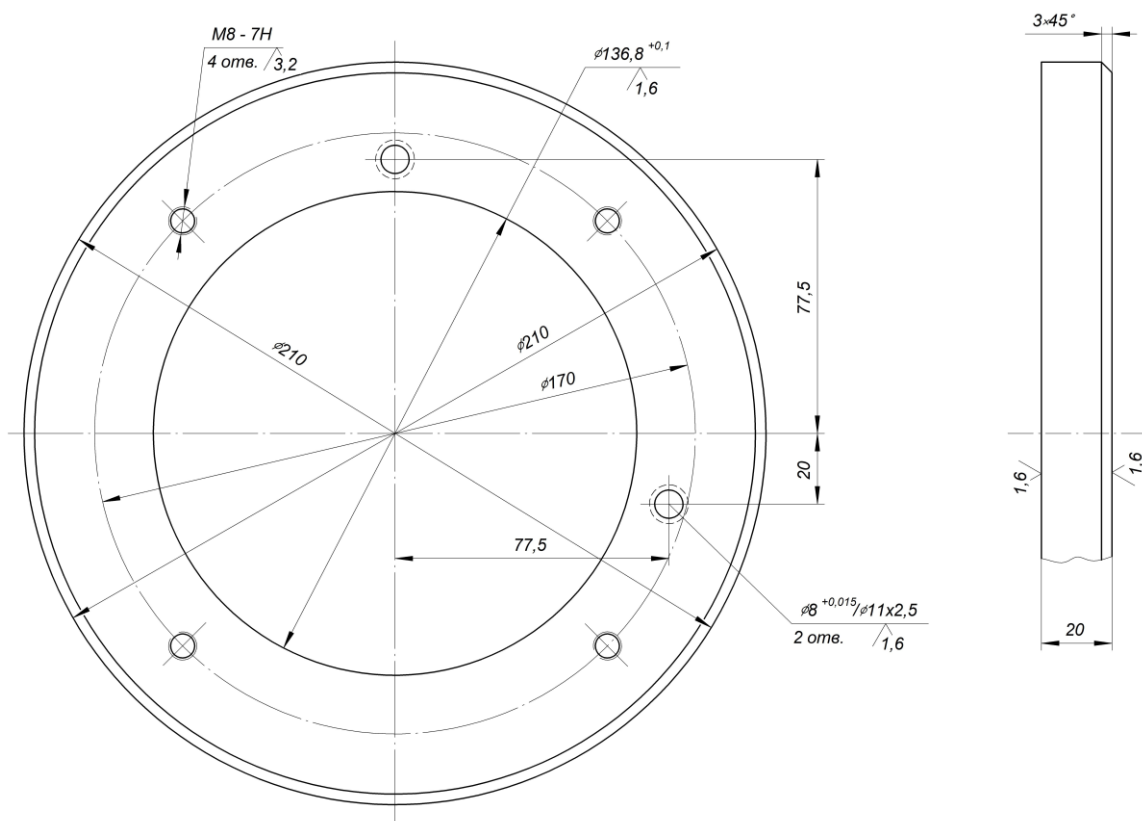


Рисунок Г.12 – Чертеж съемника (позиция 9)

