

на правах рукописи



ДО АНЬ ТУ

**ХОЛОДНАЯ ШТАМПОВКА ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ
С ТОРЦЕВЫМИ УТОЛЩЕНИЯМИ
ИЗ ПРУТКОВЫХ И ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК**

Специальность 2.5.7 – Технологии и машины обработки давлением

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тула, 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тульский государственный университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент,
Черняев Алексей Владимирович.

Официальные оппоненты: **Сосенушкин Евгений Николаевич,**
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ
ВО «Московский государственный технологи-
ческий университет «СТАНКИН» (г.Москва),
профессор кафедры «Системы пластического
деформирования»;

Лисунец Николай Леонидович,
кандидат технических наук, доцент,
НИТУ «МИСиС» (г. Москва), доцент кафедры
«Обработка металлов давлением».

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Орловский государственный уни-
верситет им. И.С. Тургенева».

Защита состоится «15» марта 2022 г. в 14:00 на заседании диссертацион-
ного совета 24.2.417.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Тульский государ-
ственный университет» (300012, г. Тула, пр. Ленина, 92, 9-101).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ
ВО «Тульский государственный университет»
https://tsu.tula.ru/science/dissertation/diss-212-271-01/Do_An_Tu/

Автореферат разослан «20» января 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Черняев
Алексей Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Осесимметричные детали с торцевыми утолщениями и сквозной осевой полостью (детали катушечной формы) находят широкое применение в различных отраслях промышленности. В частности, имея большой диаметр торцевых утолщений и относительно малую массу, они используются в качестве поршней в насосном оборудовании, элементах передачи осевой силовой нагрузки в дизельных, гидравлических молотах и пневматических устройствах, а также для перемещений исполнительных механизмов в различных автоматизированных системах.

Существующие технологические процессы изготовления деталей катушечной формы (ДКФ), как правило, базируются на операциях механической обработки. Низкий коэффициент использования металла и значительные затраты времени на изготовление не позволяют считать эти способы рациональными для применения в серийном производстве.

Наиболее эффективным способом получения подобного рода деталей является обработка металлов давлением, позволяющая получать детали с достаточной точностью, с минимальными потерями материала. Вместе с тем повышается производительность, а получаемые изделия имеют более высокие прочностные характеристики и износостойкость за счет упрочнения материала.

Известные способы пластического формообразования и используемой для их реализации соответствующей штамповой оснастки обладают рядом существенных недостатков, снижающих качество изготавливаемых изделий, повышающих их стоимость и ограничивающих технологические возможности производства в целом, требуют специального дорогостоящего технологического оборудования или сложной штамповой оснастки. Некоторые варианты проблематичны для комплексной автоматизации или предусматривают поочередное малоэффективное пластическое формообразование торцевых утолщений (ТУ).

Штампующие устройства, применяемые в настоящее время для двусторонней высадки (ТУ) на стержневых заготовках, имеют сложную конструкцию, требуют ручной установки пинцетом заготовок и удаления поковки, имеют ограниченные технологические возможности, связанные с размерами изделий, низкую производительность.

Таким образом, теоретическое обоснование рациональных технологических режимов и количества формоизменяющих операций холодной штамповки осесимметричных деталей с торцевыми утолщениями из прутковых и трубных заготовок является **актуальной научно-технической задачей**.

Работа выполнена в рамках гранта по государственной поддержке ведущих научных школ Российской Федерации НШ-2601.2020.8.

В соответствии с вышесказанным, **целью работы** является повышение эффективности технологических процессов изготовления осесимметричных деталей с торцевыми утолщениями путем разработки новых высокопроизводительных, ресурсосберегающих технологий холодной штамповки, специ-

альной штамповой оснастки, теоретического обоснования технологических режимов и количества формоизменяющих операций.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие **задачи исследования**:

1. Разработать технологические процессы изготовления ДКФ многооперационной холодной штамповкой сплошных прутковых и полых трубных заготовок.

2. Выполнить теоретические исследования силовых режимов и напряженно-деформированного состояния заготовки при штамповке ДКФ из сплошных и полых заготовок.

3. Выполнить оценку повреждаемости материала заготовки в зависимости от степени деформации, геометрии изделия и условий трения на контактных границах инструмента и заготовки для установления необходимого числа формоизменяющих операций.

4. Разработать регрессионные модели силы процесса и повреждаемости материала при штамповке ДКФ из сплошных и полых заготовок.

5. Спроектировать специальную штамповую оснастку для реализации предлагаемых процессов холодной штамповки ДКФ.

6. Разработать практические рекомендации по проектированию и реализации технологических процессов штамповки ДКФ.

7. Использовать результаты исследований в учебном процессе.

Объект исследования. Процессы холодной объемной штамповки ТУ на прутковых и трубных заготовках.

Предмет исследования. Силовые режимы, напряженно-деформированное состояние и повреждаемость материала при штамповке ТУ на стержневых и трубных заготовках.

Методы исследования. Теоретические исследования силовых режимов и напряженно-деформированного состояния заготовки при штамповке ДКФ из жестко-пластического упрочняющегося материала выполнены в программном комплексе QForm 2D/3D. Количество формоизменяющих операций определялось исходя из величины накопленной материалом заготовки повреждаемости на основе феноменологического критерия разрушения с учетом истории деформирования.

Научная новизна: выявлены закономерности изменения силовых режимов, напряженно-деформированного состояния и повреждаемости материала заготовки от степени деформации, геометрии инструмента и заготовки и условий трения при одновременной двусторонней высадке торцевых утолщений на сплошных и полых заготовках.

Практическая значимость. Разработаны новые технологические процессы изготовления осесимметричных деталей с ТУ и специальная штамповая оснастка для их реализации. Предложены рекомендации по проектированию технологических процессов холодной объемной штамповки ДКФ, включая определение количества необходимых формообразующих операций. Получены регрессионные модели силы процесса и повреждаемости материала заготовки при штамповке ДКФ из сплошных и полых заготовок.

