

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»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2026

Работа выполнена на кафедре «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский политехнический университет», г. Москва.

- Научный руководитель:** **Филиппов Юлиан Кириллович,** доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский политехнический университет», г. Москва
- Официальные оппоненты:** **Евсюков Сергей Александрович,** доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологии обработки давлением» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» (национальный исследовательский университет)», г. Москва
- Лисунец Николай Леонидович,** кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Обработка металлов давлением» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва
- Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет», г. Тула

Защита диссертации состоится 22 сентября 2026 г. в 14.00 на заседании диссертационного совета 24.2.332.01, созданного на базе ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»» по адресу: 127055, г. Москва, Вадковский переулок, д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» и на сайте: <https://stankin.ru/nauka-i-innovatsii/dissertatsionnye-sovety-i-doktorantura/dissertatsionnye-sovety/24-2-332-01-d-212-142-01/le-chung-zung/index.php>.

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, заверенные гербовой печатью учреждения (организации), просим направить по указанному адресу в диссертационный совет 24.2.332.01 на имя ученого секретаря совета.

Автореферат разослан «___» _____ 2026г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.2.332.01, к.т.н, доц.



Е.С. Сотова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Стремительное развитие машиностроения требует внедрения технологий, обеспечивающих высокое качество деталей при одновременном снижении материалоемкости, энергоемкости и трудоемкости производства. Особое значение приобретают процессы обработки давлением, среди которых холодная объемная штамповка (ХОШ) занимает одно из ведущих мест благодаря высокой точности формообразования, улучшенному качеству поверхности и упрочнению материала в процессе деформации.

При всех преимуществах ХОШ ее применение осложняется ростом сил деформирования, наклепом и снижением пластичности материала. Поэтому для повышения эффективности процессов необходимы научно обоснованные методы проектирования, включающие анализ напряженно-деформированного состояния, изменение механических свойств и расчет технологических параметров. В этих условиях особую роль играет использование математического моделирования, конечно-элементных симуляций (QForm) и САПР-технологий, позволяющих оптимизировать геометрию инструмента, выбирать рациональные режимы деформирования и прогнозировать характеристики готовых изделий.

Анализ производственной практики показывает, что изготовление деталей типа «ступица» диска сцепления во многих предприятиях все еще основано на традиционных технологических маршрутах – литье и механической обработке, отличающихся высокой трудоемкостью, большими припусками и значительными потерями металла. В то же время комбинированное выдавливание заготовок с фланцем является перспективным направлением развития ХОШ, позволяющим снизить расход материала, повысить ресурс детали и улучшить качество формообразования.

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., Калымжый 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., Мерклейн М. и др.

В данной диссертационной работе деталь типа «ступица» рассматривается как сложное составное изделие, формируемое методом холодной объёмной 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 учётом 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 объёма последующей механической обработки и уменьшение отходов металла, что способствует повышению эффективности и снижению трудоёмкости процессов холодной объёмной 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.

Для достижения цели научной работы были поставлены и 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 объёмной штамповки за счёт комбинированного выдавливания, с учётом изменения механических свойств материала.

Объект исследования – Процессы пластического деформирования металлов при холодной объёмной 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 стали 10 и стали 20, позволяющий прогнозировать свойства деталей, получаемых методом холодной объёмной 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 неразъёмного 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 тарифовочных 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 исследованы и переданы в производстве 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 статей 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введение обоснована актуальность темы, цели и задачи диссертационной работы, приведены объект и предмет исследования, научная новизна, практическая значимость, методы исследования и основные положения, выносимые на защиту, краткое содержание диссертации.

В первой главе приводится обзор литературных источников, связанных с изучаемыми вопросами: классификация деталей, получаемых холодной объёмной

штамповкой; исследование процессов прямого, обратного, радиального и комбинированного выдавливания; классификация типовых деталей с фланцем; методы исследования напряженно-деформированного состояния металла при холодной объемной штамповке; технологические подходы к производству ступиц. Исследованию процессов выдавливания посвящены работы Е.Н. Сосенушкина, А.Ю. Рыбина, А.В. Молодова, Л.И. Алиевой, В.Л. Калымжного, А.Л. Воронцова, В.А. Головина, Ю.К. Филиппова, Г.А. Данилина, Д.С. Филина, Б. В. Петрова, С.Н. Ларина, В.Н. Чудина, А.В. Черняева и других исследователей. Данным вопросом занимались зарубежные исследователи Т.Ч. Нгуен, Ф.В. Нгок, Жд. Геннеберг, М. Мерклейн.

В данной главе проводится анализ методов исследования напряженно-деформированного состояния металла при холодной объемной штамповке. Приводится обзор литературных источников, посвященных исследованию влияния деформации и схемы деформирования на прочностные характеристики.

Из обзора литературных источников, приведенных в главе, следует, что отсутствует исследования влияния изменения механических свойств, в частности прочностных характеристик, в процессе деформации и геометрии инструмента на технологическую силу деформации.

В главе рассмотрены технологические подходы к производству деталей типа «ступица». Показано, что выбор конкретного метода изготовления определяется требованиями к точности, эксплуатационным характеристикам и экономической эффективности.

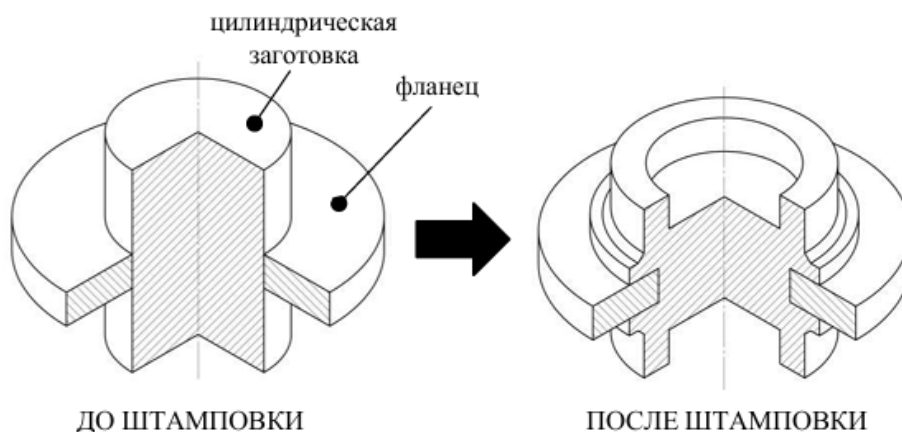


Рисунок 1 – Сложное составное изделие «ступица»

В диссертационной работе деталь типа «ступица» рассматривается как сложное составное изделие (рис. 1), формируемое методом холодной объёмной штамповки при комбинированном выдавливании цилиндрической заготовки с последующим неразъёмным соединением с фланцем. При этом основная пластическая деформация и изменение механических свойств реализуются в цилиндрической заготовке, тогда как фланец, выполненный из более трудно деформируемого материала, участвует в формообразовании в минимальной степени, что и определяет направление дальнейших исследований.

В заключение главы проводится оценка неисследованных и актуальных вопросов, выявленных в обзоре литературы и существующих исследований, на основании которых поставлены основная цель настоящей работы, направленная на решение обозначенных задач и совершенствование технологии.

Во второй главе выполнен теоретический анализ процесса комбинированного выдавливания заготовки типа «стакан с фланцем» путем разработки математической модели на основе метода баланса мощности с учетом изменения механических свойств. Разработанная математическая модель позволяет оперативно определять силы деформирования и оценивать влияние геометрических и технологических параметров на процесс формирования заготовки типа «стакан с фланцем», который является ключевым этапом при получении сложного составного изделия типа «ступица». Полученная модель применяется для анализа и обоснования технологии изготовления конкретного изделия – ступицы диска сцепления автомобиля – в главе 5.

Для автоматизации расчетов разработана вычислительная программа на языке С#.

В изучаемом процессе (рис. 2) можно условно выделить два этапа.