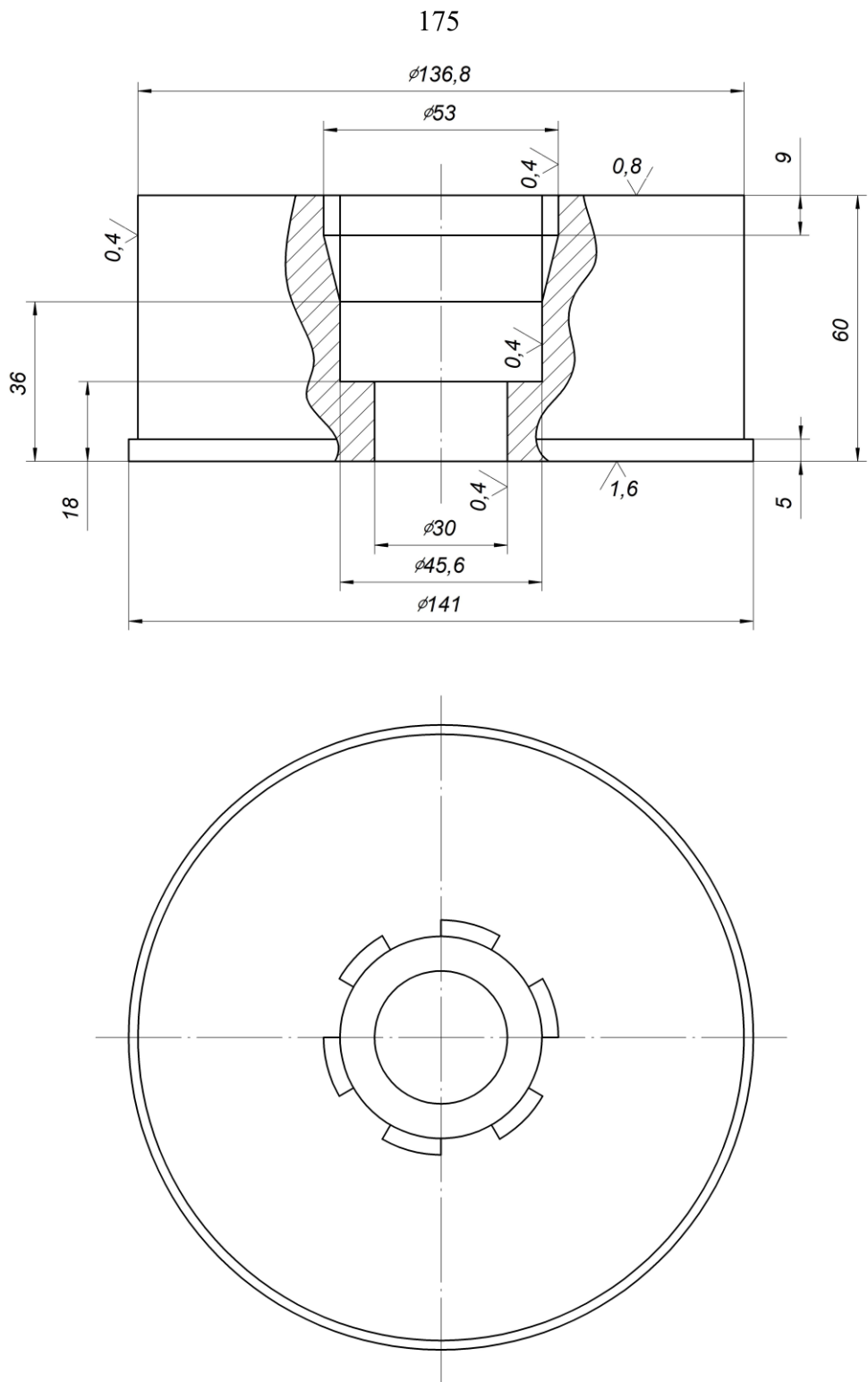


Рисунок Г.13 – Чертеж пуансономатрицы (позиция 10)