Автор защищает:

- разработанные технологические процессы изготовления осесимметричных деталей с ТУ одновременной двусторонней высадкой ТУ на прутковых и трубных заготовках;
- результаты компьютерного моделирования операций двусторонней высадки ТУ на сплошных и полых заготовках;
- установленные количественные зависимости изменения силовых режимов, напряженно-деформированного состояния и повреждаемости материала заготовки от степени деформации, геометрии инструмента и заготовки и условий трения при одновременной двусторонней высадке ТУ;
- конструкцию специальной штамповой оснастки для реализации предложенных технологических процессов штамповки ДКФ, отличающуюся от аналогов возможностью одновременной двусторонней высадкой ТУ на стержневых заготовках с автоматизированным процессом загрузки заготовки и удаления отштампованного полуфабриката, исключаяющим ручной труд;
- регрессионные модели силы процесса и повреждаемости материала при штамповке ДКФ из сплошных и полых заготовок.

Реализация работы. Отдельные результаты исследований использованы в учебном процессе при подготовке магистров направлений 15.04.01 «Машиностроение» с профилем «Машины и технология обработки металлов давлением» и 15.04.02 «Технологические машины и оборудование» с профилем «Высокоэффективные методы обработки металлов давлением» и включены в разделы ряда дисциплин, а также в научно-исследовательской работе студентов, при выполнении курсовых и дипломных проектов.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: XV Региональная магистерская научная конференция (Тула, Тульский государственный университет, 2021 г.), VII Международная научно-практическая конференция молодых ученых и студентов «Металлургия XXI столетия глазами молодых». (Донецк, Донецкий национальный технический университет, 2021 г.), VII Международная научная конференция «Форум молодых ученых: мир без границ» (Донецк, Донецкая республиканская малая академия наук учащейся молодежи, 2021 г.); XXXVIII Международная научно-практическая конференция «Advances in Science and Technology» (Москва, Научно-издательский центр «Актуальность.РФ», 2021 г.).

Публикации. Материалы проведенных исследований отражены в 11 публикациях, из которых 5 - в изданиях, внесенных в список ВАК, 5 - тезисы докладов международных и всероссийских научно-технических конференций; 1 - заявка на патент, общим объемом 2,5 п.л.; из них авторских - 1,8 п.л.

Автор выражает глубокую благодарность д-ру техн. наук, профессору Г.В. Панфилову за оказанную помощь при выполнении работы.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения и пяти разделов, заключения, списка использованных источников из 151 наименования, и включает 147 страниц машинописного текста, содержит 56 рисунков и 16 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность поставленной в работе задачи, ее научная новизна и практическая ценность, приведены положения, выносимые на защиту, и краткое содержание разделов диссертации.

В первом разделе проведен анализ различных областей применения ДКФ, представлены результаты проведенных патентных исследований, рассмотрены известные подходы к технологии изготовления ДКФ, современное состояние теории и технологии холодной объемной штамповки.

На основе приведенного обзора работ установлено, что существующие технологические процессы изготовления ДКФ, как правило, базируются на операциях механической обработки. Недопустимо низкий коэффициент использования металла и значительные затраты времени на изготовление не позволяют считать эти способы рациональными для применения в серийном производстве. В соответствии с этим сформулированы цель и задачи исследования.

Во втором разделе разработаны новые технологические процессы получения путем пластического формообразования различных конструкций ДКФ, изготавливаемых из алюминиевых сплавов и сталей, включающие в себя несколько вариантов реализации в зависимости от размеров изделия.

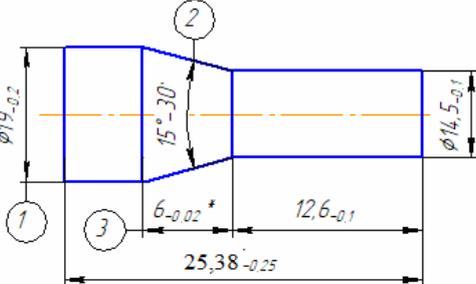
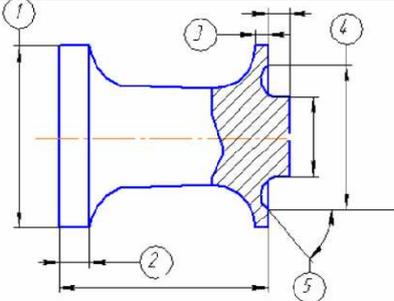
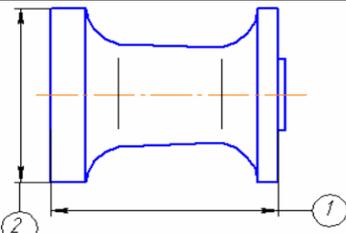
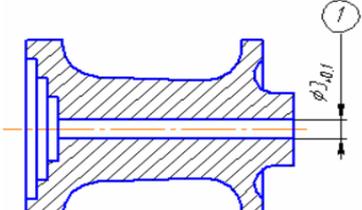
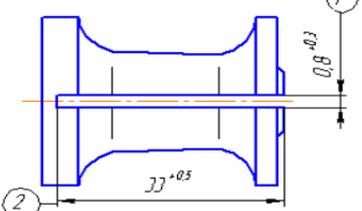
Первый вариант (табл. 1) предусмотрен для изготовления ДКФ, имеющих малый по отношению к наружному диаметру ТУ и диаметральным размерам участка между ТУ диаметр осевого отверстия. При этом с небольшим уменьшением коэффициента использования металла целесообразно использовать сплошные цилиндрические мерные заготовки. Для изготовления деталей катушечной формы, имеющих увеличенный (по отношению к указанным ранее) диаметр осевого отверстия разработан вариант технологии изготовления (табл. 2), при котором используется мерная трубная заготовка, в которую первоначально запрессовывается оправка повышенной прочности (твердосплавная или предварительно подвергнутая закалке).

Даны рекомендации по проектированию технологических процессов штамповки двусторонних утолщений на стержневых заготовках, относящиеся к отрезке мерных заготовок, пластическому формообразованию средней части ДКФ, высадке ТУ и к заключительным операциям технологического цикла.