На первом этапе осуществляется осадка заготовки (рис. 2а). После этого происходит заполнение конической полости матрицы (рис. 2б), сопровождающееся радиальным выдавливанием материала. Если исходный радиус исследуемой заготовки равен внутреннему радиусу матрицы, процесс осадки можно не учитывать. На втором этапе осуществляется комбинированное выдавливание (рис. 2в), которое начинается приблизительно с момента полного заполнения конической полости матрицы, и продолжается до момента, когда пуансон окажется в точке с координатой равной толщине фланца.

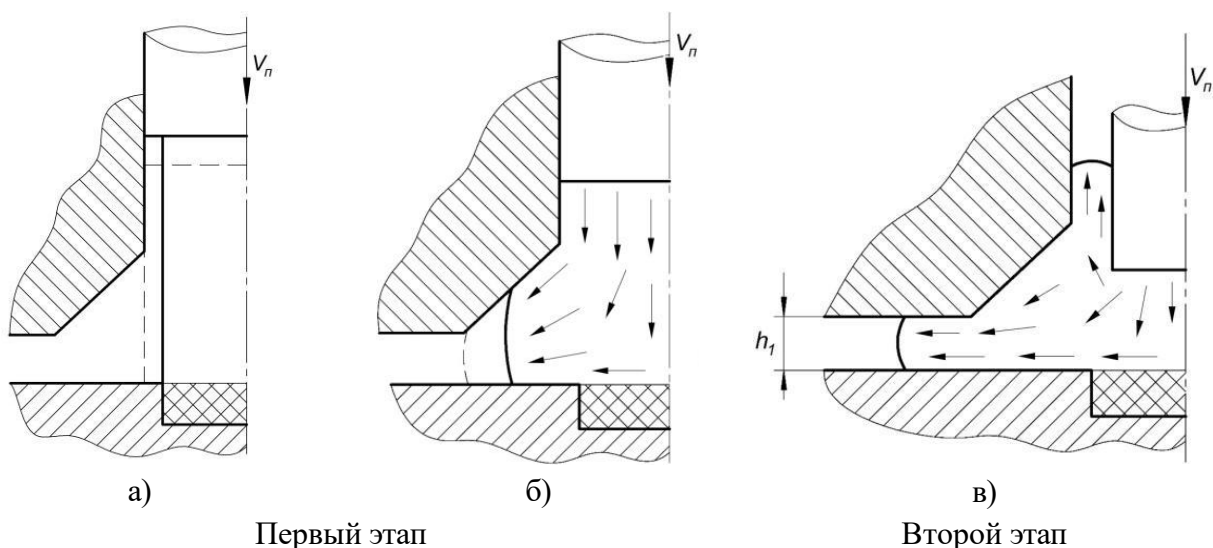


Рисунок 2 – Характерные схемы процесса радиального и обратного выдавливания в конической матрице: а – осадка (первый этап); б – радиальное выдавливание (первый этап); в – комбинированное выдавливание (второй этап)

Метод баланса мощностей позволяет определить допустимое поле скоростей в каждой зоне очага деформации. На рис. 3 представлена расчетная схема для изучаемого процесса каждого этапа. Используем цилиндрическую систему координат ρ, θ, z (ось z – ось очага деформации).

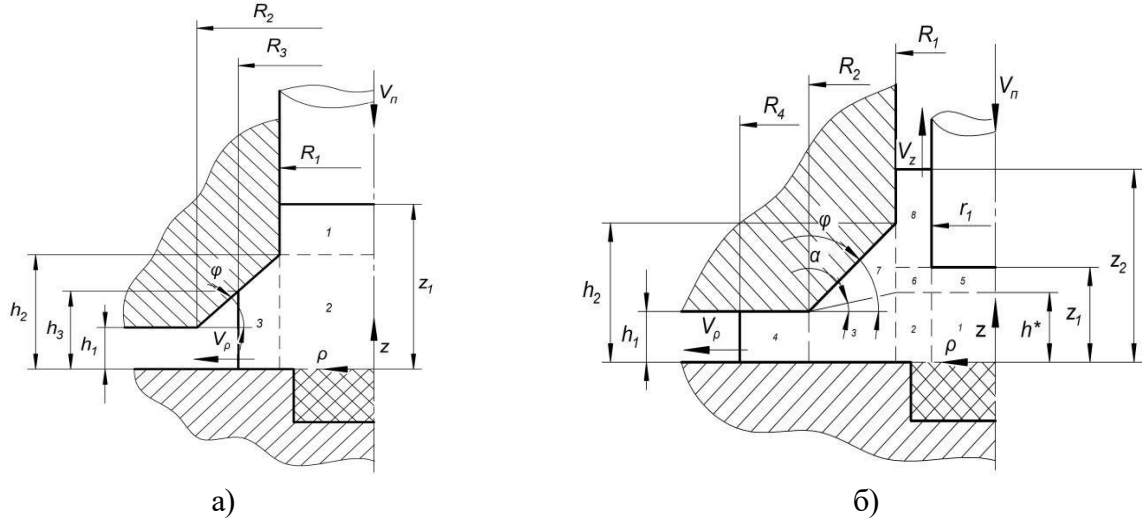


Рисунок 3 – Расчетная схема для: а – процесса радиального выдавливания первого этапа; б – процесса комбинированного выдавливания второго этапа

Кинематически допустимое поле скоростей должно удовлетворять граничным условиям и условию постоянства объема в каждой точке очага деформации.

Для определения силы деформирования было составлено уравнение энергетического баланса мощности внешних и внутренних сил на кинематически возможном поле скоростей:

$$p \cdot F \cdot V_0 = \sum W_{\partial} + \sum W_{mp} + \sum W_{cp} \quad (1)$$

Мощность пластической деформации определяется по следующей формуле:

$$W_{\partial} = \iiint_{V_{\partial}} \sigma_i \cdot \dot{\varepsilon}_i \cdot dV_{\partial} \quad (2)$$

где σ_i – напряжение текучести с учетом упрочнения, полученное степенной аппроксимацией функции $\sigma_i = \sigma_0 + A \cdot \varepsilon_n^n$, где ε_n – накопленная деформация.

Мощность сил трения определяется:

$$W_{mp} = \iint_{F_{mp}} \tau_{mp} |V_{ск}| dF_{mp} \quad (3)$$

где $\tau_{mp} = \sigma_i \cdot \mu$, μ – коэффициент трения; $V_{ск}$ – относительная скорость скольжения материалов на поверхности; F_{mp} – контактная площадь.

Мощность сил среза находится по формуле:

$$W_{cp} = \iint_{F_{cp}} \tau_{cp} |V_{cp}| dF_{cp} \quad (4)$$

где $\tau_{cp} = k = \sigma_s / \sqrt{3}$ – напряжение текучести на сдвиг, МПа; $V_{cp} = |V_k^{[2]} - V_k^{[1]}|$ – модуль разности касательных составляющих скорости до и после границы; F_{cp} – площадь поверхности среза.

Для оценки применимости разработанной математической модели комбинированного выдавливания были проведены расчеты силы деформирования при различных исходных условиях заготовки. В качестве материалов заготовок выбраны конструкционные стали 10, 15, 20 и 22 (рис. 4).