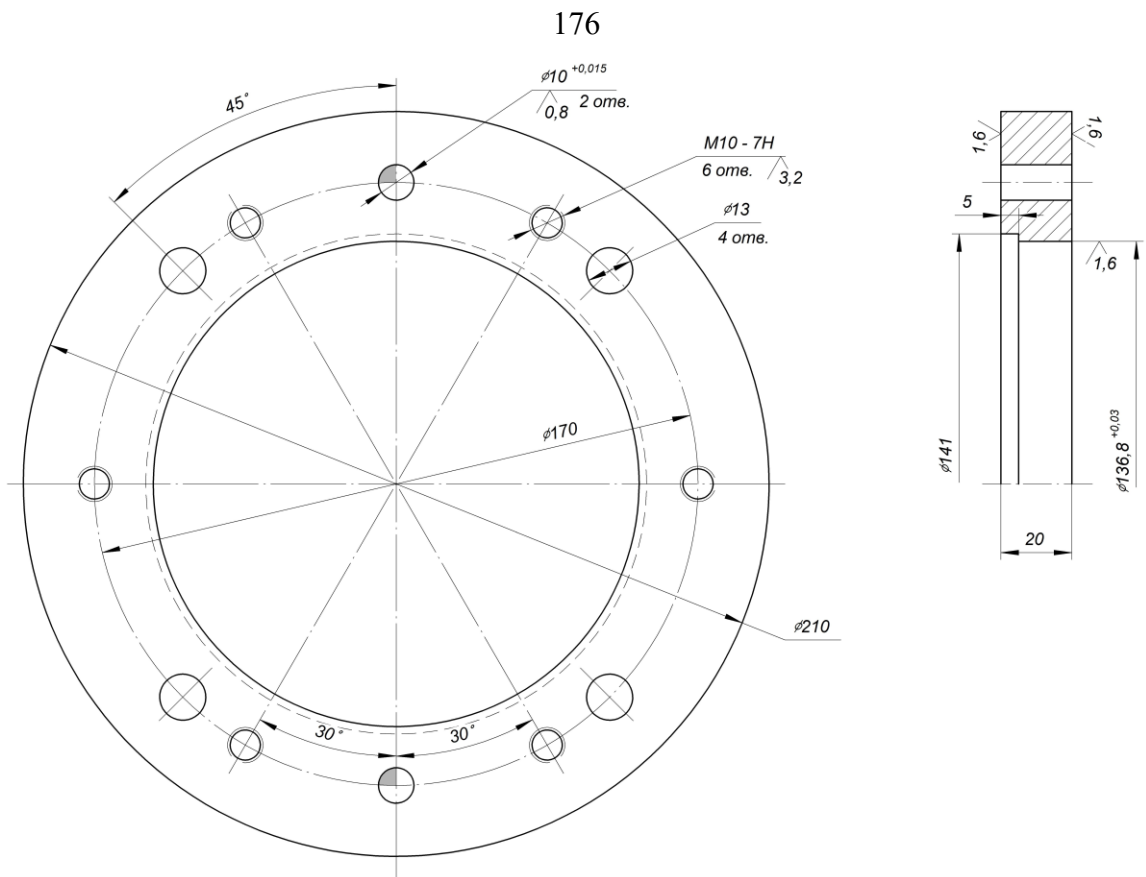


Рисунок Г.14 – Чертеж держателя (позиция 11)

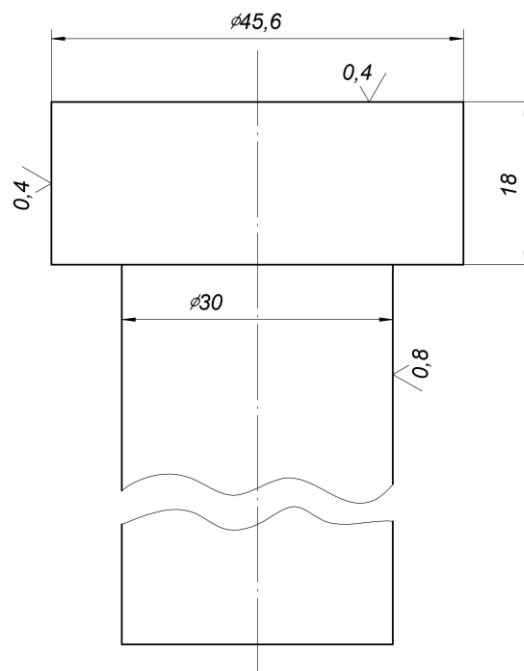


Рисунок Г.15 – Чертеж нижнего выталкивателя (позиция 12)