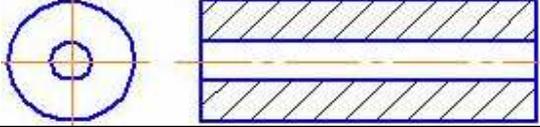
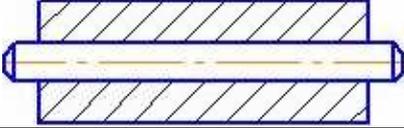
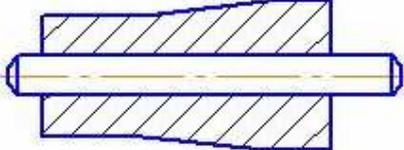
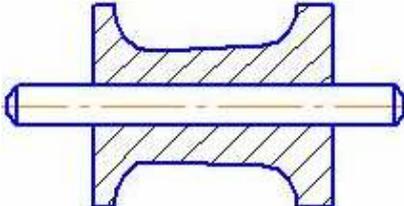
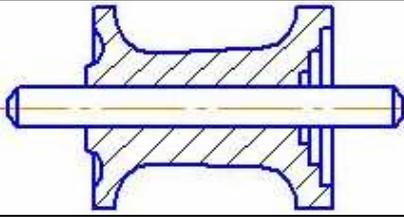
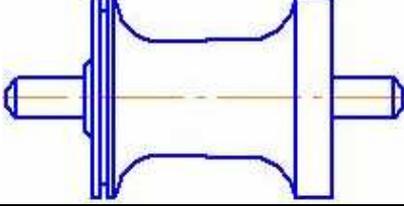
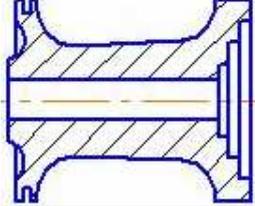
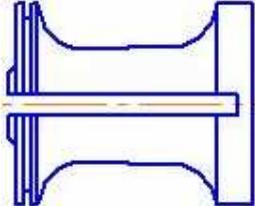
В третьем разделе диссертационной работы выполнено моделирование в программном комплексе Qform 2D/3D (рис. 1) штамповки сплошных ДКФ по двум вариантам технологии: из цилиндрической заготовки (одна штамповочная операция) и из предварительно профилированной заготовки (вторая штамповочная операция в двухоперационном процессе).

Штамповка осуществляется в штампе с разъемными матрицами. Заготовка цилиндрической формы длиной $l = 28$ мм и диаметром $d = 14,5$ мм деформируется двумя пуансонами, движущимися во встречном направлении. Под воздействием инструмента металл заполняет полости матрицы, образуя торцевые утолщения. Одновременно формируется внутренняя полость на торце заготовки, которая выполняет функцию наметки для сверления сквозного отверстия.

Технология изготовления ДКФ из цилиндрических заготовок.

№	Описание операции	Эскиз перехода
1	Отрезать заготовку в размер 1 от прутка $\varnothing 14,5\text{мм}$	
2	Отжиг	
3	Штамповать среднюю часть ДКФ в размеры 1...3	 <p data-bbox="676 786 916 815">*Размер для справок</p>
4	Отжиг	
6	Штамповать ДКФ окончательно в размеры 1...5 (высадка торцовых утолщений ТУ)	
7	Отжиг	
8	Закалка и искусственное старение	
9	Обточить наружный диаметр в размер 1. Подрезать торец в размер 2	
10	Сверлить и развернуть отверстие в размер 1	
11	Прорезать пазы в размер 1 на длину 2	
12	Контроль ОТК	

Технологический процесс штамповки ДКФ из трубной заготовки

№	Описание операции	Эскиз перехода
1	2	3
1	Отрезка мерной заготовки	
2	Монтаж заготовки на калибровочный стержень	
3	Высадка заготовки в подвижной матрице	
4	Высадка переднего и заднего ТУ	
5	Обратное выдавливание полостей на ТУ	
6	Калибровка	
7	Обрезка компенсатора и заусенцев, проточка канавки переднего ТУ	
8	Демонтаж калибровочного стержня из ДКФ	
9	Закалка и искусственное старение	
10	Прорезка продольных пазов	
11	Контроль ОТК	

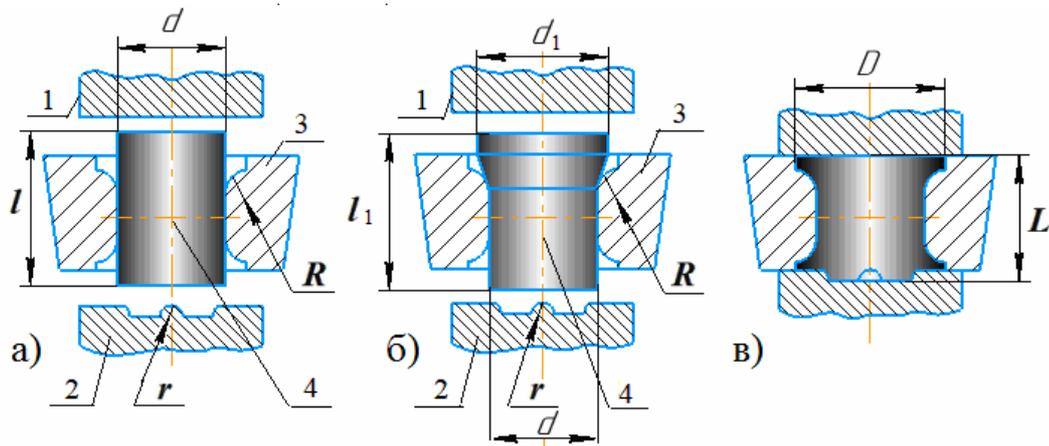


Рис. 1. Штамповка деталей катушечной формы:
 а - из цилиндрической заготовки за 1 операцию;
 б - из профильной заготовки (2-ая операция); в - поковка ДКФ;
 1,2 - пуансоны, 3 - разъемная матрица, 4 - заготовка.