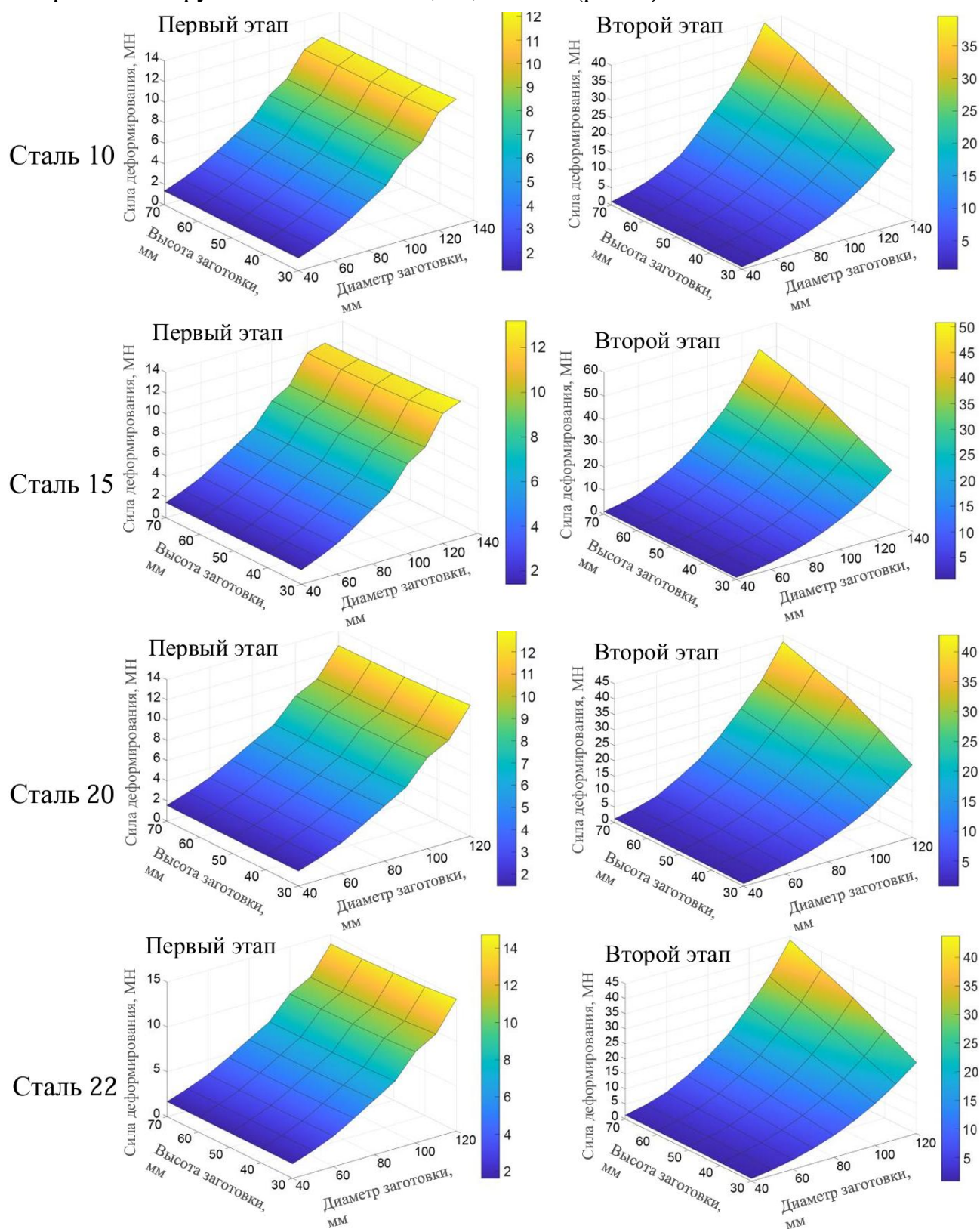
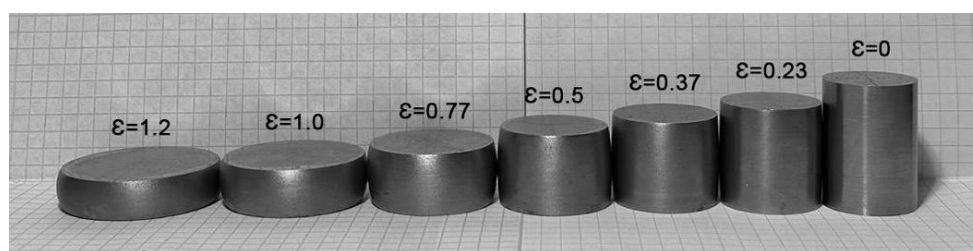


Рисунок 4 – Зависимость значения силы деформирования от геометрических размеров заготовки из различных сталей

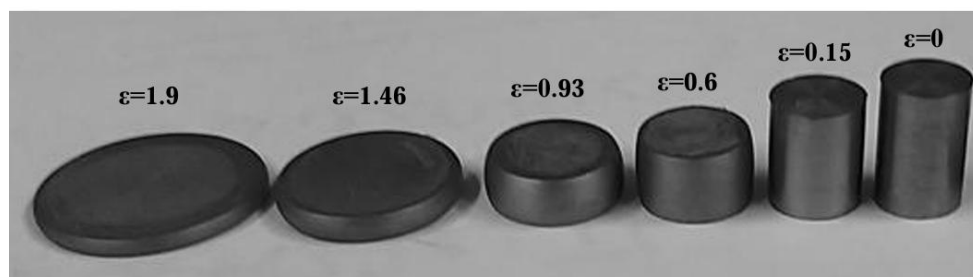
В третьей главе исследовано напряжённо-деформированное состояние материалов при пластическом деформировании. На основе результатов осадки цилиндрических образцов построены кривые упрочнения, позволяющие количественно описать зависимость сопротивления деформации от степени пластической деформации. Полученные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

С целью оценки применимости разработанной математической модели выполнено сопоставление результатов аналитических расчётов и конечно-элементного моделирования в программном комплексе QForm. Проведённый анализ позволил подтвердить обоснованность использования аналитической модели, а также оценить влияние геометрических параметров инструмента и технологических условий на величину силы деформирования. Полученные зависимости используются для прогнозирования энергосиловых параметров процесса и выбора рациональных геометрических параметров инструмента при комбинированном выдавливании заготовки типа «стакан с фланцем» в составе исследуемого изделия «ступица».

Для испытания были использованы сталь 10 и сталь 20. В качестве заготовок использовался прокат стальной горячекатаный круглый по ГОСТ 2590-88. Из проката было изготовлено 7 цилиндрических образцов из стали 10 диаметром 25 мм высотой 35 мм и 6 образцов из стали 20 диаметром 10 мм высотой 15 мм (рис. 5). Они осаживались до различных степеней деформации каждого образца. Осадка производилась на гидравлическом прессе модели EU-100, развивающим скорость при рабочем ходе $\approx 0,1$ мм/сек.



Сталь 10



Сталь 20

Рисунок 5 – Результаты осадки цилиндрических образцов

После аппроксимации кривой упрочнения получены эмпирические формулы

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

для стали 20: $\sigma = 245 + 530,8 \cdot \varepsilon^{0,4023}$ (6)

На рис. 6 представлена кривая упрочнения стали 10 и 20 по эмпирической формуле.

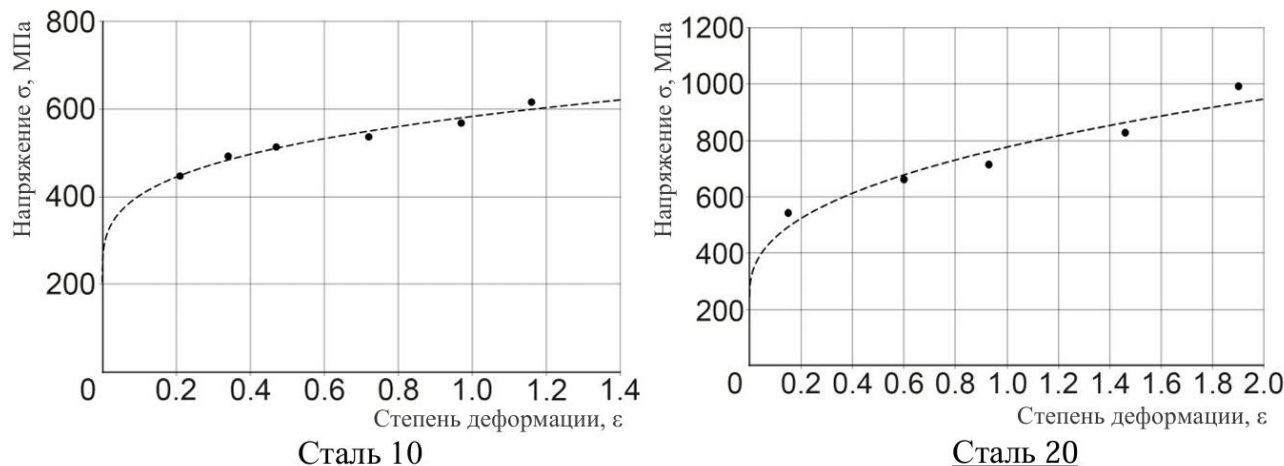


Рисунок 6 – Кривые упрочнения по эмпирической формуле для стали 10 и стали 20

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, приведенной во второй главе.