177

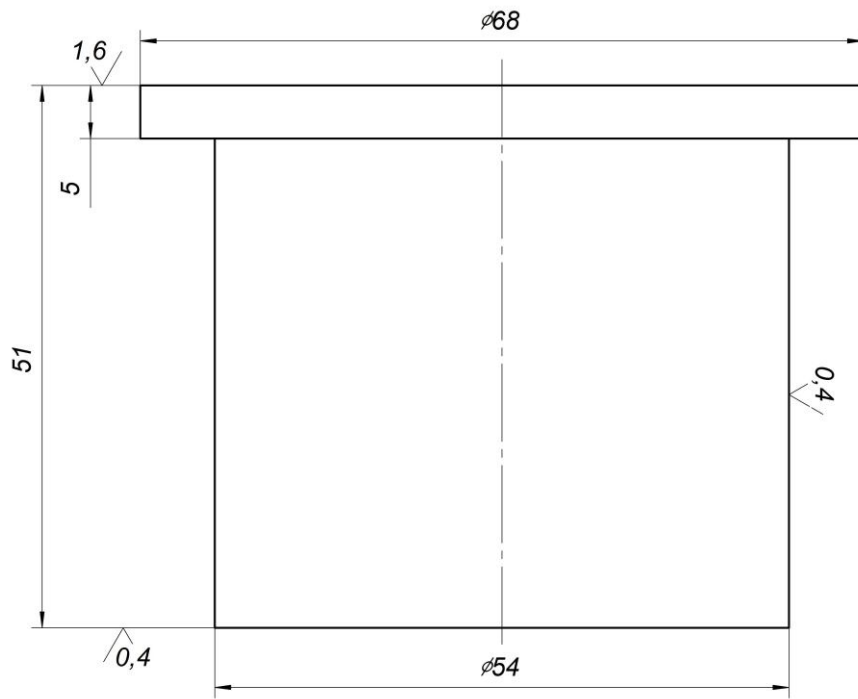


Рисунок Г.16 – Чертеж пуансона (позиция 18)

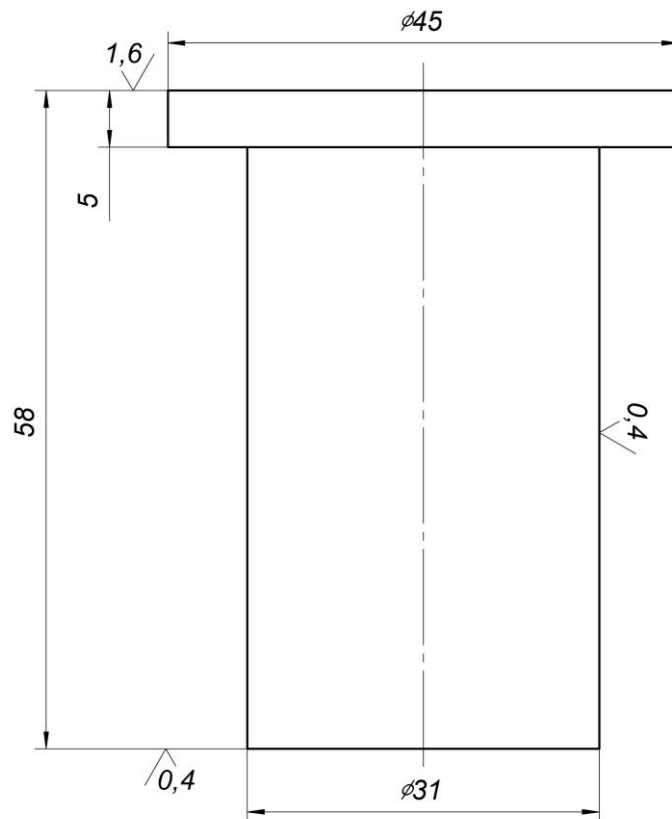


Рисунок Г.17 – Чертеж пуансона (позиция 21)