Установлено, что в исследуемом диапазоне варьируемых факторов наибольшее влияние на силу штамповки оказывают степень деформации, характеризующаяся относительным диаметром изделия \bar{d} , и радиус внутренних полостей матрицы R . Уменьшение \bar{d} от 0,66 до 0,6, что соответствует увеличению диаметральных размеров изделия и, следовательно, степени деформации при неизменных размерах заготовки, приводит к росту силы штамповки на 20...30%. Увеличение R от 3 до 9 мм приводит к снижению силы на 15-20%, что объясняется более благоприятными условиями течения металла с меньшими затратами энергии на изменение траектории. Увеличение радиуса r внутренней полости на торце заготовки от 1 до 4 мм и коэффициента трения μ на контактных поверхностях инструмента и заготовки от 0,05 до 0,2 может приводить к росту силы на 5-10% (рис. 2).

Выполнены исследования напряженно-деформированного состояния заготовки в зависимости от степени деформации и геометрических размеров изделия (рис. 3,а, 3,б). Получены количественные зависимости интенсивностей напряжений σ_i и деформаций ε_i от варьируемых параметров.

Проведена оценка среднего напряжения и повреждаемости материала заготовки ω в опасных точках (рис. 3,в). Предельные возможности формоизменения устанавливались на базе феноменологического критерия разрушения с учетом истории деформирования. Установлены диапазоны изменения степени деформации и геометрии изделия, при которых штамповку сплошных ДКФ можно проводить за 1 и 2 формоизменяющие операции. Регламентирующим фактором является величина накопленной материалом заготовки повреждаемости, которая не должна превышать допустимое значение $[\omega]=0,3$. Если указанное условие не выполняется, штамповку необходимо выполнять в 2 перехода с межоперационным отжигом. При использовании предварительно профилированной заготовки (рис. 1,б) с диаметром утолщенной части $d_1=19$ мм и длиной $l_1=25$ мм повреждаемость материала

ла на операции окончательной штамповки снижается, не превышая значения $\omega = 0,25$, что удовлетворяет требованиям, предъявляемым к изделиям ответственного назначения.

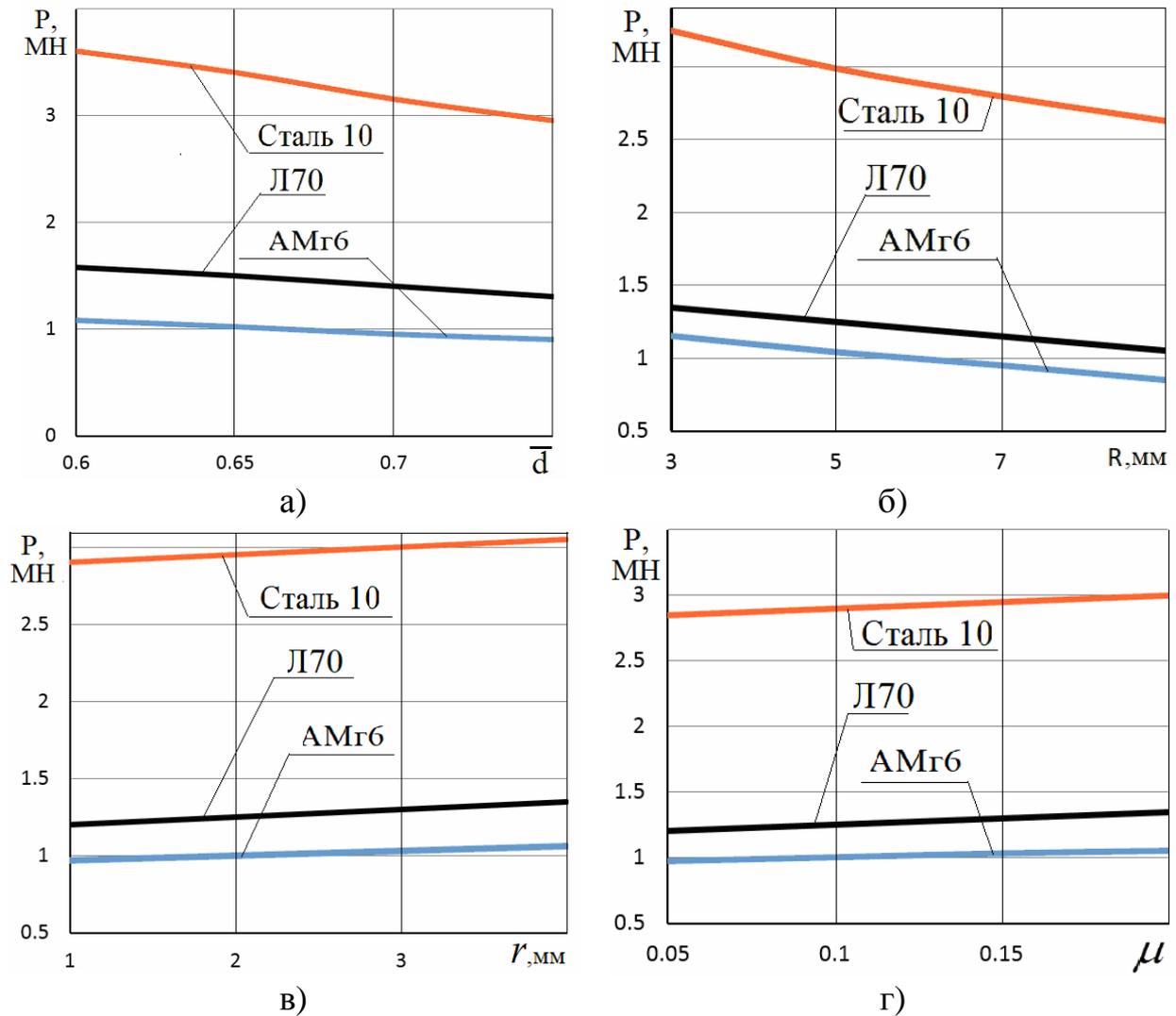


Рис. 2. Силовые режимы штамповки ДКФ:

а - $P(\bar{d})$; $\mu = 0,1$; $R = 5$ мм; $r = 2$ мм; б - $P(R)$; $\mu = 0,1$; $r = 2$ мм; $\bar{d} = 0,66$;
в - $P(r)$; $\mu = 0,1$; $R = 5$ мм; $\bar{d} = 0,66$; г - $P(\mu)$; $R = 5$ мм; $r = 2$ мм; $\bar{d} = 0,66$.