На рис. 7 представлена диаграмма изменения силы деформирования в исследуемом процессе радиального и обратного выдавливания в зависимости от хода инструмента (пуансона).

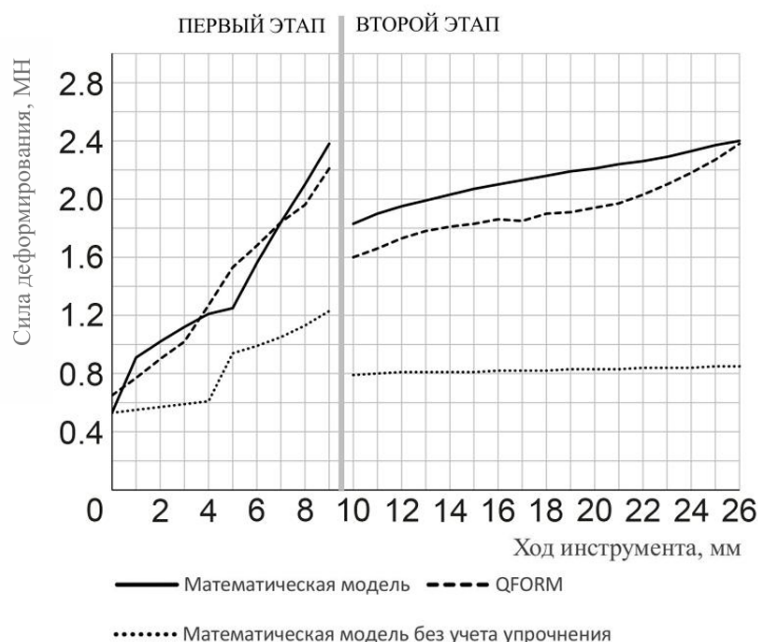


Рисунок 7 – Диаграмма изменения силы деформирования в зависимости от хода инструмента

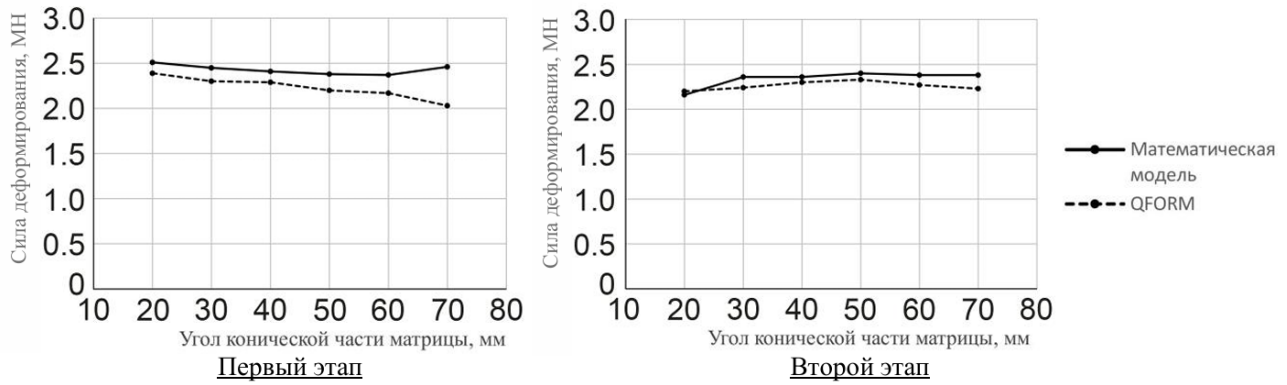


Рисунок 8 – Диаграммы максимальной силы деформирования в зависимости от угла конической части матрицы

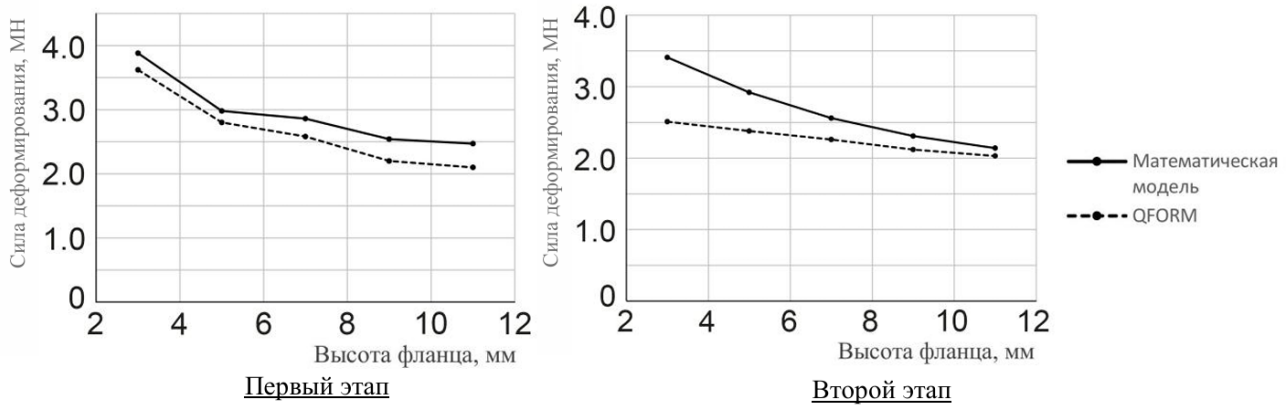


Рисунок 9 – Диаграммы максимальной силы деформирования в зависимости от высоты фланца

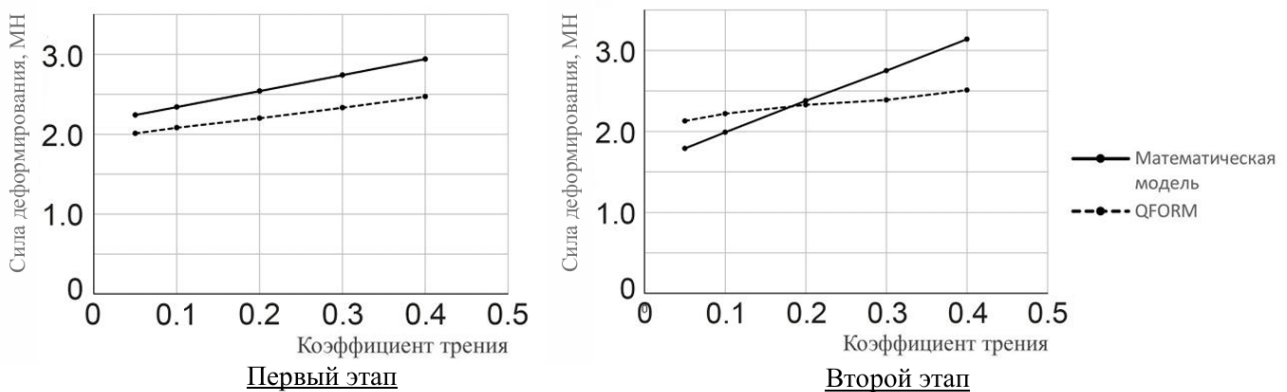


Рисунок 10 – Диаграммы максимальной силы деформирования в зависимости от коэффициента трения