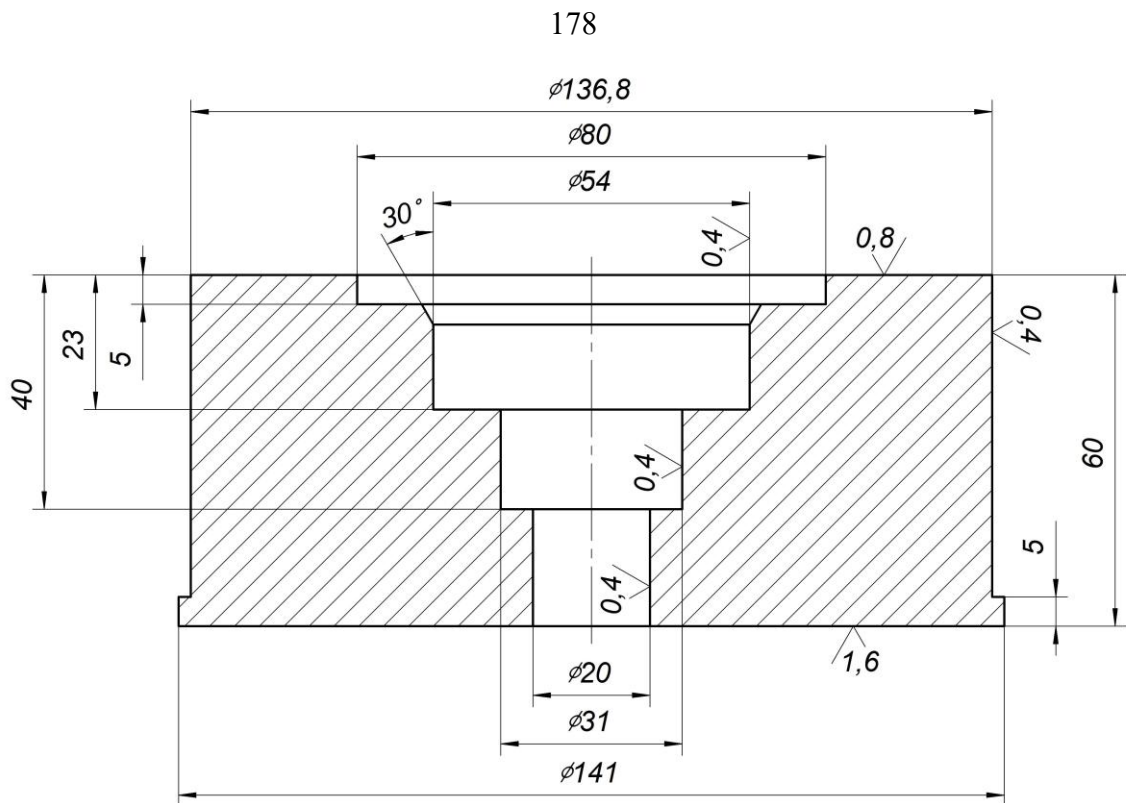


Рисунок Г.18 – Чертеж пуансономатрицы (позиция 19)

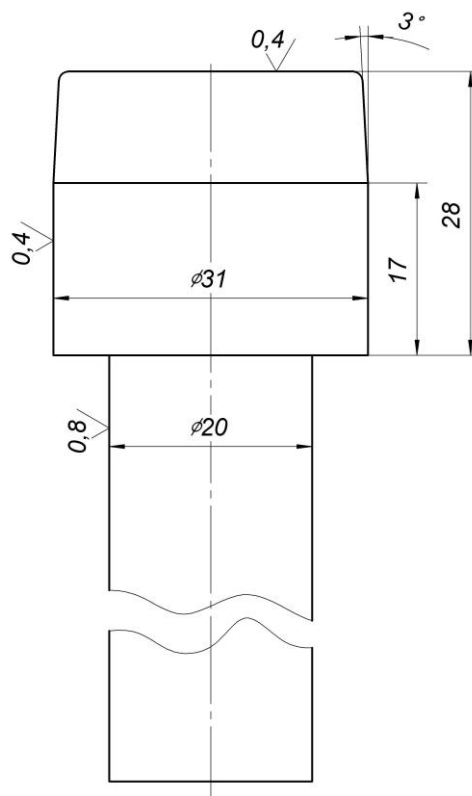


Рисунок Г.12 – Чертеж нижнего выталкивателя (позиция 12)