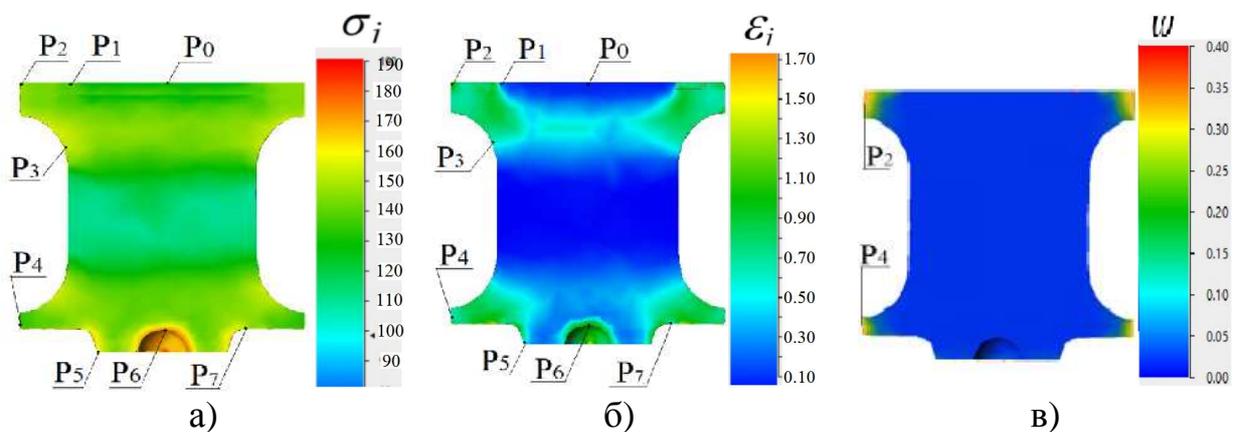


Рис. 3. Распределение σ_i (а), ϵ_i (б) и ω (в) на конечной стадии штамповки.

На рис. 4,а представлена диаграмма для определения количества необходимых формоизменяющих операций при штамповке ДКФ. Область диаграммы, расположенная ниже каждой кривой, соответствующего коэффициента трения μ , при заданных \bar{d} и R характеризуется значениями повреждаемости $\omega > 0,3$, что означает необходимость операции предварительного профилирования заготовки. В этом случае штамповка производится в 2 перехода. Область диаграммы, расположенная выше указанных кривых, соответствует допустимым значениям повреждаемости $\omega \leq 0,3$, что означает возможность получения изделия за 1 операцию штамповки.

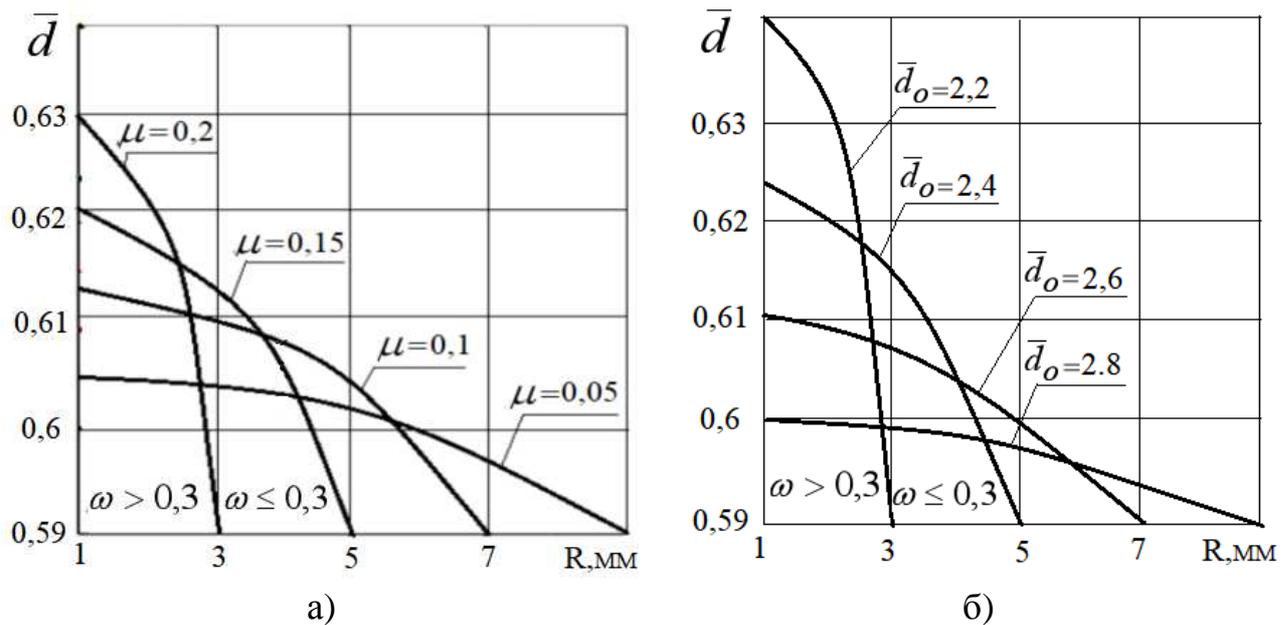


Рис. 4. Определение количества операций штамповки (материал – АМГб):
а - из сплошной заготовки; б - из полый заготовки при $\mu = 0,1$.