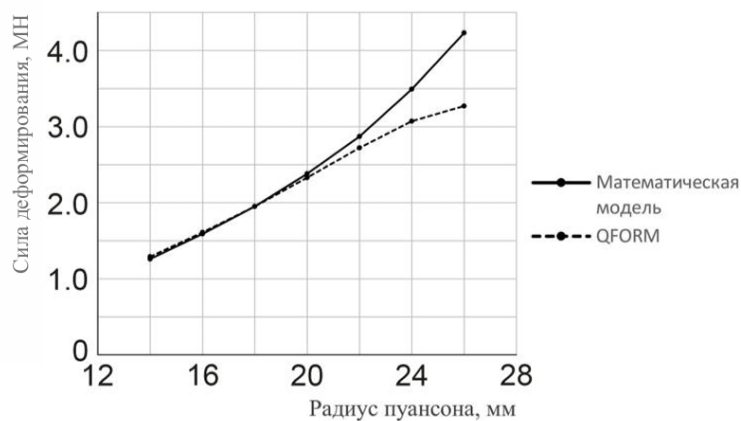


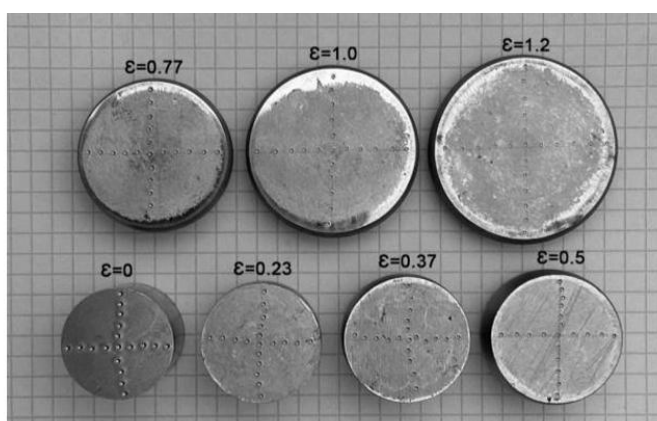
Рисунок 11 – Диаграмма максимальной силы деформирования в зависимости от радиуса пуансона на втором этапе

На рис. 8–11 представлены диаграммы максимальной силы деформирования на каждом этапе процесса в зависимости от геометрических соотношений инструмента и условий процесса.

В четвертой главе представлены результаты экспериментального исследования зависимости твердости деформированного металла от интенсивности напряжений и степени пластической деформации. Для сталей 10 и 20 построены тарировочные зависимости твердости, которые используются для анализа процессов упрочнения цилиндрической заготовки – основного деформируемого элемента при формировании сложного составного изделия типа «ступица». Полученные экспериментальные данные также служат основой для прогнозирования распределения механических свойств изделия на этапе численного моделирования в программном комплексе QForm.

Выполнены экспериментальные замеры величин твердости на торцевой поверхности в различных местах образцов из стали 10 и 20 (рис. 12) с помощью прибора тип Роквелл мод. TP-5006 по шкале В ГОСТ 9013-59.

Сталь 10



Сталь 20

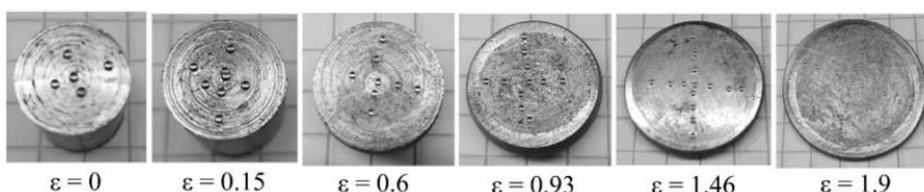


Рисунок 12 – Результаты замеров твердости на торцевой поверхности образцов из стали 10 и стали 20 в различных местах

На рис. 13 и 14 представлены тарировочные графики твердости в зависимости от степени деформации и интенсивности напряжений для сталей 10 и 20.

После выполнения аппроксимации получена зависимость твердости (HRB) от степени деформации и интенсивности напряжений, представленная в следующем виде:

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

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

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

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

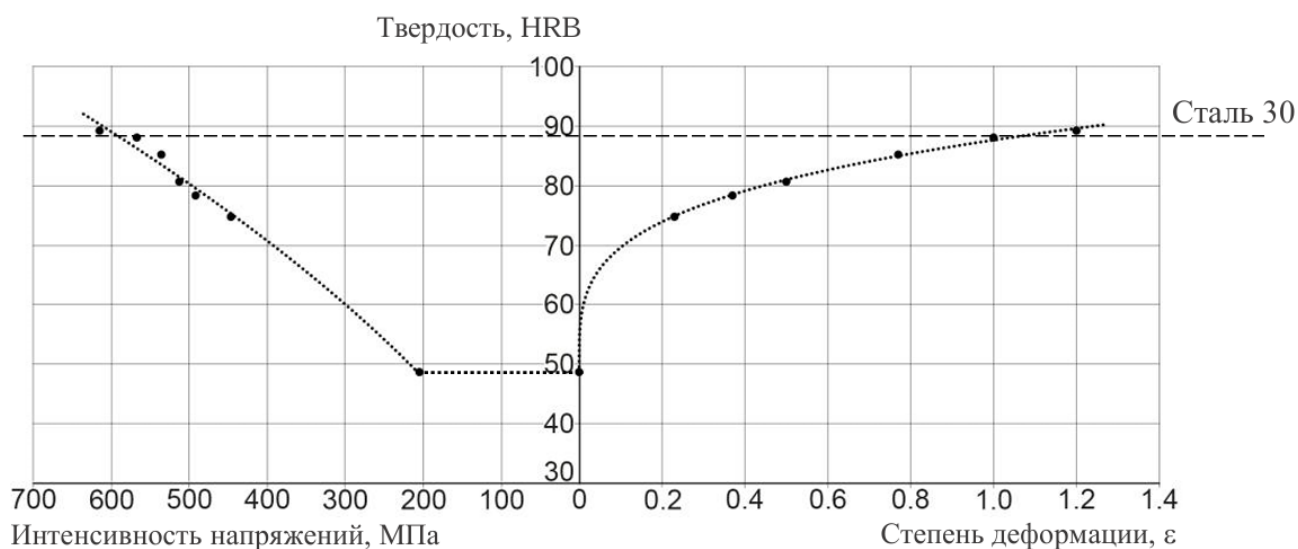


Рисунок 13 – Тарировочный график зависимости твердости HRB от деформации и напряжения для стали 10

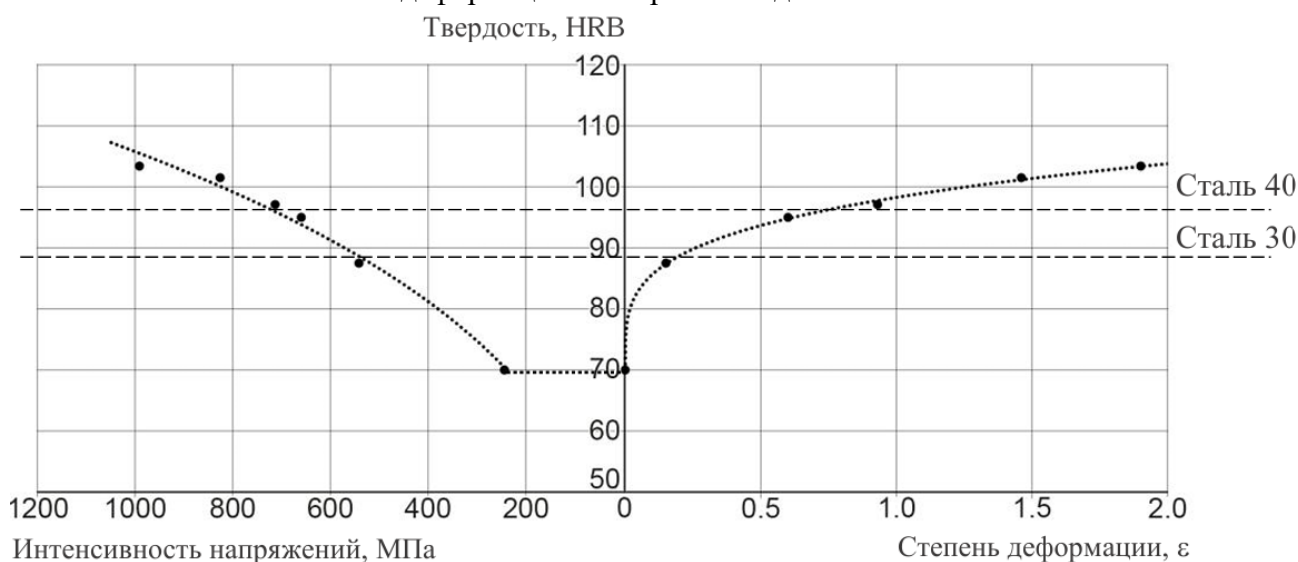


Рисунок 14 – Тарировочный график зависимости твердости HRB от деформации и напряжения для стали 20

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.