Получены регрессионные модели зависимости силы процесса P и повреждаемости материала ω от исследуемых параметров при штамповке ДКФ из сплошной стержневой заготовки:

Материал	Уравнение регрессии
АМГб	$P = 0,961 - 0,032R + 0,026r + 0,035\mu - 0,6\bar{d} + 0,042R\bar{d} - 0,038r\bar{d};$ $\omega = 0,45 + 0,006R + 0,016r + 0,19\mu - 0,231\bar{d} - 0,014R\bar{d} - 0,025r\bar{d} - 0,33\mu\bar{d};$
Л70	$P = 0,61 - 0,082R + 0,009r - 0,284\mu + 0,41\bar{d} - 0,003R\bar{d} + 0,019r\bar{d};$ $\omega = 0,2 - 0,001R + 0,007r + 0,125\mu - 0,108\bar{d} + 0,001R\bar{d} - 0,01r\bar{d} - 0,21\mu\bar{d};$
Сталь 10	$P = 0,52 - 0,035R + 0,021r - 0,216\mu + 0,43\bar{d} - 0,008R\bar{d} + 0,05r\bar{d};$ $\omega = 0,07 - 0,001R + 0,009r + 0,17\mu - 0,106\bar{d} + 0,003R\bar{d} - 0,015r\bar{d} - 0,282\mu\bar{d}$

В четвертом разделе выполнено моделирование штамповки ДКФ на оправке по двум вариантам технологии: из трубной заготовки за одну формоизменяющую операцию (рис. 5,а) и из предварительно профилированной

трубной заготовки - вторая штамповочная операция в двухоперационном процессе (рис. 5,б).

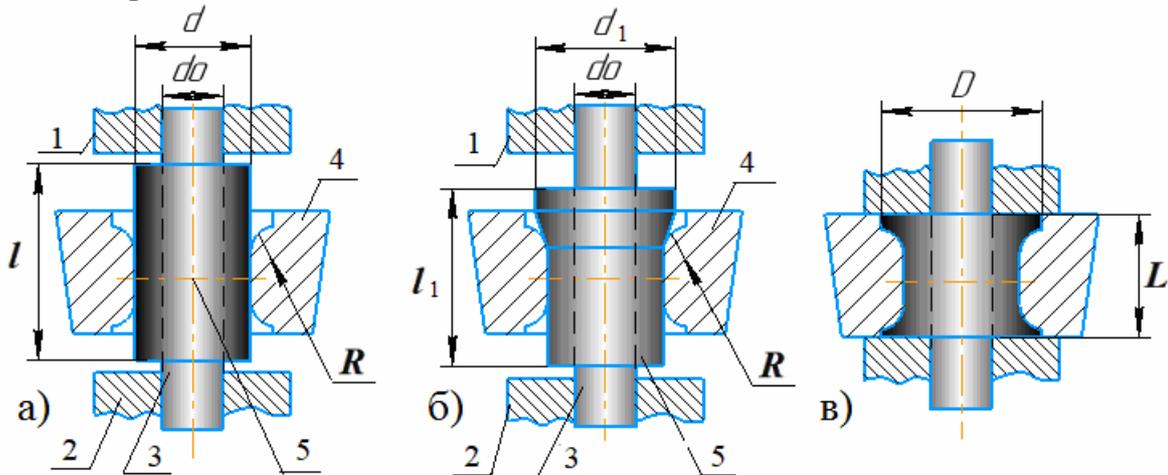


Рис. 5. Штамповка деталей катушечной формы на оправке:
 а - из трубной заготовки за 1 операцию; б - из профилированной заготовки (2-ая операция); в - поковка ДКФ;
 1,2 - пуансоны, 3 - оправка; 4 - разъемная матрица, 5 - заготовка.

Установлено, что факторами, влияющими на силовые режимы штамповки ДКФ на оправке, являются геометрические параметры инструмента и заготовки: радиус закругления полости матрицы R , начальный d и конечный D диаметры заготовки, диаметр оправки d_o , а также условия трения на контактных границах инструмента и заготовки, характеризующиеся коэффициентом трения μ .

Показано, что увеличение относительного диаметра $\bar{d} = d/D$ от 0,6 до 0,66 и радиуса закругления полости матрицы R от 3 до 9 мм приводит к снижению максимальной силы P на 10-25 и 15-20% соответственно. Увеличение относительного диаметра оправки $\bar{d}_o = d/d_o$ от 1,6 до 2,8 и коэффициента трения μ от 0,05 до 0,2 приводит к росту P на 25-30 и 25-35% соответственно.

Выполнены исследования напряженно-деформированного состояния заготовки в зависимости от степени деформации и геометрических размеров изделия при штамповке ДКФ на оправке. Получены количественные зависимости интенсивностей напряжений σ_i и деформаций ε_i от варьируемых параметров.

Проведена оценка повреждаемости материала заготовки в опасных точках. Установлены диапазоны изменения степени деформации и геометрии изделия, при которых штамповку ДКФ на оправке можно проводить за 1 и 2 формоизменяющие операции (рис. 4,б).

Получены регрессионные модели зависимости силы штамповки P и повреждаемости материала ω от исследуемых параметров при штамповке ДКФ на оправке.

В пятом разделе спроектирована конструкция автоматизированного штампа с разъемными по меридиональной плоскости полуматрицами для горизонтальных холодновысадочных автоматов (рис. 6).

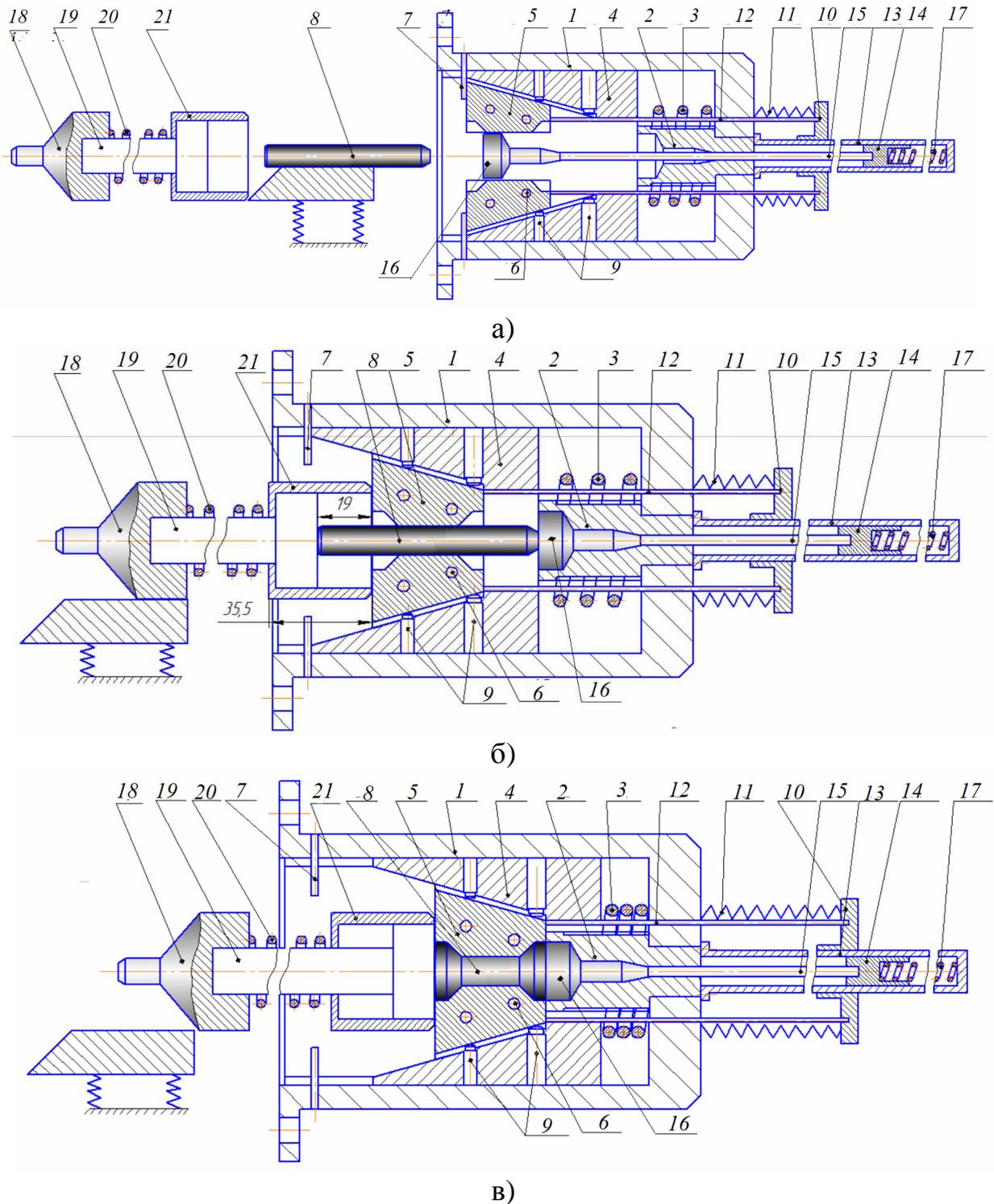


Рис. 8. Штамп для одновременной высадки торцевых утолщений:
 а) исходное состояние; б) начало штамповки; в) окончание штамповки
 1- корпус; 2 - рабочая вставка; 3 - пружина; 4 - обойма; 5 - полуматрицы;
 6 - пружины полуматриц; 7 - фиксаторы; 8 - заготовка; 9 - упоры; 10 - шайба;
 11 - пружина; 12 - толкатели; 13 - стакан; 14 - ползун; 15 - стержень;
 16 - рабочая головка; 17 - пружина выталкивателя; 18 - хвостовик пуансона;
 19 - пуансон; 20 - пружина пуансона; 21 - толкающая втулка.

Разработанная конструкция, обеспечивает:

- автоматизированную загрузку в рабочую полость штампа (в частности, с помощью лотково-шиберной подачи) мерных цилиндрических заготовок и отштампованных полуфабрикатов, а также их удаление на провал в тару после окончания очередной формообразующей операции;

- точную фиксированную выставку заготовок относительно деформирующего инструмента в зависимости от конфигурации изготавливаемой детали катушечной формы и, особенно, размеров и формы торцовых утолщений;

- плотность и стабильность смыкания рабочих полуматриц в период непосредственно пластического формообразования обеспечивается путем обоснованного выбора для конкретного изготавливаемого изделия параметров пружины пуансона и угла конусности вставок.

В заключении приводятся основные результаты и выводы по выполненной работе.

В приложении приведен акт об использовании результатов работы в учебном процессе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В работе решена актуальная **научно-техническая задача**, заключающаяся в теоретическом обосновании рациональных технологических режимов и количества формоизменяющих операций двусторонней высадки торцевых утолщений на стержневых и трубных заготовках. В процессе теоретических исследований получены следующие **основные результаты и сделаны выводы**.

1. Разработаны новые технологические процессы пластического формообразования различных конструкций ДКФ, изготавливаемых из алюминиевых сплавов и сталей, включающие в себя несколько вариантов реализации в зависимости от размеров изделия (из прутка сплошного сечения и из мерной трубной заготовки), существенно расширяющие технологические возможности холодной штамповки мелких точных деталей сложной формы, обеспечивающие повышение производительности и коэффициента использования материала с 66 до 89%.

2. Выполнено моделирование штамповки сплошных ДКФ по двум вариантам технологии: из цилиндрической заготовки (одна штамповочная операция) и из предварительно профилированной заготовки (вторая штамповочная операция в двухоперационном процессе).

Установлено, что в исследуемом диапазоне варьируемых факторов наибольшее влияние на силу штамповки оказывают степень деформации, характеризующаяся относительным диаметром изделия \bar{d} , и радиус внутренних полостей матрицы R . Уменьшение \bar{d} от 0,66 до 0,6, что соответствует увеличению диаметральных размеров изделия и, следовательно, степени деформации при неизменных размерах заготовки, приводит к росту силы штамповки на 20...30%. Увеличение R от 3 до 9 мм приводит к снижению

силы на 15-20%, что объясняется более благоприятными условиями течения металла с меньшими затратами энергии на изменение траектории.