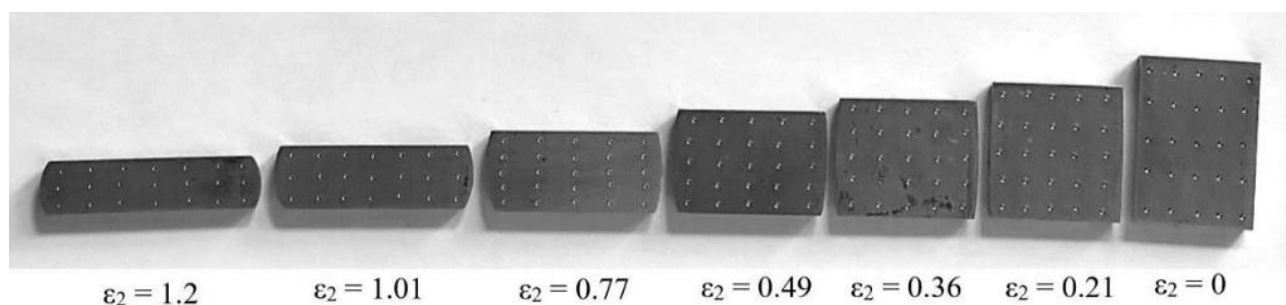


Рисунок 15 – Результаты замеров твердости на поверхности разреза вдоль оси в различных местах для стали 10

Выполнены экспериментальные замеры величин твердости на поверхности разреза вдоль оси в различных местах образцов из стали 10 (рис. 15) с помощью прибора тип Роквелл мод. ТР-5006 по шкале В ГОСТ 9013-59.

На рис. 16 представлен 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.

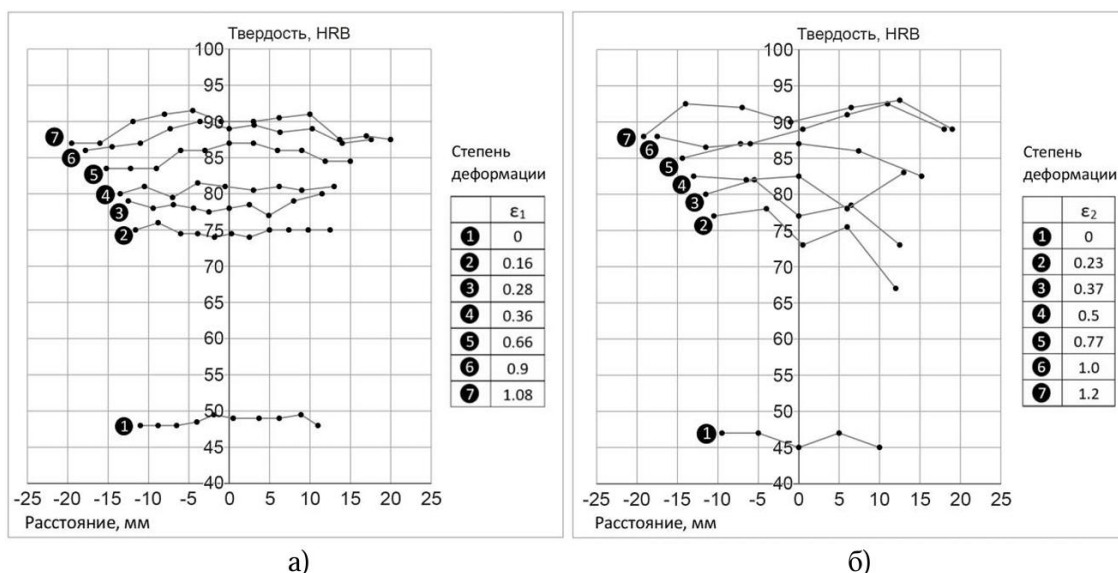


Рисунок 16 – Графики измерений твердости на торцевой поверхности (а) и на разрезе вдоль оси (б) образцов в зависимости от величины осадки и величины деформации

На рис. 17 представлен график изменения твёрдости в зависимости от степени деформации и интенсивности напряжений при осадке цилиндрических образцов из стали 10, полученный для различных зон измерения.

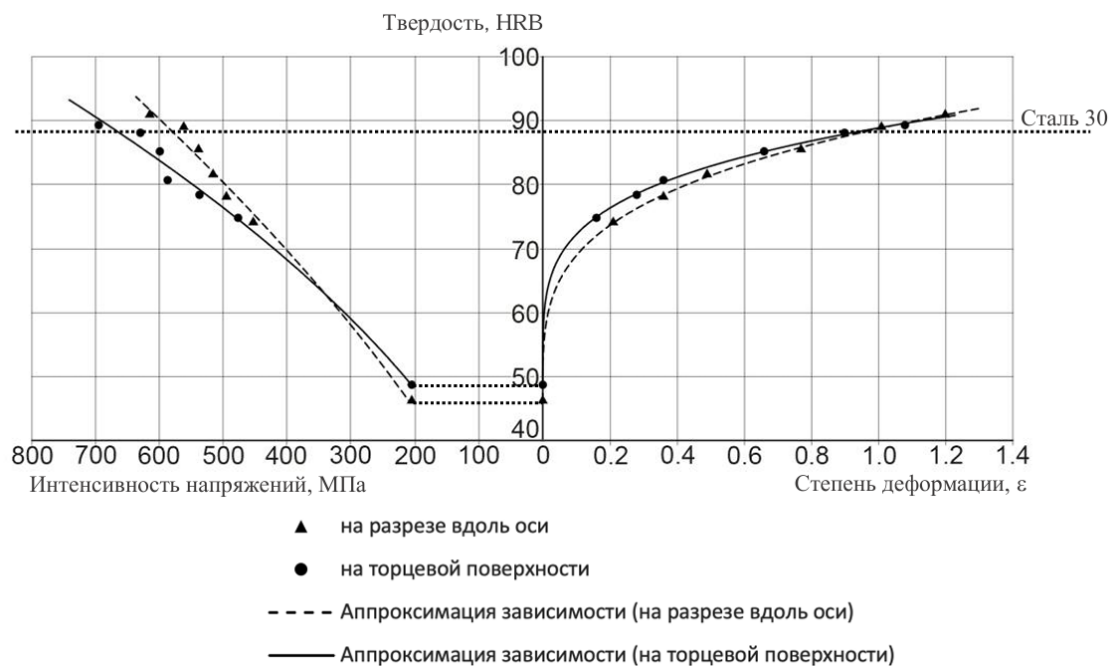


Рисунок 17 – Зависимость величины твердости от деформации и напряжения при осадке цилиндрического образца из стали 10

Тарировочные зависимости твёрдости от степени деформации для сталей 10 и 20 реализованы в пользовательской подпрограмме программного комплекса QForm. Это позволяет в процессе численного моделирования отображать поле распределения твёрдости и анализировать процессы упрочнения материала при холодной объёмной штамповке, что использовано при разработке технологии получения сложного составного изделия типа «ступица» диска сцепления автомобиля в главе 5.

В пятой главе выполнен анализ базовой технологии и разработана методика получения сложного составного изделия типа «ступица» диска сцепления автомобиля (рис. 18) методом холодной объёмной штамповки с применением комбинированного выдавливания цилиндрической заготовки и последующего неразъёмного соединения с фланцем из другого материала.