3. Выполнено моделирование штамповки ДКФ на оправке по двум вариантам технологии: из трубной заготовки (одна штамповочная операция) и из предварительно профилированной трубной заготовки (вторая штамповочная операция в двухоперационном процессе).

Установлено, что увеличение относительного диаметра \bar{d} от 0,6 до 0,66 и радиуса закругления полости матрицы R от 3 до 9 мм приводит к снижению максимальной силы P на 10-25 и 15-20% соответственно. Увеличение относительного диаметра оправки \bar{d}_o от 1,6 до 2,8 и коэффициента трения μ от 0,05 до 0,2 приводит к росту P на 25-30 и 25-35% соответственно.

4. Выполнены исследования напряженно-деформированного состояния заготовки в зависимости от степени деформации и геометрических размеров изделия. Получены количественные зависимости интенсивностей напряжений σ_i и деформаций ε_i от варьируемых параметров при штамповке ДКФ из сплошных и полых заготовок.

5. Проведена оценка повреждаемости материала заготовки в опасных точках. Установлены диапазоны изменения степени деформации и геометрии изделия, при которых штамповку сплошных ДКФ можно проводить за 1 и 2 формоизменяющие операции.

6. Разработаны регрессионные модели силы процесса и повреждаемости материала при штамповке деталей катушечной формы из сплошных и полых заготовок в зависимости от геометрии изделия, степени деформации и условий трения на контактных поверхностях инструмента и заготовки.

7. Даны рекомендации по проектированию технологических процессов штамповки двусторонних утолщений на стержневых и трубных заготовках, относящиеся к отрезке мерных заготовок, пластическому формообразованию средней части детали катушечной формы, высадке торцевых утолщений и к заключительным операциям технологического цикла.

8. Спроектирована конструкция штампа с разъемными по меридиональной плоскости полуматрицами для горизонтальных холодновысадочных автоматов, обеспечивающая:

- автоматизированную загрузку в рабочую полость штампа (в частности, с помощью лотково-шиберной подачи) мерных цилиндрических заготовок и отштампованных полуфабрикатов, а также их удаление на провал в тару после окончания очередной формообразующей операции;

- точное фиксированное позиционирование заготовок относительно деформирующего инструмента в зависимости от конфигурации изготавливаемой ДКФ, размеров и формы торцевых утолщений;

- плотность и стабильность смыкания рабочих полуматриц в период непосредственно пластического формообразования.

9. Результаты исследований использованы в учебном процессе на кафедре «Механика пластического формоизменения» ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В ПУБЛИКАЦИЯХ

1. Панфилов Г.В., **До А.Т.**, Ле М.Д. Проектирование штамповой оснастки для изготовления осесимметричных деталей с торцевыми утолщениями и их применение // Научные технологии в машиностроении. 2021. № 3 (117). С. 7-15.
2. Панфилов Г.В., Черняев А.В., **До А.Т.** Моделирование штамповки деталей катушечной формы // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 3. С. 50-54.
3. Панфилов Г.В., Черняев А.В., **До А.Т.** Исследование напряженно-деформированного состояния заготовки при штамповке деталей катушечной формы // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 4. С. 312-316.
4. Панфилов Г.В., Черняев А.В., **До А.Т.** Моделирование штамповки деталей катушечной формы на оправке // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 5. С. 137-143.
5. Панфилов Г.В., Черняев А.В., **До А.Т.** Варианты технологий многооперационной холодной штамповки осесимметричных деталей с одновременной высадкой торцевых утолщений // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 6. С. 365-374.
6. **До А.Т.** Моделирование операции выдавливания двусторонних деталей катушечной формы // XVI Региональная магистерская конференция (19-21 апреля 2021г.). Сборник докладов. Часть 1. Тула: ТулГУ, 2021 С. 94-95.
7. **До А.Т.**, Панфилов Г.В. Исследование напряженно-деформированного состояния заготовки при выдавливании деталей катушечной формы // материалы VII Международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов: сборник докладов. «Донецкий национальный технический университет», 24-26 мая 2021 г., Донецк: ДОННТУ, 2021. С. 136-138.
8. **До А.Т.** Исследование силовых режимов и повреждаемости материала операции штамповки двухсторонней деталей катушечной формы // Сборник материалов VII Международной очно-заочной научной конференции «Форум молодых ученых: мир без границ» в рамках Международного научного форума Донецкой Народной Республики «Инновационные перспективы Донбасса», в 4 ч. Донецкая республиканская малая академия наук учащейся молодежи, г. Донецк, 05 мая – 04 июня 2021 г. Донецк: «ДОНМАН», 2021. Ч. 1. С.158-161.
9. **До А.Т.** Исследование зависимости повреждаемости материала от исследуемых параметров при штамповке двухсторонней деталей катушечной формы // материалы XXXVIII Международной научно-практической конференции «Advances in Science and Technology», 31 июля 2021 г., Москва, Сборник докладов. М. Научно-издательский центр «Актуальность.РФ». 2021. С. 18-20.
10. **До А.Т.** Варианты штамповки деталей катушечной формы // Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Современные технологии обработки металлов и средства их автоматизации». Тула, 12.10.2021 г. Тула: Изд-во ТулГУ, 2021. С. 17-18.
11. Заявка на патент 2021123270 РФ, МПК⁸ В21J 5/08. Устройство для изготовления изделий типа стержней с утолщениями / Коротков В.А., Черняев А.В., **До А.Т.**; заявитель ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», 02.08.2021.

Подписано в печать 12.01.2022 г.

Формат бумаги 70x100 1/16. Бумага типограф. №2

Офсетная печать. Усл. печ. л. 1,1. Усл. кр. отт. 1,2. Уч. изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Тульский государственный университет. 300012, г. Тула, просп. Ленина, 92 Издательство ТулГУ. 300012, г. Тула, просп. Ленина, 95