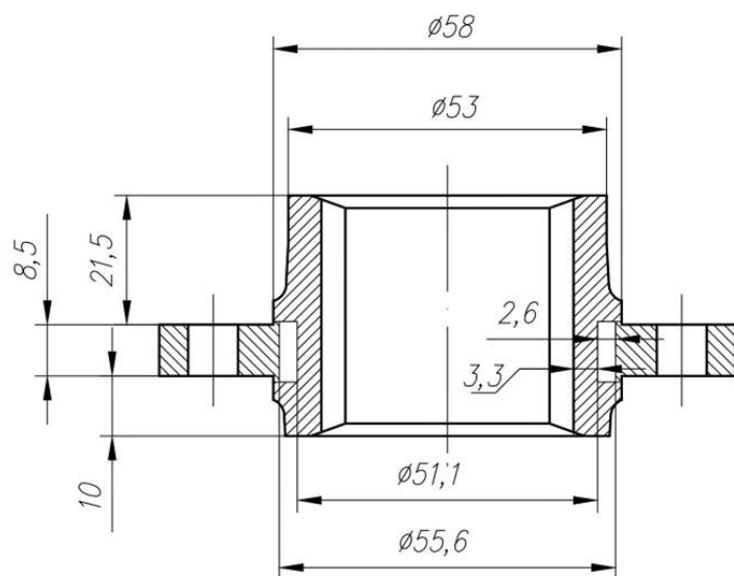


Рисунок 18 – Эскиз детали «ступица» диска сцепления автомобиля

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;
- 2) Определение геометрических параметров заготовок, инструмента и разработка штамповой оснастки;
- 3) Обоснованный выбор материала заготовок;
- 4) Численное моделирование процесса;
- 5) Анализ и оценка результатов.

На основе анализа недостатков существующей технологии изготовления «ступица» диска сцепления предложен новый технологический процесс, который состоит из двух этапов и позволяет получить цельную конструкцию из двух заготовок различного материала за счет комбинированного выдавливания бобышки с последующим формированием неразъёмного соединения с фланцем, имеющим профильное отверстие типа «прямоугольные зубья» (рис. 19):

- Первый этап – Выдавливание верхней части бобышки и формирование нижней части в соответствии с зубчатым профилем отверстия фланца.
- Второй этап – Совмещение фланца с бобышкой по зубчатым 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.

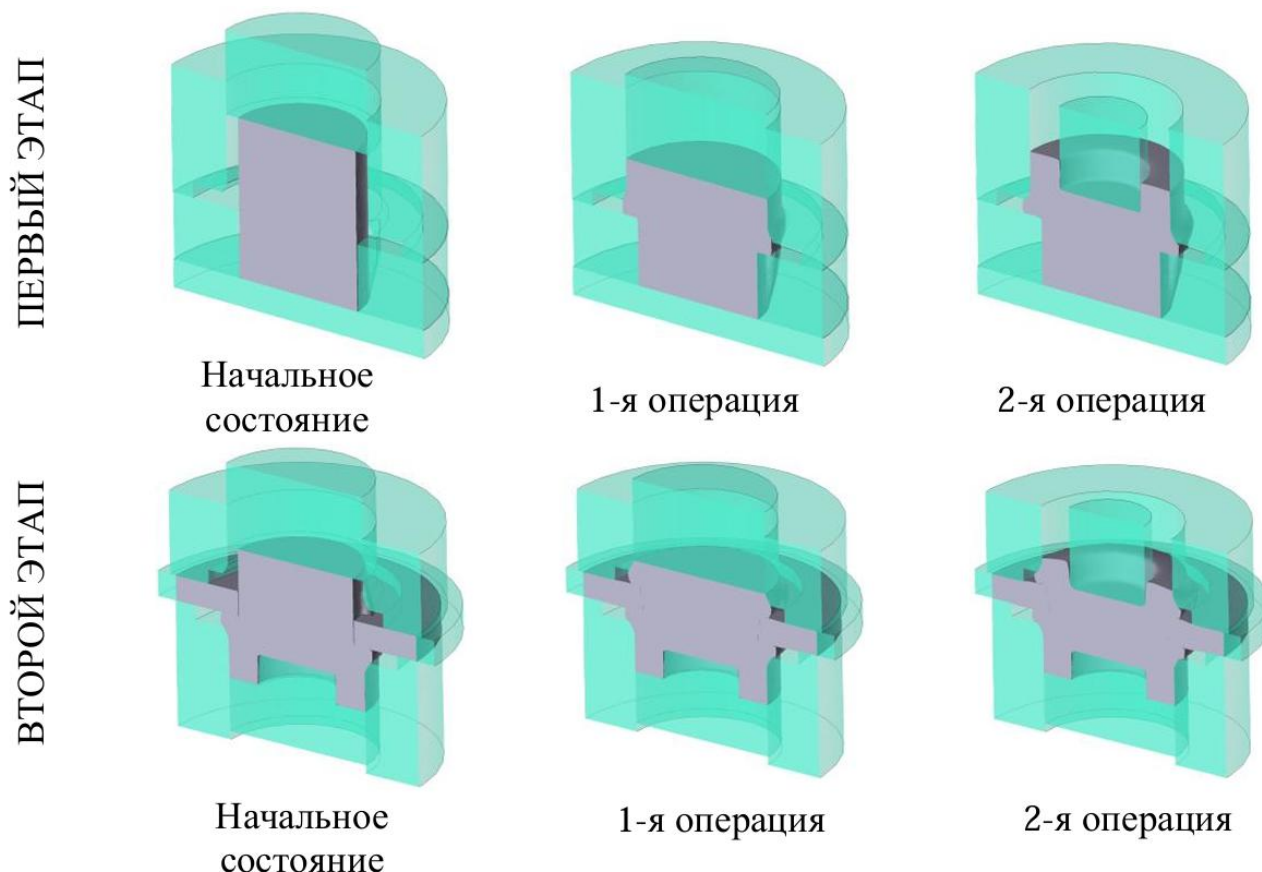


Рисунок 19 – Последовательность операций, характеризующих технологический процесс изготовления детали «ступица»

На основе расчета силы деформирования с использованием математической модели и анализа экспериментальных данных по упрочнению материала обоснован выбор материалов заготовок. С учётом условий производства и применения гидравлического прессы усилием 3 МН в качестве материала бобышки принята сталь 10, а для фланца – сталь 40.

На рис. 20 представлен график изменения силы деформирования, полученный по результатам моделирования технологического процесса в программном комплексе QForm и расчетов по математической модели. 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.

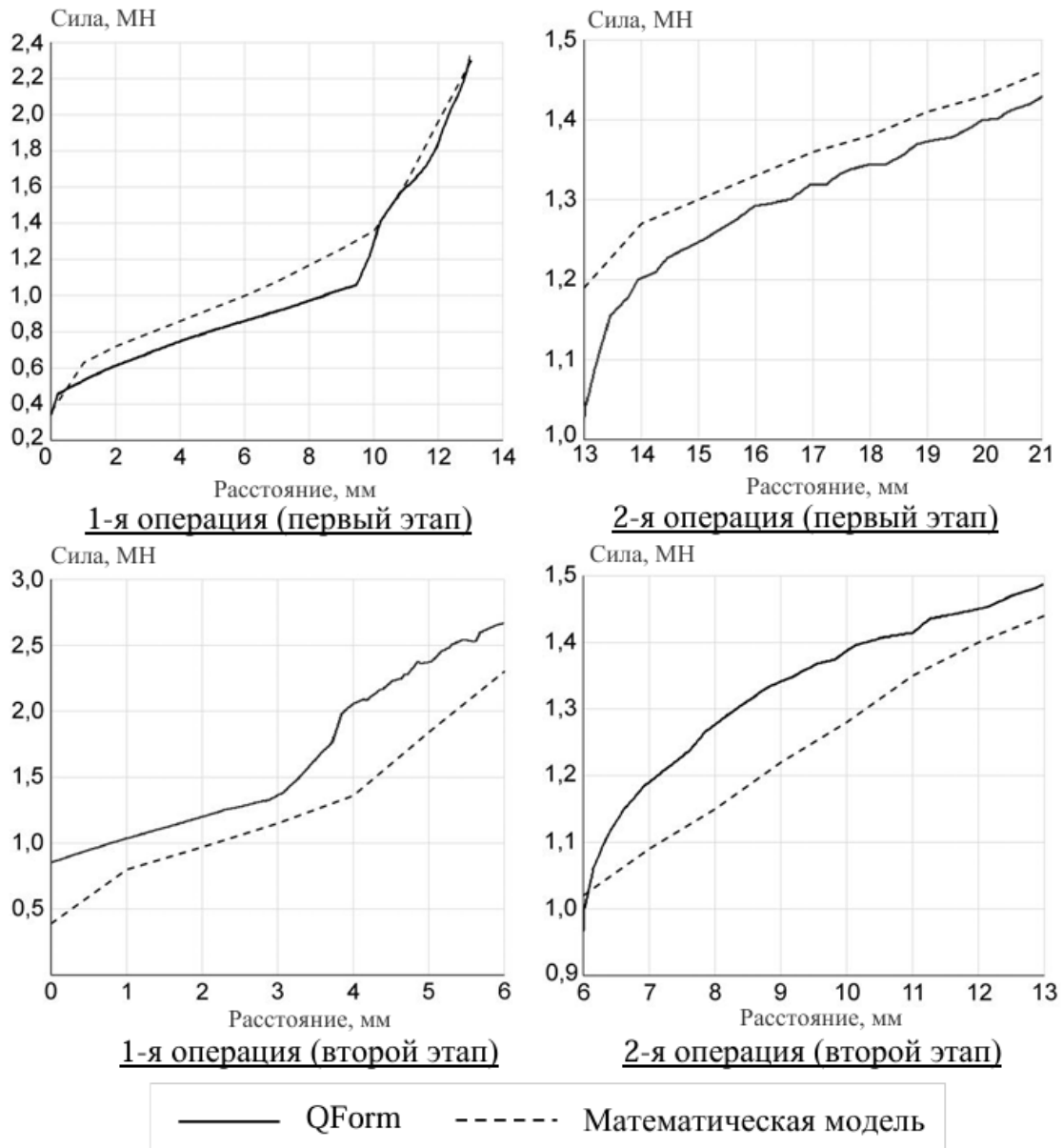


Рисунок 20 – График силы для выдавливания в 1-й и 2-й операциях

В процессе совмещенного формообразования механические свойства бобышки из стали 10 существенно изменяются: вследствие интенсивной пластической деформации металл упрочняется, что подтверждается распределением твердости (рис. 21). Минимальные значения составляют около 80 HRB, тогда как основная часть твёрдости лежит в диапазоне 85–92 HRB, что соответствует уровню упрочнения сталей более высокого класса прочности.

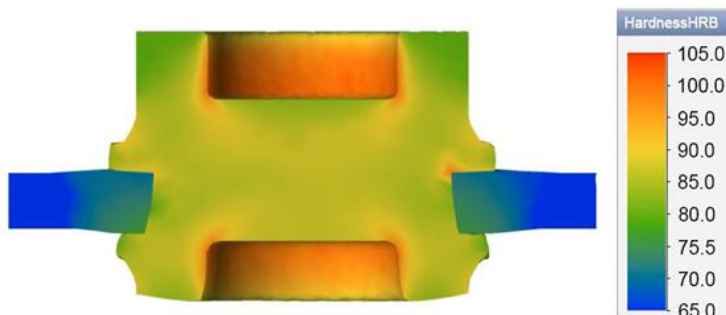


Рисунок 21 – Поле распределения твердости бобышки из стали 10

На рис. 22 показано изменение профильного отверстия фланца в процессе выдавливания. Видно, что фланец незначительно участвует в процессе деформирования: форма профильного отверстия сохраняется, а глубина зубьев остаётся практически неизменной. Это обеспечивает стабильность сопряжения с бобышкой и достаточную площадь контакта для надёжной передачи крутящего момента без проскальзывания.

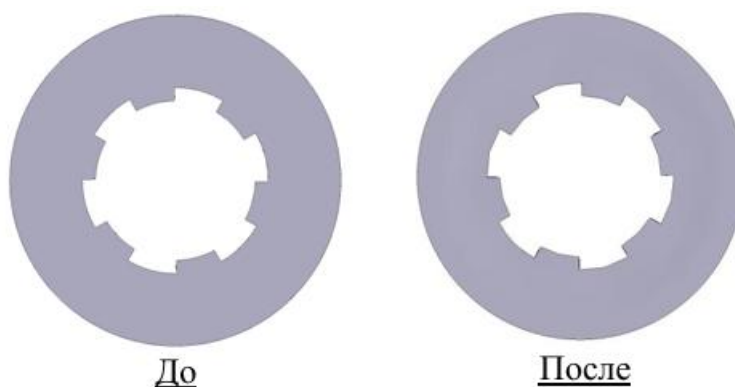


Рисунок 22 – Изменение фланца до и после соединения с бобышкой

На рис. 23 представлено сравнение геометрических размеров готовой детали «ступица» с результатом моделирования в системе конечно-элементного анализа QForm. Коэффициент использования заготовки (КИМ) при применении нового технологического процесса составляет около 56 %.

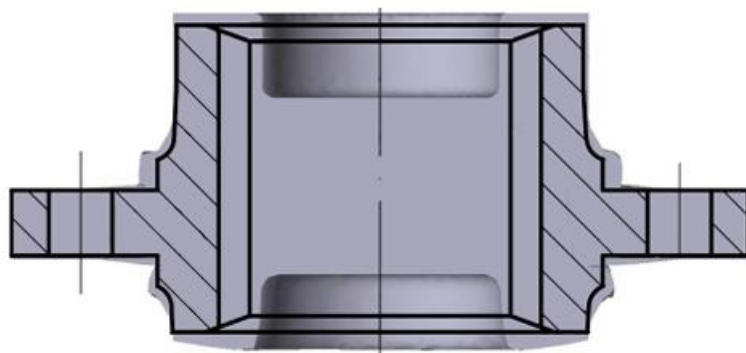


Рисунок 23 – Сравнение готовой детали «ступица» с моделями в системе конечно-элементного моделирования QForm

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 сил 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 тарифовочные 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 неразъемного 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 РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В научно-технических журналах, рекомендуемых ВАК Минобрнауки России:

1. Галактионова, Е.А. Зависимость величины твердости от интенсивности напряжений и деформации при холодной объемной штамповке/ Е.А. Галактионова, **Ле Чунг Зунг**, Ю.К. Филиппов // Черные металлы. – 2023. – № 2(1094). – С. 45–48.
2. 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** // Черные металлы. – 2023. – № 11(1103). – С. 66–69.
3. 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**, Доан Суан Куанг // Черные металлы. – 2024. – № 6(1110). – С. 76–81.
4. 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**, Доан Суан Куанг // Черные металлы – 2025. – № 2(1118). – С. 80–85.
5. **Ле, Ч.З.** Разработка технологического процесса холодной объемной штамповки детали «ступица» с применением компьютерного имитационного моделирования / **Ле Чунг Зунг**, Ю.К. Филиппов // Вестник МГТУ «Станкин». – 2025. – № 3 (74). – С. 49–55.

В других научных журналах и изданиях:

6. Галактионова, Е.А. Исследование комбинированного процесса выдавливания полых деталей с фланцем / Е.А. Галактионова, **Ле Чунг Зунг**, Ю.К. Филиппов // Сборник научных статей по итогам работы Международного научного форума «Наука и инновации – современные концепции», Москва, 2022. – С.164-171.
7. **Ле, Ч.З.** Моделирование процесса выдавливания детали с фланцем «ступица»/ **Ле Чунг Зунг**// Сборник II Международной научно-практической

конференции «Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов», Томск, 26–28 апреля 2022 г. – С. 481–486.

8. **Ле, Ч.З.** Исследование построения кривых упрочнения при испытании образцов из стали 20 по ГОСТ 1050–2013 / **Ле Чунг Зунг** // Материалы Международной научно-технической конференции «СМиС-2023. Инновационные атехнологии в управлении качеством», Москва, 17–19 мая 2023 г. – С. 102–106.

9. **Ле, Ч.З.** Анализ напряженного и деформированного состояния в шейке при испытаниях на растяжение цилиндрического образца / **Ле Чунг Зунг** // Материалы Международной научно-технической конференции «СМиС-2024. Технологии управления качеством», Москва, 22–24 мая 2024 г. – С. 262–266.

Научное издание

Ле Чунг Зунг

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

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук