

На правах рукописи

НЕДОШИВИН СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ



**РАЗРАБОТКА ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОЙ МНОГООПЕРАЦИОННОЙ
ХОЛОДНОЙ ШТАМПОВКИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ОСТРОКОНЕЧНЫХ
СЕРДЕЧНИКОВ ПУЛЬ**

**Специальность 05.02.09 – Технологии и машины обработки
давлением**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Тула 2020

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»

Научный консультант: доктор технических наук, доцент
Ларин Сергей Николаевич

Официальные оппоненты: Иванов Константин Михайлович
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Балтийский государственный тех-
нический университет «ВОЕНМЕХ»
им. Д.Ф. Устинова», ректор
Коробова Наталья Васильевна
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», зав. кафедрой
Попов Игорь Петрович
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследо-
вательский университет имени академика
С.П. Королева», профессор

Ведущая организация - АО «НПО «СПЛАВ» имени А.Н. Ганичева»,
г. Тула

Защита состоится «22 сентября» 2020 г. в 14-00 час. на заседании диссер-
тационного совета Д 212.271.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Тульский гос-
ударственный университет» (300012, г. Тула, ГСП, просп. Ленина, д. 92, 9-101).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» и на сайте:

Автореферат разослан «___» _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Черняев Алексей Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одним из основных путей повышения качества функционирования калиберных пуль является оснащение их остроконечными сердечниками, изготовленными из высокопрочных сталей и сплавов, существенно повышающих эффективность их действия. Однако оснащение патронов пулями с таким сердечником для всего комплекса стрелкового вооружения сдерживается отсутствием приемлемой для массового производства технологии изготовления указанных остроконечных высокопрочных сердечников.

Созданию основ приемлемой для массового производства технологии получения остроконечных высокопрочных сердечников для пуль к боеприпасам различных конструкций стрелкового вооружения посвящена данная работа. Такая технология должна базироваться на разработке новых способов изготовления указанных сердечников методами пластического формообразования, проектирования специальной штамповой оснастки, а также на достоверных результатах и выводах теоретического обоснования рационального распределения напряжений, экспериментальных исследований деформаций в пластической области. Не менее важны и практические рекомендации по проектированию технологии, установленные в ходе реализации комплекса проведенных работ. Это обеспечит возможность оценить силовые параметры операций и кинематику течения деформируемого материала, накопление в процессе деформации микрповреждений и связанное с ними исчерпание запаса пластичности материала. Последнее лежит в основе научного обоснования количества технологических операций при пластическом формообразовании высокопрочных сердечников, что позволит обеспечить высокие требования, предъявляемые к качеству изготовления и поражающему действию стрелковых боеприпасов.

В связи с вышеизложенным теоретическое и экспериментальное обоснование новых способов и технологических решений многооперационной холодной штамповки высокопрочных остроконечных сердечников пуль, а также проектирование специальной штамповой оснастки для реализации указанных способов являются **важной научно-технической проблемой**.

Работа выполнена в рамках гранта НШ-2601.2020.8 и гранта РФФИ 20-08-00401, а также хозяйственных договоров с рядом предприятий России.

Цель работы. Повышение эффективности технологических процессов многооперационной холодной штамповки остроконечных сердечников пуль путем разработки специального инструмента с разноугольными рабочими полостями, на основе новых способов последовательной локализованной предварительной штамповки конических участков сердечников и обоснования рациональных режимов обработки, приводящих к повышению сжимающего гидростатического напряжения, залечивающего дефекты в зоне формирования вершинки головной части сердечника, что ведет к уменьшению степени использования запаса пластичности материала в ней и соответствующему улучшению механических характеристик изделий, изготавливаемых за меньшее количество операций.

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

1 Провести патентный анализ конструкций современных остроконечных высокопрочных сердечников пульь и классифицировать их по особенностям с целью последующей разработки для каждой группы рационального технологического процесса холодной объемной штамповки и проектирования специальной штамповой оснастки, а также исследовать известные подходы к изготовлению стержневых деталей, имеющих торцевые остроконечные участки.

2 Разработать новые прогрессивные способы изготовления различных групп высокопрочных сердечников пульь в зависимости от их конструктивных особенностей, уменьшающие технологическую себестоимость и повышающие качество, функциональные и боевые характеристики пульь с указанными остроконечными сердечниками.

3 Усовершенствовать аналитический метод линий скольжения для решения осесимметричных технологических задач теории пластичности путем вывода интегральных аналитических выражений для расчета средних напряжений вдоль линий скольжения (аналогичных соотношениям Генки для условий плоского пластического течения) и установить правила построения участков полей линий скольжения, примыкающих к прямолинейным свободным границам, проверить полученные зависимости, а также провести силовой анализ операций пластического формообразования остроконечных стальных сердечников пульь.

4 Экспериментальным методом делительных сеток обосновать предельные технологические возможности и установить рациональные технологические режимы многооперационной холодной штамповки остроконечных стержневых деталей ответственного назначения из высокопрочных сталей.

5 Разработать методику проектирования многооперационных технологий остроконечных сердечников пульь на основе новых способов холодной штамповки, учитывающую сообщаемую на каждой операции, остаточную после отжига, суммарную накапливаемую и допустимую для готового изделия повреждаемость материала, и довести указанную методику до конечного программного продукта.

6 Спроектировать специальную штамповую оснастку для реализации предлагаемых новых способов штамповки высокопрочных остроконечных сердечников и разработать практические рекомендации по проектированию технологических процессов на основе результатов проведенных исследований и конструкторско-технологических разработок.

7 Использовать результаты исследований в промышленности и учебном процессе.

Объект исследования. Процессы холодной штамповки высокопрочных сердечников пульь повышенного качества.

Предмет исследования. Комбинации режимов напряженного и деформированного состояний, обуславливающих рациональный минимум накапливаемых в материале головной части сердечника повреждений и на этой основе обоснование рациональных режимов штамповки сердечников.

Методы исследования. Методы исследования базируются на основных положениях теории пластичности. Оценка распределения напряжений в пластических областях при исследовании новых способов штамповки сердечников и силовой анализ типовых операций проводились аналитическим методом линий скольжения, который потребовалось развить для применения его к технологическим задачам осесимметричной теории пластичности. Распределение деформаций оценивалось натурным экспериментальным методом делительных сеток. Это позволило получить адекватные результаты по степени использова-

ния запаса пластичности, рациональному выбору количества формообразующих операций и качеству механических свойств получаемых изделий. Разработка программного продукта, реализующего методику расчета количества формообразующих операций и размеры промежуточных полуфабрикатов, осуществлялась в среде Microsoft Visual C# 2008 Express Edition с помощью созданной под операционную систему Windows программы CoreTech с графическим пользовательским интерфейсом. Прогнозные оценки вероятности брака и обработка результатов экспериментальных исследований проводились методами математической статистики.

Автор защищает:

- закономерности комплексного напряженно-деформированного состояния при новых способах многооперационной штамповки сердечников, приводящих при назначении рациональных режимов к уменьшению повреждаемости материала в опасных микрizonaх и повышению качества изготавливаемых изделий при общем уменьшении числа формообразующих и сопутствующих операций;

- впервые полученные решения аналитическим методом линий скольжения осесимметричных задач теории пластичности;

- результаты распределения деформаций, степени использования запаса пластичности, полученные на основе применения экспериментального метода делительных сеток, при исследовании предложенного комплекса формообразующих операций холодной объемной штамповки остrokонечных сердечников пуль;

- разработанную с учетом приобретаемой на каждой операции, остаточной после отжига, суммарной накопленной и предельно допустимой для конкретного изделия поврежденности деформируемого материала методику проектирования технологического процесса изготовления сердечников по новым способам, доведенную до программного продукта;

- специальную запатентованную штамповую оснастку для реализации указанных новых способов их изготовления.

Личное участие автора в получении результатов исследований. Разработаны новые способы многооперационной холодной штамповки остrokонечных сердечников пуль, спроектирована специальная штамповая оснастка для реализации предлагаемых способов штамповки указанных сердечников и получены практические рекомендации по проектированию технологических процессов на основе результатов проведенных исследований и конструкторско-технологических разработок.

Разработан аналитический метод линий скольжения для решения технологических задач осесимметричной теории пластичности и проведен ряд решений, в том числе силовой анализ операций пластического формообразования остrokонечных стальных сердечников пуль.

Экспериментальным методом делительных сеток обоснованы предельные технологические возможности и рациональные деформационные технологические режимы многооперационной холодной штамповки остrokонечных стержневых деталей ответственного назначения из высокопрочных сталей.

Разработана методика проектирования многооперационных технологий изготовления остrokонечных сердечников пуль на основе новых способов холодной штамповки, учитывающая сообщаемую на каждой операции, остаточную после отжига, суммарную накапливаемую и допустимую для готового из-

деляя повреждаемость материала, которая доведена до конечного программного продукта.

Научная новизна:

- впервые научно обоснована последовательность изменения геометрических размеров конических участков мерных цилиндрических полуфабрикатов при многооперационной холодной штамповке остроконечных сердечников пуль в диапазоне длин головной части $1,8 \leq d_0 \leq 3,5$ (где d_0 – диаметр цилиндрической части сердечника) с вершинкой $d = 0,35 - 0,10 d_0$ и сердечников в диапазоне укороченных длин головной части $0,75 \leq d_0 \leq 1,60$ с более острой вершинкой $d = 0,1 - 0,40 d_0$ инструментом с изменяющимся от операции к операции углом конусности;

- впервые получены аналитические решения методом линий скольжения осесимметричных задач теории пластичности на базе новых установленных интегральных зависимостей для расчета напряжений и предложенных правил построения полей, выходящих на прямолинейные свободные границы, которые легли в основу теоретического анализа процессов выдавливания остроконечных сердечников пуль;

- на основании комплекса экспериментальных исследований и последующих уточнений по разработанной компьютерной программе впервые установлены и апробированы рациональные углы конусности рабочей полости первых технологических операций, рациональных для последующей эффективной многооперационной штамповки высококачественных сердечников различных геометрических размеров;

- экспериментальным методом делительных сеток установлены кинематические закономерности течения деформируемого материала в полости рабочего инструмента при холодной штамповке сердечников, которые позволили в совокупности с результатами теоретических решений установить зависимость координаты микрзоны, в которой запас пластичности исчерпывается в наибольшей степени, и величины исчерпания указанного запаса пластичности с учетом повреждаемости материала от степени обжатия головной части и угла конусности рабочей полости инструмента, при этом сама деформация оказалась близкой к простой и позволяющей в дальнейших расчетах пользоваться теорией конечных деформаций.

Практическая значимость:

- разработаны и запатентованы новые способы штамповки сердечников пуль из высокопрочных материалов с проектированием специальной штамповой оснастки для их реализации;

- разработаны методика и программное обеспечение проектирования технологических процессов штамповки сердечников пуль с учетом сообщаемой на каждой операции, остаточной после отжига, суммарной накопленной и предельно допустимой для готовых изделий поврежденности материала этих сердечников;

- создан комплекс практических рекомендаций по разработке и реализации вариантов технологических процессов многооперационной холодной объемной штамповки для различных остроконечных сердечников пуль.

Реализация работы. Разработаны новые технологические процессы штамповки ряда конструктивных вариантов сердечников пуль повышенного качества из высокопрочных материалов, удовлетворяющие техническим условиям на изготовление, которые внедрены в производстве АО «Тульский патронный завод» и АО «КБП им. академика А.Г. Шипунова» со значительным экономическим эффектом.

Технико-экономическая эффективность разработанных наукоемких конкурентоспособных технологических процессов заключается в повышении эффективности действия пуль с указанными сердечниками по преградам на 18 – 26 % и снижении технологической себестоимости изготовления остроконечных сердечников на 16 – 23 % при уменьшении количества формообразующих и сопутствующих термохимических операций.

Отдельные материалы научных исследований использованы в учебном процессе на кафедре «Механика пластического формоизменения» ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»:

- при чтении лекций, проведении лабораторных и практических занятий, при подготовке магистров направления 15.04.01 «Машиностроение» и направления 15.04.02 «Технологические машины и оборудование», а также в научно-исследовательской работе студентов.

По материалам диссертационной работы опубликованы 2 учебных пособия для подготовки магистров направлений 15.04.01 «Машиностроение» и 15.01.02 «Технологические машины и оборудование»:

1. Механика процессов пластического формообразования: учеб. пособие / С.В. Недошивин [и др.] / под ред. С.С. Яковлева. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. 181 с.;

2. Специальные технологические процессы холодной обработки металлов давлением: учеб. пособие. В 2-х ч. Часть 1. Специальные технологические процессы холодной штамповки / С.В. Недошивин [и др.] / под ред. С.С. Яковлева. 2-е изд. перераб. и доп. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. 200 с.

Апробация работы. Результаты исследований доложены на Международной НТК, посвященной 150-летию со дня рождения С.И. Мосина, г. Тула, 1999; Международной НТК «Проблемы проектирования и производства систем и комплексов», г. Тула, 2001; Международной НТК «Пути повышения эффективности применения ракетно-артиллерийских комплексов», г. Пенза. ПАИИ, 2001; Региональной НТК «Техника XXI века глазами молодых ученых и специалистов», г. Тула, 2002; Международной НТК «Прогрессивные методы и технологическое оснащение процессов обработки металлов давлением», г. Санкт-Петербург, 2009, а также на ежегодных научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет» (2005-2017 гг.).

За значительный вклад в развитие науки и техники в области машиностроения и новых технологий автор в составе коллектива в 2011 г. был удостоен звания лауреата премии им. С.И. Мосина.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 33 работы, среди них: 28 статей в рецензируемых изданиях и сборниках, входящих в «Перечень периодических научных и научно-технических изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук»; 2 статьи в различных сборниках научно-технических трудов, 4 патента, 1 свидетельство о регистрации программы на ЭВМ. Общий объем – 42 печ. л., авторский вклад – 22 печ. л.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести разделов, заключения, списка использованных источников из 210 наименований, 4 приложений и включает 324 страницы основного текста, 116 рисунков и 29 таблиц. Общий объем - 358 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность рассматриваемой в работе проблемы, ее научная новизна, практическая полезность и кратко раскрыто содержание разделов диссертационной работы.

Первый раздел содержит анализ патентных исследований современных конструкций остроконечных сердечников. Все известные конструкции сердечников классифицированы на основе геометрических параметров головных частей. Выделены три основные группы современных остроконечных сердечников, требующие своего варианта технологии их изготовления.

Так, к первой группе отнесены сердечники, имеющие удлиненную головную часть $1,8 \leq d_0 \leq 3,5$ с относительно острой вершинкой, диаметр которой лежит в интервале $d - 0,35 - 0,10d_0$, ко второй группе – сердечники с укороченной головной частью, более островершинные – $d \leq 0,10d_0$. К третьей группе отнесены островершинные высокопрочные сердечники пульс с двухступенчатой удлиненной острой головной частью.

Проанализированы известные подходы к технологии изготовления указанных сердечников. Выяснено, что большинство традиционных способов пластического формообразования не обеспечивают возможности окончательного и бездефектного получения остроконечных головных частей сердечников в условиях крупносерийного и массового автоматизированного производства отрасли. Обоснована целесообразность способа пластического формообразования, представляющего собой прямое выдавливание в профильную рабочую полость по схеме с разъемным инструментом.

Проведён анализ результатов теоретических исследований типовых операций холодной штамповки сердечников в условиях плоского деформированного состояния. В частности, рассмотрены существующие подходы к экспериментальным исследованиям, рассмотрено известное теоретическое решение задачи о течении материала в сужающемся клиновом канале при аппроксимации свободной границы дугой окружности, основанное на аналитическом методе линий скольжения. Поставлены цель и задачи исследований, проводимых в данной работе.

Во втором разделе обоснованы варианты технологического процесса на основе новых способов пластического формообразования типовых конструк-

тивных вариантов сердечников, предварительно классифицированных на соответствующие группы по различным конструктивным особенностям.

Для изготовления сердечников первой группы разработаны способ холодной штамповки, учитывающий особенности изготовления удлиненных остроконечных головных частей, устройство для его осуществления и патент РФ №2376099 (рис. 1). Предлагаемый способ заключается в многооперационной штамповке головной части сердечника пуансонами с уменьшающимися на заключительных операциях углами конусности рабочей полости инструмента. Извлечение проводится упором выталкивателя в задний массивный торец заготовки. После каждой штамповки осуществляют отжиг полуфабриката на максимальную пластичность.

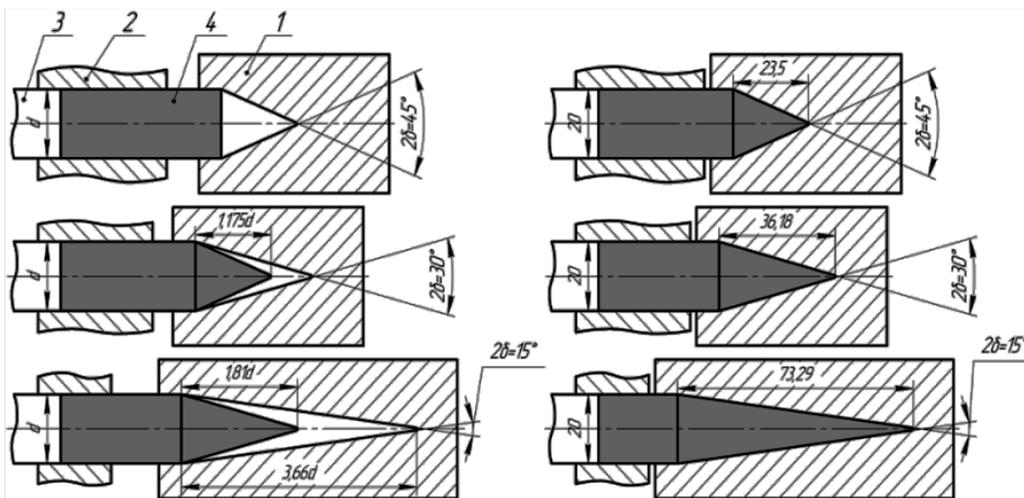


Рис. 1. Схема последовательного холодного пластического формообразования остроконечных высокопрочных сердечников с удлиненной головной частью первой группы: 1 – пуансон; 2 – матрица; 3 – выталкиватель; 4 – заготовка

Суть данного способа заключается в том, что на первых (одной или нескольких) формообразующих операциях штампуется лишь доля головной части сердечника рабочей полостью пуансона, имеющей угол конусности, гораздо больше заданного, до диаметра вершинки, близкого к соответствующему чертежу. При этом большое отрицательное гидростатическое давление, необходимое для затекания деформируемого материала в вершинку малого диаметра, существенно способствует залечиванию микродефектов и улучшению механических характеристик полуфабриката. Далее штамповку ведут инструментом, имеющим уменьшающийся от операции к операции угол конусности рабочей полости инструмента. На этих операциях первоначальный контакт рабочей полости и заготовки-полуфабриката осуществляется по линии смыкания цилиндрического и конического участков (см. рис. 1) и распространяется в обе стороны, затрагивая лишь мало деформированные и недеформированные ранее области.

Для изготовления сердечников второй группы разработан способ холодной штамповки, учитывающий особенности изготовления укороченных головных частей с остроконечной вершинкой (патент РФ № 2423202) (рис. 2). Способ заключается в том, что в процессе штамповки на первых операциях (рис. 2, а) по аналогии с предыдущим способом формируется конусный участок заготовки пуансоном с неизменным большим углом конусности рабочей полости до момента образования вершинки, имеющей диаметр $d = 0,25d_0$.

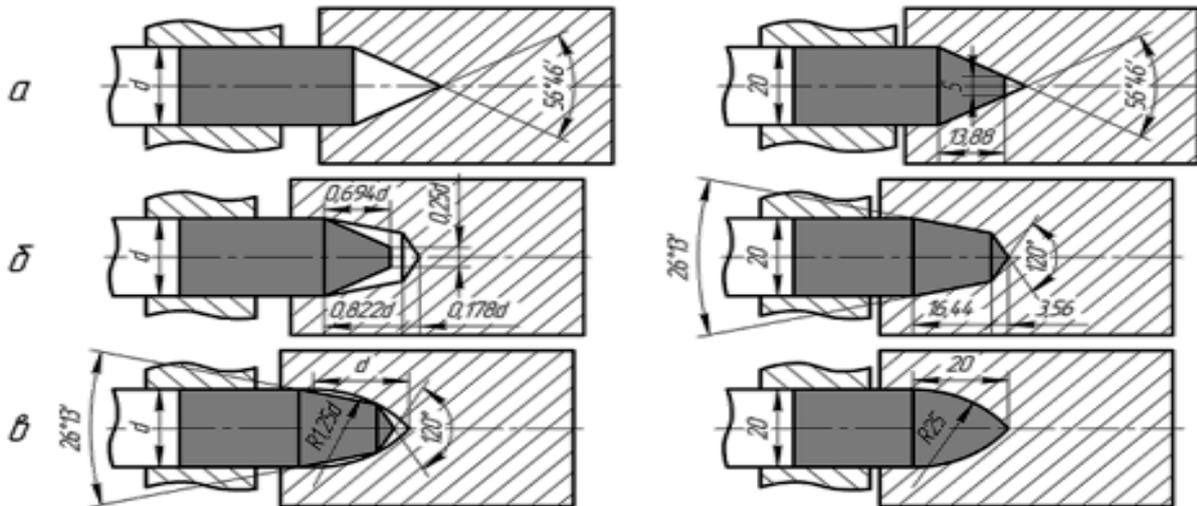


Рис. 2. Схема последовательного процесса изготовления сердечников с короткими остроконечными головными частями: а – штамповка пуансоном с увеличенным углом конусности рабочей полости пуансона; б – высадка острия малых размеров; в – окончательная штамповка пуансоном с рабочим профилем оживальной формы

На последующей операции (рис. 2, б) осуществляются формообразование острия и формирование двух сопряженных конусных участков заготовки. Малый смещаемый объем на начальном этапе формирования остроконечной вершинки головной части и весьма большой угол конусности этой вершинки обеспечивают качественное заполнение остроконечного профиля ранее, чем произойдет формообразование остальной головной части полуфабриката изготавливаемого сердечника. На заключительной операции формируется коническая или оживальная форма головной части сердечника, соответствующая чертежу изделия.

Для рационального формообразования высокопрочных сердечников третьей группы и учёта особенностей изготовления двухступенчатых остроконечных головных частей разработан способ холодной штамповки, представляющий комбинацию двух представленных ранее способов (патент РФ №2376099 и № 2423202 (рис. 3)). Этот способ позволил изготавливать конструктивные варианты сердечников современных типов, которые за счёт удлинённой двухступенчатой остроконечной формы головной части обладают улучшенными эксплуатационными характеристиками. Как и ранее, механические характеристики указанных сердечников оказываются значительно лучше, чем у сердечников, изготавливаемых другими известными способами.

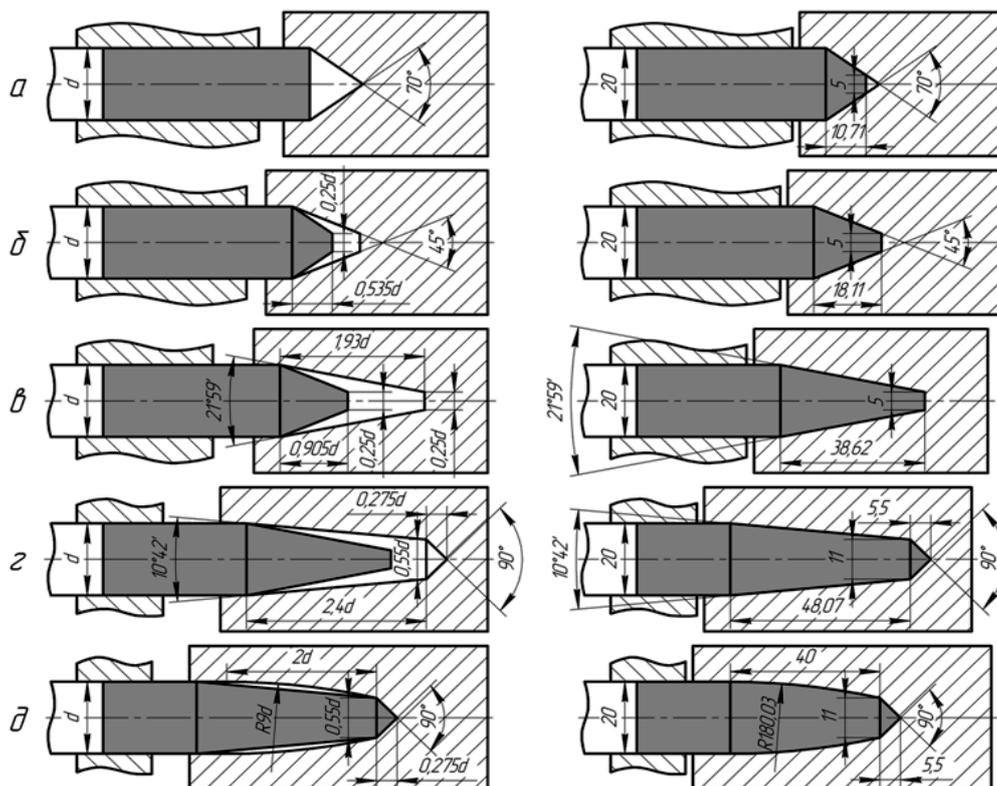


Рис. 3. Схема последовательного процесса изготовления сердечников высокопрочных сердечников с удлинённой двухступенчатой головной частью

В третьем разделе разработан математический аппарат аналитического решения широкого класса задач осевой симметрии для вариантов, когда свободная от внешних нагрузок и контакта граница пластической области аппроксимируется отрезком прямой линии.

Полная система уравнений для случая осесимметричного напряженного состояния включает в себя дифференциальное уравнение равновесия

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0; \quad \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} = 0. \quad (1)$$

условие пластичности

$$|\tau_{12}| \leq \sigma_s/2; \quad |\tau_{23}| \leq \sigma_s/2; \quad |\tau_{31}| \leq \sigma_s/2. \quad (2)$$

и гипотезу Хаара-Кармана, которая для разных участков призмы (т. А и т. В призмы Сен-Венана-Треска (рис. 4) имеет вид

$$\begin{aligned} \sigma_1 - \sigma_2 = 2 \cdot k, \quad \sigma_\theta = \sigma_3 = \sigma_2 \quad \text{при} \quad v_r \leq 0 \quad (\text{ребро или режим } A); \\ \sigma_1 - \sigma_2 = 2 \cdot k, \quad \sigma_\theta = \sigma_3 = \sigma_1 \quad \text{при} \quad v_r \geq 0 \quad (\text{ребро или режим } B). \end{aligned} \quad (3)$$

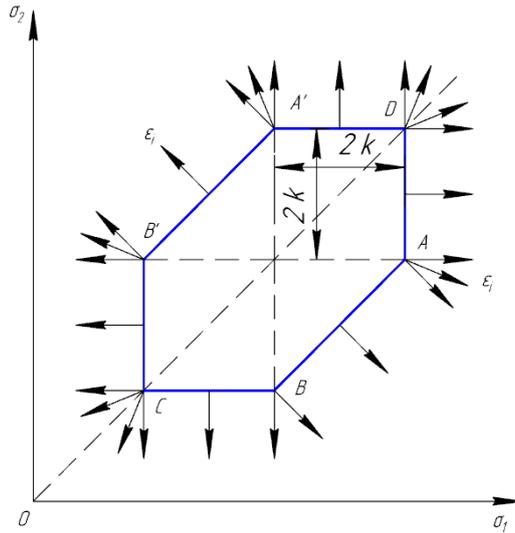


Рис. 4. Сечение призмы Треска плоскостью $\sigma_3 = \text{const}$ (стрелками показаны возможные направления вектора скорости деформации с проекциями $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$)

Совместное решение данной системы уравнений сводится к уравнениям линий скольжения

$$d\sigma - 2k \cdot d\phi = \frac{k}{r} (\sin \phi \mp \cos \phi) \cdot ds_\alpha \quad \text{вдоль } \alpha\text{-линий}; \quad (4)$$

$$d\sigma + 2k \cdot d\phi = -\frac{k}{r} (\sin \phi \mp \cos \phi) \cdot ds_\beta \quad \text{вдоль } \beta\text{-линий},$$

и соотношениям между средним напряжением σ и характеристическим углом ϕ , которые в интегральной форме принимают следующий вид:

$$\sigma = \sigma_0 - 2 \cdot k \cdot (\phi_0 - \phi) \pm k \cdot \left(\frac{r_0 \pm \Delta z}{r_0 + \Delta r} - 1 \right) \quad \text{вдоль } \alpha\text{-линий}; \quad (5)$$

$$\sigma = \sigma_0 + 2 \cdot k \cdot (\phi_0 - \phi) \pm k \cdot \left(\frac{r_0 \mp \Delta z}{r_0 + \Delta r} - 1 \right) \quad \text{вдоль } \beta\text{-линий}.$$

Эти интегральные соотношения отличаются от интегралов Генки, полученных из условия плоской деформации дополнительным слагаемым, зависящим от изменения радиальной Δr и осевой Δz координат вдоль линий скольжения.

Также сформулированы правила и получены соответствующие зависимости аналитического описания участков полей линий скольжения ABC (рис. 5), примыкающих к прямолинейной свободной от контакта и внешних нагрузок пластической границе AB , в осесимметричных задачах теории пластичности при аппроксимации граничных линий скольжения этих участков логарифмическими спиралями AC и BC с учетом необходимых геометрических соотношений и сохранении постоянства среднего напряжения вдоль свободной границы.

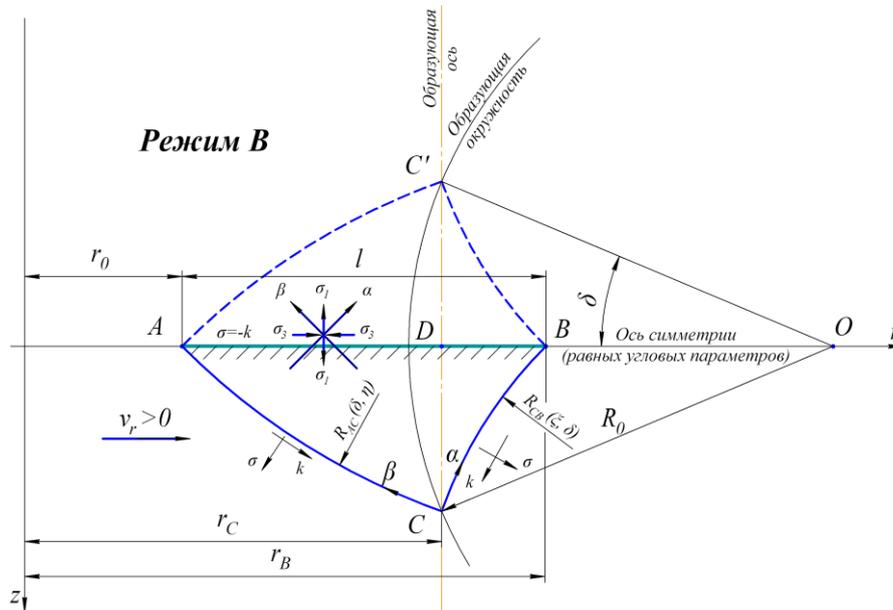


Рис. 5. Конструкция пластических участков, примыкающих к свободной прямолинейной границе образованных линиями скольжения, являющимися логарифмическими спиралями

Трансцендентное уравнение связи между геометрическими параметрами δ и \bar{r}_0

$$\delta = 0,5 - 0,25 \left[\frac{2 \cdot \bar{r}_0 \cdot \text{sh} \delta + \sin \delta}{2 \cdot \bar{r}_0 \cdot \text{sh} \delta + \exp \delta - \cos \delta} + \frac{2 \cdot \bar{r}_0 \cdot \text{sh} \delta + \exp \delta - \cos \delta - \sin \delta}{2 \cdot \text{sh} \delta \cdot (\bar{r}_0 + 1)} \right], \quad (6)$$

где δ - половинный угол сектора образующей окружности (рис. 5), соответствующий углам поворота касательной при перемещении вдоль граничных линий скольжения AC и BC ; $\bar{r}_0 = \frac{r_0}{l}$ - относительное удаление начальной расчетной точки свободной границы (точки A) от оси симметрии.

При этом доказано следующее.

Аналитическими расчетами проверено утверждение Р. Шилда о том, что аналогичные по конструкции поля линий скольжения в задачах осевой симметрии и в условиях плоской деформации возможны лишь в случае, когда прямолинейная свободная граница ортогональна радиальной координате (рис 6):

$$\sigma_E = \sigma_0 = -k; \quad (7)$$

$$\sigma_D = -k + k \cdot \frac{\frac{1}{2}l + \left(-\frac{1}{2}l\right)}{r_1 + \frac{1}{2}l} = -k; \quad (8)$$

$$\sigma_A = -k. \quad (9)$$

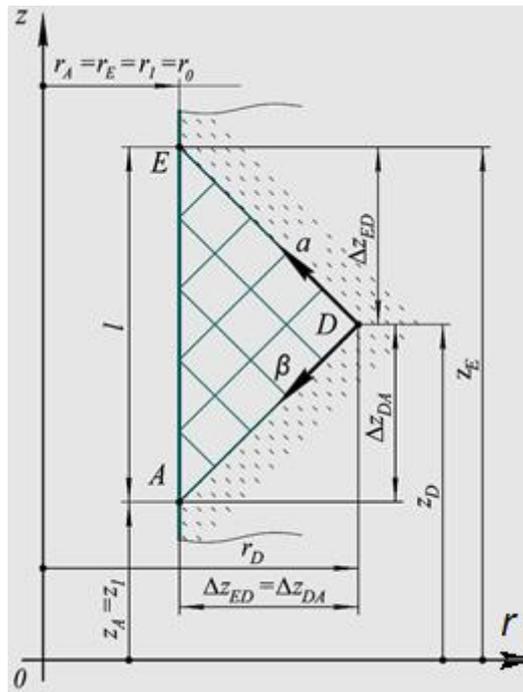


Рис. 6. Соответствие полей линий скольжения в задачах плоской и осевой деформации на свободной границе при условии ее ортогональности радиальной координате

Центрированный веер с прямыми линиями, выходящими из одной точки, в осесимметричных задачах не является полем простого напряженного состояния, и расчеты среднего напряжения следует вести, интегрируя по линиям скольжения, являющимся дугами окружности, но не по лучам веера.

Достоверность установленных интегральных соотношений между средним напряжением вдоль линий скольжения и полученными правилами построения пластических участков, примыкающих к прямолинейной свободной границе, проверена аналитическим решением классической задачи А.Ю. Ишлинского, Р. Шилда о начальном пластическом течении материала при вдавливании гладкого плоского цилиндрического штампа в полубесконечное пространство. При этом полностью отсутствовали элементы подобия с полями плоской деформации, а результаты показали хорошую сходимость с известным решением, выполненным ранее численным методом расчета.

Разработанный математический аппарат использован для силового анализа пластического формообразования головной части сердечников пуль с достаточно большой результирующей степенью обжатия. Данная конструкция образована прямолинейной свободной пластической границей AB слоя, затекающего в конус с односторонним углом при вершине ω (рис. 7). Пластический участок ABC , примыкающий к свободной границе, образован логарифмическими спиралями: β – линией AC и α – линией BC . Поле линий скольжения, схематизирующее пластическую область, содержит 11 пластических участков.

Для преодоления математических трудностей при дифференцировании и интегрировании использовано двумерное и одномерное интегральные преобразования Лапласа – Карсона (операционное исчисление) соответственно

В результате определены следующие геометрические и силовые параметры исследуемого процесса:

- относительная длина штампуемой головной части

$$\bar{h} = \frac{h}{d_0} = \frac{1}{4 \cdot \exp(\delta + \omega)} \left[\left(3 \cdot \varphi_0^4(\delta, \omega) - 2 \cdot \varphi_1^4(\omega, \delta) + U_0 \left\{ 2(\delta + \omega); 2\sqrt{(\delta + \omega)\omega} i \right\} \right) \cdot \cos \delta + \right. \\ \left. + U_1 \left\{ 2\delta; 2\sqrt{\delta(\delta + \omega)} i \right\} \cdot \sin \delta - \cos(\delta + \omega) \right]; \quad (14)$$

- относительная технологическая сила, необходимая для реализации процесса штамповки головной части соответствующих геометрических размеров

$$\frac{P}{k \cdot d_0^2} = 2\pi \cdot \sin^2 \omega \cdot \left\{ \begin{array}{l} \exp 2(\omega + \delta) \left[2 \cdot \varphi_1^4\{\delta, 2\omega\} \cdot \cos(2\omega + \delta) - \left(U_0 \left\{ 2\delta; 2\sqrt{\delta 2\omega} i \right\} + 4\varphi_0^4\{(\delta + \omega), 2\omega\} \right) \cdot \cos(\omega + 3\delta) \right] + \\ + \exp(\omega + 3\delta) \left[\omega \cdot \varphi_0^4\{\delta, 2\omega\} \cdot \sin(\omega - 2\delta) - U_1 \left\{ 2(\delta + \omega); 2\sqrt{(\delta + \omega)2\omega} i \right\} \cdot \cos(\omega + 2\delta) \right] + \exp(\omega + \delta) \cdot sh\delta + \\ + \exp \omega \left[2\omega \left(sh\delta + 3 \cdot U_1 \left\{ 2\delta; 2\sqrt{\delta 2\omega} i \right\} \right) \sin(\omega - 3\delta) + 2\omega (sh\delta + \cos \omega) \cdot \left(U_1 \left\{ 2\delta; 2\sqrt{\delta 2\omega} i \right\} - \sin(\omega + \delta) \right) \right] + \\ + 4 \cdot \varphi_1^4\{(\delta + \omega), 2\omega\} \cdot \cos(2\omega + \delta) - 2(\omega + \delta) U_0 \left\{ 2(\delta + \omega); 2\sqrt{(\delta + \omega)2\omega} i \right\} \end{array} \right\}$$

Графические зависимости удельной относительной безразмерной силы пластического формообразования конических головных частей сердечников пуль гладким инструментом от относительной высоты этих головных частей для различных углов при вершине конуса приведены на рис. 8.

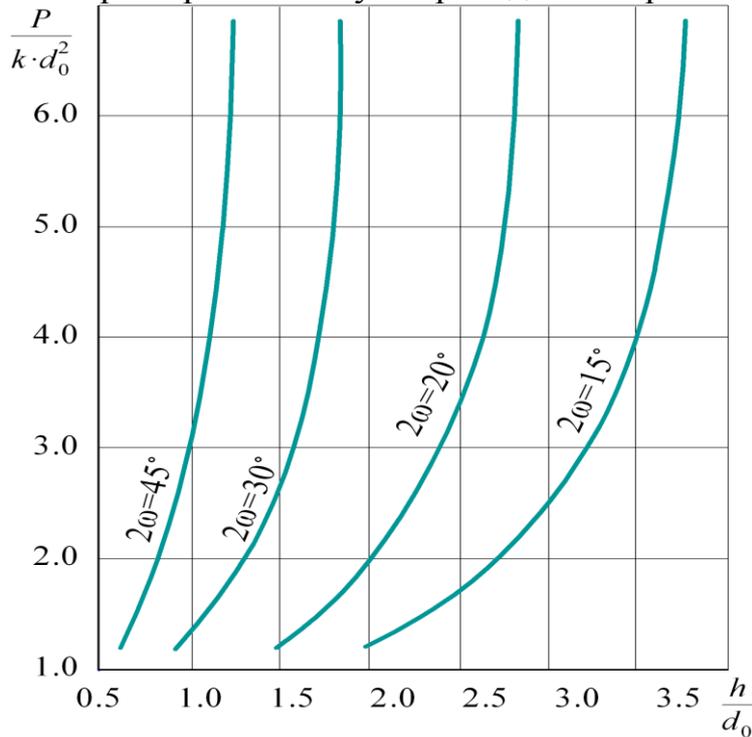


Рис. 8. Графические зависимости безразмерной силы, необходимой для холодной штамповки головных частей сердечников, от относительной высоты головной части для различных значений угла конусности

При этом установлены соотношения для оценки степени обжатия вершинки головной части сердечника по отношению к диаметру исходной цилиндрической заготовки:

$$\operatorname{tg} \omega = \frac{d_0/2 - d/2}{h} = \frac{d_0 - d}{2h}; \quad (15)$$

$$d = d_0 - 2h \cdot \operatorname{tg} \omega. \quad (16)$$

В относительных величинах

$$\bar{d} = \frac{d}{d_0} = 1 - \frac{2h}{d_0} \cdot \operatorname{tg} \omega. \quad (17)$$

Проведенный силовой анализ исследуемой технологической операции штамповки головных частей сердечников пуль позволяет оценить уровень контактных давлений на инструмент, а следовательно, спрогнозировать его стойкость или выбрать материал инструмента. Определение интегральной технологической силы обеспечит возможность рационального выбора технологического оборудования по силовому параметру и произведения необходимых прочностных расчетов технологической оснастки.

Установлено, что попытки применения соотношений плоской теории пластичности в методе линий скольжения для проведения аналогичного силового анализа приводят, в частности, к заниженным оценкам необходимой технологической силы на **24 – 36 %** в зависимости от геометрических размеров изготавливаемых сердечников пуль и применяемых материалов заготовок.

Результаты проведенного теоретического исследования иллюстрированы прочими графическими зависимостями, которые в ряде случаев аппроксимированы удобными для практического использования полиномиальными моделями с указанием статистических параметров качества их аппроксимации.

В четвертом разделе изложены результаты исследований деформированного состояния в технологических операциях штамповки сердечников с коническими головными частями методом делительных сеток инструментом, имеющим рабочую полость с изменяющимся от операции к операции углом конусности.

Анализ предварительных исследований показал, что при применении постоянного угла конусности рабочей полости инструмента на формообразующих операциях максимальные степени деформации сдвига Λ формируются в достаточно узкой области, связанной с одними и теми же материальными волокнами, в течение всего процесса деформирования. Это приводит к увеличению числа формообразующих операций и общему ухудшению механических характеристик деформируемого материала.

Разработанный алгоритм процесса штамповки остроконечной головной части предусматривает наличие двух этапов, первый из которых, как уже отмечалось, производился за одну или несколько операций инструментом с постоянным углом конусности, существенно превышающим чертежный до получения полуфабриката с укороченной головной частью и диаметром вершинки, соответствующим требуемому в готовом изделии, второй – в матрицах с уменьшающимся углом конусности.

Эксперименты проводились с помощью устройства (рис. 9), представляющего собой жесткий бандаж с коническим сквозным отверстием, куда помещаются две конические полуматрицы (для возможности извлечения полуфабриката после окончания процесса деформирования), образующие при смыкании профильную рабочую полость с коническим и цилиндрическим участками.

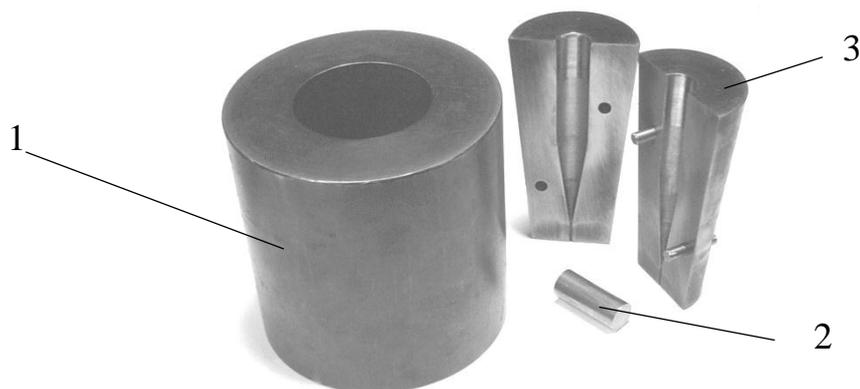


Рис. 9. Экспериментальное штампующее устройство
1 – бандаж; 2 – пуансон; 3 – полуматрица

Для установления характера деформации (простая или сложная) в соответствии с рекомендациями весь процесс штамповки острия поделен на четыре последовательных этапа, для каждого из которых определялись необходимые параметры деформированного состояния. Внутри каждого этапа деформация принималась простой, а накопленное значение степени деформации сдвига определялось суммированием соответствующих значений по всем этапам. Кроме поэтапного расчета параметров напряженно-деформированного состояния, был выполнен расчет Λ и σ/T сразу для четвертого этапа с применением формул теории конечных деформаций и построены аналогичные изолинии. Результаты сопоставления показали, что деформацию с незначимо малым уровнем погрешности следует считать простой, и для дальнейшего изучения влияния технологических и геометрических параметров процесса пластического формообразования острия на распределение параметров накопленных деформаций можно применять теорию конечных деформаций. Зная координаты опасных точек и значения накопленной степени деформации сдвига Λ в них, с помощью кривой упрочнения для конкретного материала определяется величина интенсивности касательных напряжений T_y с учетом деформационного упрочнения.

Результаты анализа деформированного и напряженного состояния на каждом этапе (с учетом результатов теоретического анализа распределения напряжений аналитическим методом линий скольжения) позволяют построить в меридиональной плоскости изолинии накопленной степени деформации сдвига Λ и соответствующие им значения показателя напряженного состояния σ/T_y . Наибольшее исчерпание запаса пластичности реализуется в микрizonaх, прилегающих к оси симметрии, на определенном расстоянии от вершинки H_0 .

На рис. 10 представлены результаты расчетов при штамповке головной части сердечника из стали У12А по разработанной технологии, когда на первой стадии для получения диаметра вершинки $d = 0,1d_0$ (где d_0 - диаметр цилиндрического участка сердечника) потребовались три формообразующие операции с сопутствующими термохимическими циклами, а последующие две опе-

рации до получения чертежного размера производились инструментом с уменьшающимся углом конусности рабочей полости.

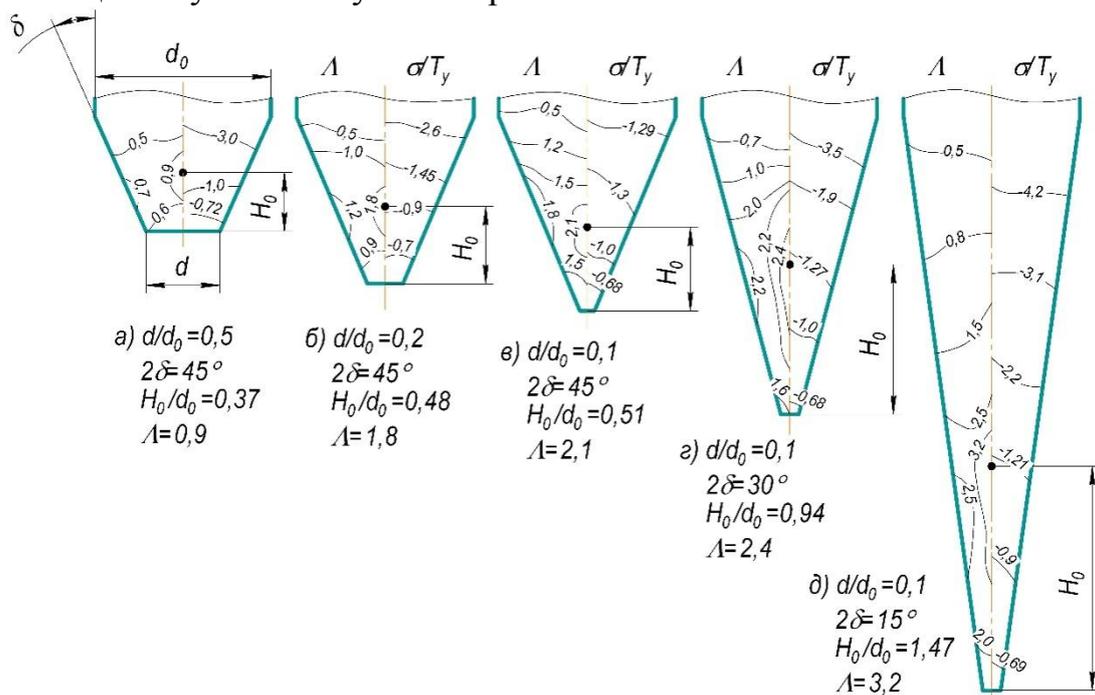


Рис. 10. Изолинии распределения Λ (справа от оси симметрии образцов из стали У12А) и σ/T_y (слева) по операциям в конических матрицах с уменьшающимся на 4-й и 5-й операциях углом конусности

Из сопоставления результатов, приведенных на изолиниях, рассчитанных по теории конечных деформаций, при штамповке инструментом с постоянным углом конусности и по предлагаемой технологии следует, что при использовании уменьшающегося угла конусности полости инструмента опасные точки штампуемых образцов значительно меняют свои координаты (смещаются к основанию головной части изделия), оставаясь на оси симметрии, и связаны уже с другими материальными волокнами, в которых предварительные величины Λ и σ/T_y были значительно меньше, чем в зоне опасной точки. Это позволяет значительно уменьшить накопленные микрповреждения материала штампуемой головной части и выровнять механические характеристики по деформируемому объему.

По результатам исследований были построены аппроксимированные зависимости относительного расстояния от вершинки штампуемого острия до опасной точки от отношения диаметра вершинки к исходному диаметру заготовки $H_0/d_0 = f(d/d_0)$, накопленной степени деформации сдвига $\Lambda = f(d/d_0)$ и показателя напряженного состояния $\sigma/T_y = f(d/d_0)$ от отношения этих же геометрических параметров для различных углов конусности 2δ :

$$H_0/d_0 = \exp[1,951 - 1,862 \cdot \left(\frac{d}{d_0}\right)^2 - 0,6615 \cdot \ln 2 \delta]; \quad (18)$$

$$\Lambda_{\Sigma} = \frac{14,844 - 2\delta}{17,301} + \frac{69,193 - 2\delta}{6,024} \cdot 0,4343 \cdot \ln\left(\frac{d_0}{d}\right); \quad (19)$$

$$\sigma/T = -0,286 - 0,004 \cdot \delta + 0,741 \cdot \ln\left(\frac{d}{d_0}\right). \quad (20)$$

Размерное значение среднего напряжения σ и интенсивность касательных напряжений T_y с поправкой на упрочнение устанавливаются отдельно для конкретного материала.

Результаты проведенного экспериментального исследования методом делительных сеток и рассчитанные в опасных точках значения Λ и σ/T_y позволяют оценить степень использования запаса пластичности материала с использованием диаграмм предельной пластичности, построенных для соответствующих материалов (рис. 11). На этом же рисунке приведены соответствующие истории деформирования в наиболее опасной точке, рассчитанные по результатам указанного ранее экспериментального исследования методом делительных сеток. Точками на них отмечены состояния, соответствующие окончанию каждого этапа.

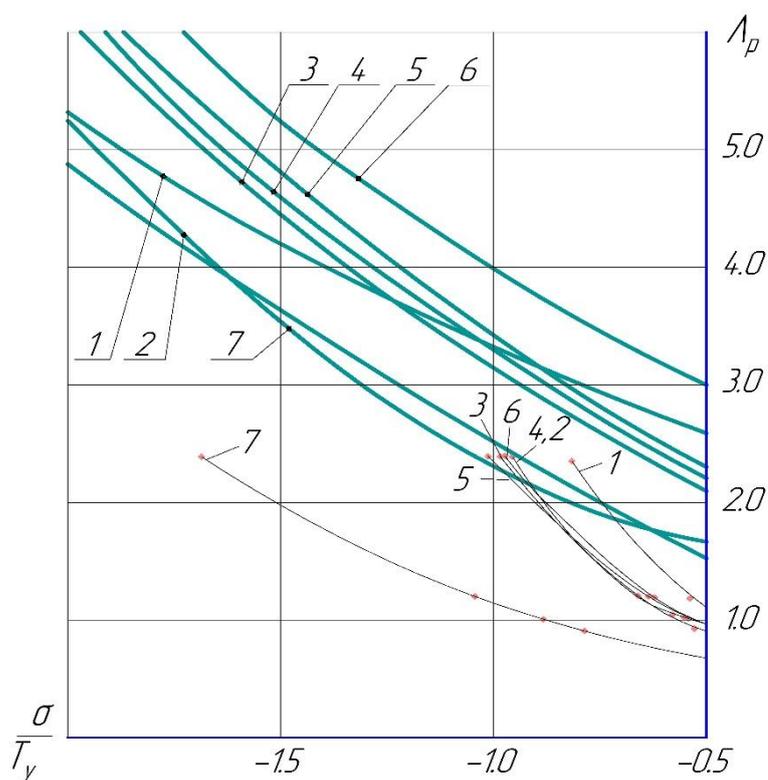


Рис. 11. Диаграммы предельной пластичности и истории нагружения в наиболее опасной точке на оси симметрии с координатой H_0 для сталей: 1 – сталь 20; 2 – сталь 45; 3 – сталь У8А; 4 – сталь У10А; 5 – сталь У12А; 6 – сталь 65Г; 7 – сталь 60С2А

В пятом разделе приводятся результаты проектирования многооперационных технологических процессов холодной штамповки сердечников с учетом повреждаемости материала.

Построенная И.П. Ренне зависимость для учета повреждаемости при холодной штамповке лопастей стабилизаторов стреловидных пуль содержит следующие составляющие повреждаемости: ω_i – поврежденность, сообщаемая материалу на каждой i -й операции; $\Delta\omega_i$ – остаточная после пооперационной термической обработки поврежденность; ω^* – суммарная накопленная поврежденность и $[\Delta\omega_i]$ – предельно допустимая техническими условиями на изготовление поврежденность конкретного изделия.

При этом первый участок пунктирной ломаной линии $0,3 \leq \omega^* \leq 0,7$ (рис. 12) аппроксимируется зависимостью $\Delta\omega_i = 0,5 \cdot (\omega^* + \Delta\omega_{i-1} - 0,3)$, в пределах данного диапазона целесообразно работать. В диапазоне второго участка $0,7 \leq \omega_i \leq 1,0$ – $\omega_i = 0,2 + 2,67 \cdot (\omega_i + \Delta\omega_{i-1} - 0,7)$ работа не представляется возможным, поскольку остаточная после отжига деформация катастрофически возрастает.

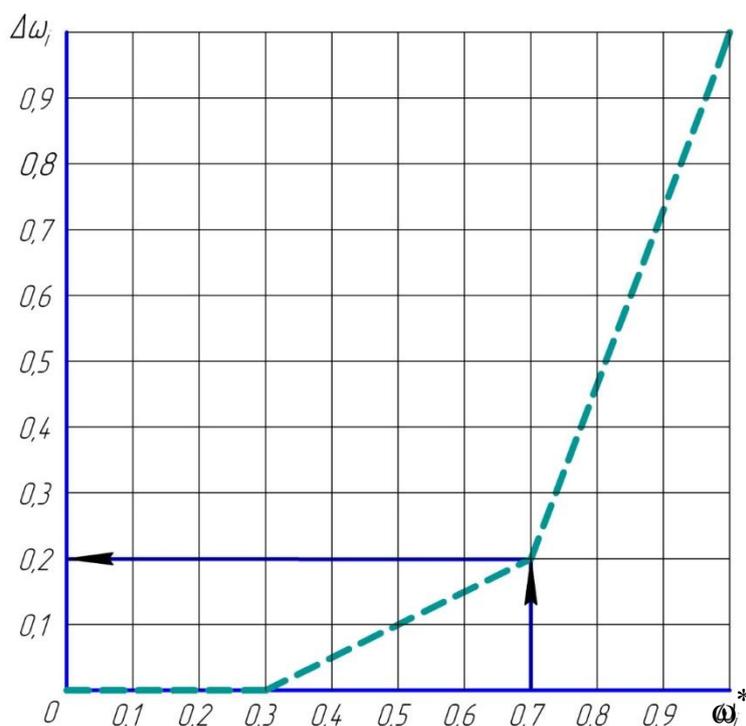


Рис. 12. Зависимость остаточной после отжига поврежденности $\Delta\omega_i$ материала от суммарной накопленной степени поврежденности на текущей i -й операции при пластическом формообразовании стальных изделий

Разработанная методика проектирования рационального технологического процесса многооперационной холодной штамповки стальных высокопрочных сердечников пуль представляет собой следующий алгоритм.

1. На первом (предварительном) этапе необходимо получить диаметр притупления вершинки головной части сердечника, близкий к заданному. Для этого необходимо применять инструмент с постоянным углом конусности (за-

ведомо большим, чем угол, заданный чертежом). При этом последовательно рассчитываются диаметры притупления вершинок полуфабрикатов по операциям первого этапа так, чтобы результирующая остаточная поврежденность не превышала предусмотренной техническими условиями на изготовление поврежденности готового сердечника.

Данный этап основывается на подборе диаметра притупления головной части полуфабрикатов с учетом того, что суммарная накопленная поврежденность ω^* , сообщаемая материалу на каждой i -й операции, должна устраняться промежуточной термической обработкой до некоторого значения $\Delta\omega_i$, допустимого при функционировании изделия. Последовательность расчета геометрических размеров полуфабрикатов следующая:

1.1. Устанавливается значение суммарной накопленной степени деформации сдвига Λ_Σ в опасной точке по зависимости (19).

1.2. Определяется показатель напряженного состояния σ/T в опасной точке без учета деформационного упрочнения по найденной из теоретического анализа распределения напряжений в пластической области методом линий скольжения зависимости (20), используя координату опасной точки H_0/d_0 , найденную по результатам экспериментального исследования методом делительных сеток (18).

1.3. Так как в процессе холодной штамповки материал подвергается деформационному упрочнению, необходимо скорректировать показатель напряженного состояния путем использования аппроксимированных кривых упрочнения для конкретных сталей и введения поправки на деформационное упрочнение T/T_y .

1.4. Оценивается степень использования запаса пластичности. Величина предельной степени деформации сдвига определяется также для конкретного материала по диаграмме предельной пластичности в зависимости от показателя напряженного состояния σ/T_y .

1.5. Поврежденность, сообщаемая материалу на i -й операции, определяется по зависимости

$$\omega_i = \frac{\Lambda_i}{\Lambda_{p_i}}, \quad (21)$$

где Λ_i – степень деформации сдвига, сообщаемая материалу на i -й операции; Λ_{p_i} – соответствующее показателю напряженного состояния значение предельной степени деформации на этой же операции.

Как уже отмечалось, при проектировании технологического процесса холодной штамповки головных частей целесообразно работать с участком графика $0,3 < \omega^* \leq 0,7$. Комплекс экспериментальных исследований на первых формообразующих операциях, когда формируется заданный диаметр притупления вершинки, показал, что с учетом повышенного гидростатического напряжения в отличие от рекомендаций И.П. Ренне для получения качественного изделия с

заданными механическими свойствами материалу на каждой операции должна сообщаться следующая поврежденность: $\omega_i = [\Delta\omega] + 0,3$. В частности, для стальных сердечников пуль данный параметр не должен превышать значения $0,2 \dots 0,3$.

1.6. Полученные в п.6 значения поврежденности ω_i сравнивают с допустимой поврежденностью $[\omega_i]$, и если условие $\omega_i \leq [\omega_i]$ не выполняется, то необходимо провести подбор последовательным увеличением диаметра притупления вершинки полуфабриката d_i , выполняя вычисления с п. 2 по п. 6 до тех пор, пока данное условие не будет соблюдено.

1.7. Исходя из геометрических соотношений, определяются высоты головных частей полуфабрикатов сердечников по следующей зависимости:

$$h_i = \frac{d_{0i} - d_i}{2 \cdot \operatorname{tg}(2\delta/2)}. \quad (22)$$

Установлена зависимость для определения рационального угла штамповки на первом этапе технологического процесса, позволяющая минимизировать поврежденность готового сердечника при минимальном суммарном количестве операций. Было выявлено, что на выбор величины начального (постоянного на первом этапе) угла значительное влияние оказывает диаметр притупления вершинки готового сердечника, влияние же свойств материала и угла конусности готового сердечника менее значимое.

На рис. 13 представлен график зависимости рационального угла штамповки полуфабрикатов на первом этапе технологического процесса от относительного диаметра притупления вершинки готового сердечника. Из представленного графика следует, что чем меньше окончательный диаметр притупления вершинки готового изделия, тем больше должен быть угол конусности рабочей полости инструмента, применяемого на первом этапе. Для удобства практического применения график, приведенный на рис. 13, был аппроксимирован следующей зависимостью:

$$\delta_n = 0,5 \sqrt{3695 + 1393 / \ln\left(\frac{d}{d_0}\right)}. \quad (23)$$

Следовательно, при проектировании технологического процесса штамповки конических головных частей высокопрочных сердечников, необходимо сначала по заданному относительному диаметру притупления вершинки готового сердечника определить оптимальный угол конусности полуфабрикатов первого этапа по данным, приведенным на рис. 13 или установленной зависимости (23), а затем произвести необходимые расчеты по данному алгоритму.

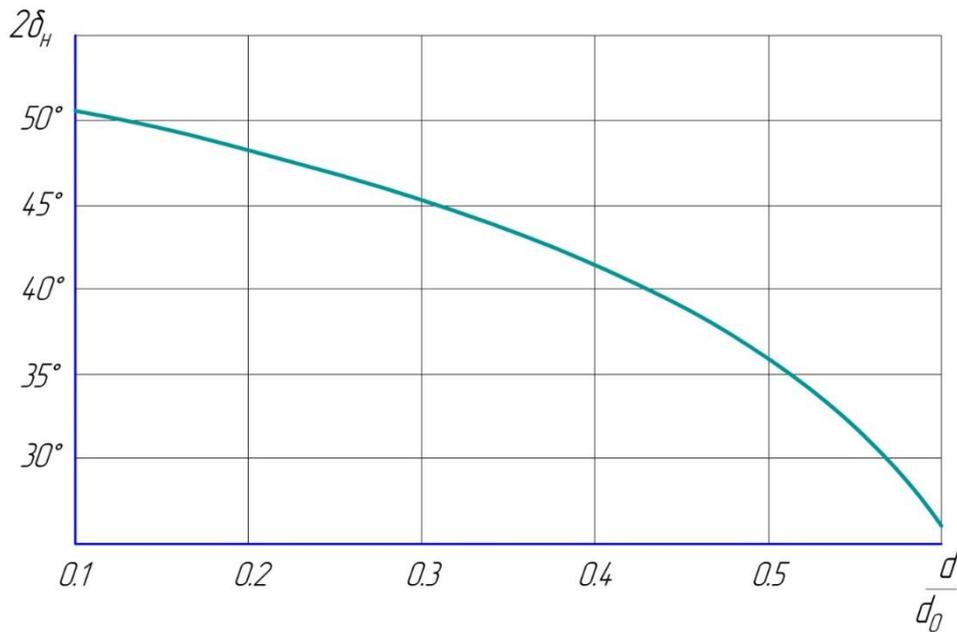


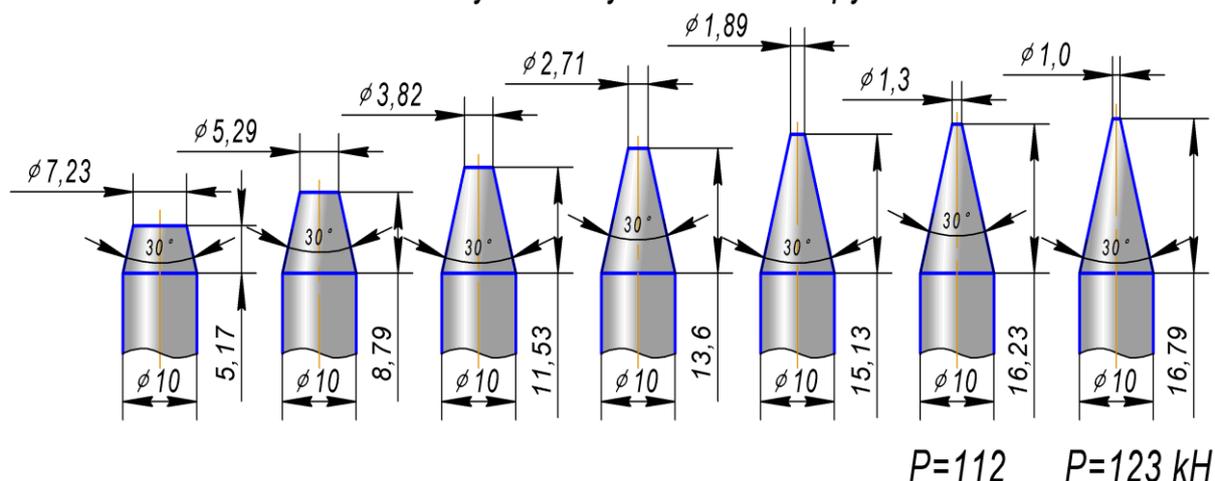
Рис. 13. График зависимости рационального угла штамповки полуфабрикатов на первых операциях формообразования, обеспечивающего минимальную поврежденность готового изделия при минимальном общем числе операций, от относительного диаметра притупления вершинки готового сердечника

2. На втором этапе многооперационного технологического процесса диаметр притупления вершинки практически не изменяется, угол конусности рабочей полости инструмента от операции к операции уменьшается. При этом зона первоначального контакта инструмента с заготовкой локализуется в месте смыкания цилиндрической и конической частей, и последующему интенсивному деформированию подлежат участки, которые ранее не деформировались или деформировались незначительно. На рис. 14 приведены результаты расчетов количества формообразующих операций и размеров промежуточных полуфабрикатов по традиционной и предлагаемой методикам.

Последующие операции второго цикла (с уменьшением угла конусности) предназначены для увеличения длины головной части сердечника и приближения его формы к заданной с ломаной образующей, которую в случае необходимости легко переобжать в требуемую оживальную без сообщения дополнительной повреждаемости материала в опасной микроне.

На основе предложенной методики и с помощью разработанной компьютерной программы спроектированы усовершенствованные технологические процессы изготовления конструктивных вариантов остроконечных сердечников, позволяющие улучшить механические свойства готового изделия при сокращении количества операций и уменьшении силы процесса.

Постоянный угол конусности инструмента



Переменный угол конусности инструмента

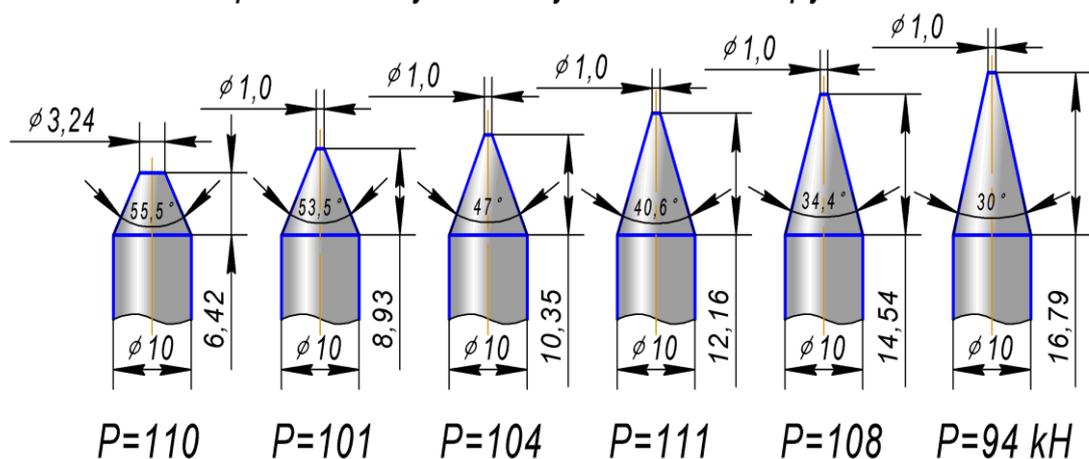


Рис. 14. Эскизы головных частей полуфабрикатов из стали У12А, рассчитанных по технологиям, предусматривающим штамповку в матрицах с постоянным (вверху) и уменьшающимся (внизу) углами конусности

В шестом разделе приведены результаты статистических исследований точности цилиндрических мерных заготовок и готовых сердечников, изготавливаемых традиционными способами, по длине и массе с расчетом выборочных экспериментальных и условных допусков, с последующим установлением показателей рассеивания и обобщенных показателей настроенности технологической системы (рис.15).

Последующее определение значительного уровня вероятности брака привело к необходимости решения вопроса о введении в технологический процесс изготовления сердечников операции калибровки заготовок по длине и массе и совмещении этой операции с первой формообразующей операцией. Это потребовало разработки матрицы специальной конструкции, которая в комплекте с пуансоном и выталкивателем позволила реализовать указанную начальную операцию.

Проблема состояла в том, что при выбранной общей схеме штамповки остроголовых сердечников разъемным инструментом (рис. 16) существенная

часть настройки штамповой оснастки сводится к определению рационального положения выталкивателя 4 относительно матрицы 2. Поскольку штамповка закрытая и излишкам металла некуда деваться, кроме потери устойчивости заготовки в зазоре между пуансоном 1 и матрицей 2, то при значимом разбросе массы сердечников могут наблюдаться трещинообразование и разрыв матриц.

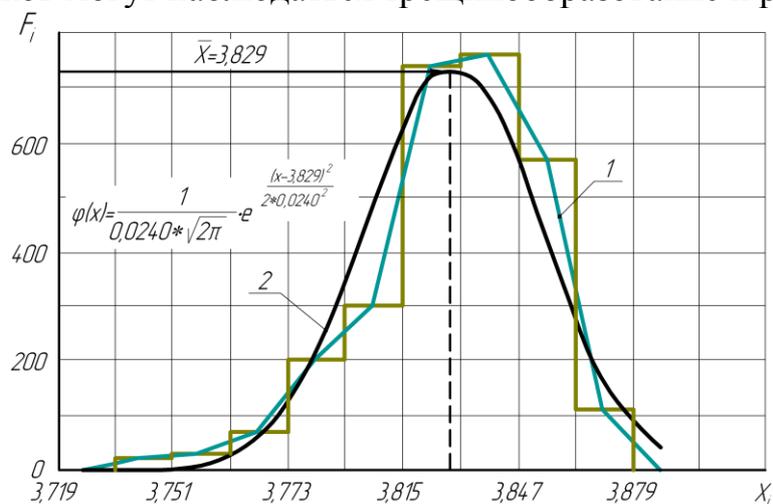


Рис. 15. Гистограмма, полигон распределения (1) и выровненная по закону Гаусса теоретическая кривая распределения (2) массы заготовок сердечников пуль, изготавливаемых на холодновысадочных автоматах типа АБ1218

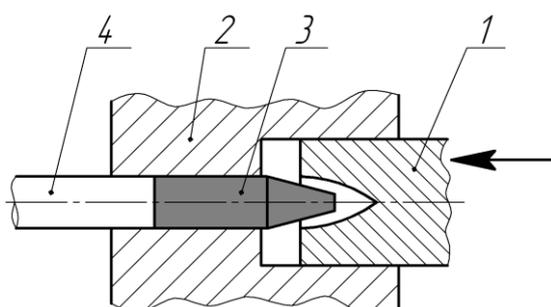


Рис. 16. Схема штамповки сердечников пуль разъемным инструментом: 1 – пуансон; 2 – матрица; 3 – заготовка (полуфабрикат); 4 – выталкиватель



Рис. 17. Заготовка (1), полуфабрикат (2) и вариант пули (3) с сердечником в сборе, изготовленные по существующей технологии

В связи с изложенным настройку выталкивателя относительно матрицы производили таким образом, чтобы создавалась некая компенсационная область для размещения излишков материала, а это приводило к некачественному изготовлению наиболее важной зоны сердечника, примыкающей к его вершинке (рис. 17).

На основе результатов проведенных исследований был разработан соответствующий комплект рабочего инструмента, включающий (рис. 18) матрицу специальной конструкции, имеющую радиальный паз.

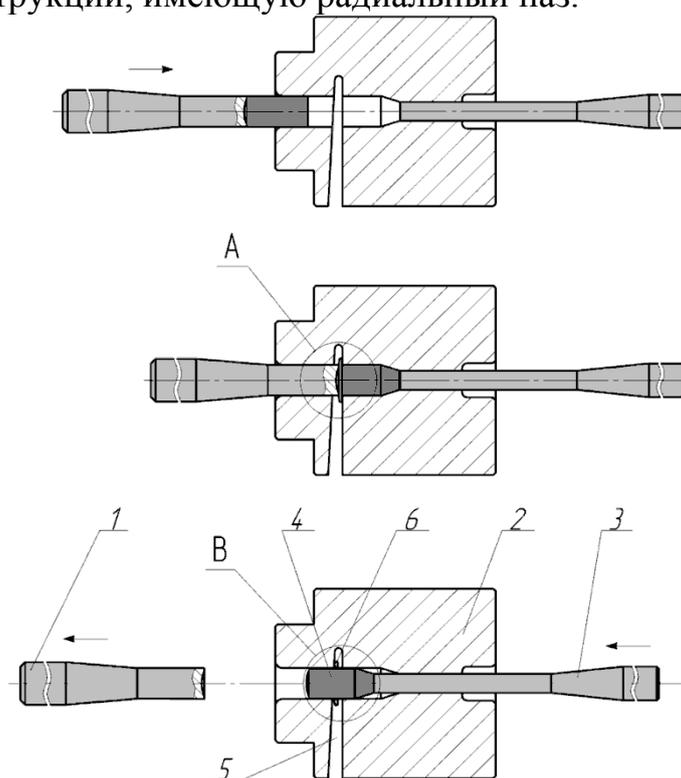


Рис. 18. Схема, иллюстрирующая работу инструмента при совмещении операции калибровки заготовок сердечников с операцией первой штамповки: 1 – пуансон; 2 – матрица; 3 – выталкиватель; 4 – штампуемый полуфабрикат; 5 – паз в матрице; 6 – удаляемый материал

При рабочем ходе пуансона 1 после досылания заготовки в матрицу лишней, выступающий из ее рабочей зоны, материал высаживается торцом пуансона с образованием кольцевого надреза в месте последующего удаления, и в период обратного хода пуансона в исходное положение перемещением выталкивателя сформированный излишек материала сердечника срезается и удаляется из зоны обработки при обратном ходе этого выталкивателя.

Особые технические проблемы возникают при штамповке сердечников, имеющих удлиненную головную часть (относительно диаметра цилиндрической части) и короткую цилиндрическую часть (относительно длины головной части). Для реализации технологического процесса изготовления таких сердечников также были разработаны специальная штамповая оснастка и инструмент (рис. 19), обеспечивающие гарантированную фиксацию полуфабриката после

штамповки в матрице и его последующее удаление без существенного усложнения конструкции штампующего устройства и ухудшения качества изготовления.

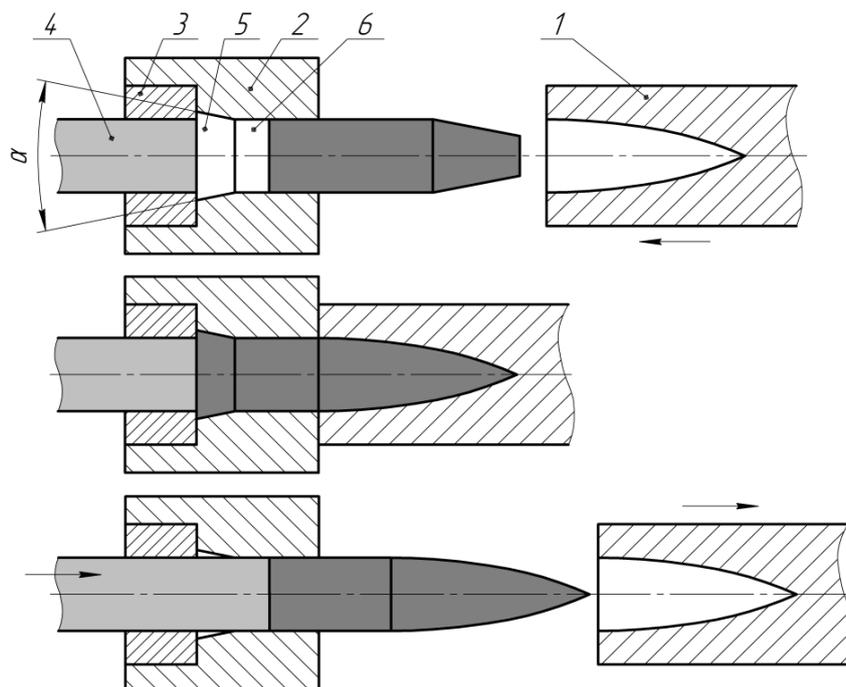


Рис. 19. Схема холодной штамповки сердечников пуль, имеющих укороченную цилиндрическую часть, в матрице специальной конструкции: 1 – пуансон с профильной рабочей полостью; 2 – матрица, имеющая два участка рабочей полости: конический 5 (с незначительно малым углом конусности) и цилиндрический 6; 3 – вставка, запрессованная в матрицу; 4 – выталкиватель

Направляющая втулка, запрессованная в матрицу, исключает возможность образования заусенца в торцевой части штампуемого сердечника. В процессе изготовления пуансон подаёт полуфабрикат сердечника в матрицу, затем происходит формообразование головной части полуфабриката сердечника с одновременной высадкой его заднего торца в конусную часть матрицы. После окончания штамповки полуфабрикат сердечника гарантированно остаётся в матрице за счёт высаженного участка, и последующим ходом выталкивателя полуфабрикат сердечника извлекается из специальной матрицы с одновременной калибровкой цилиндрическим участком матрицы предварительно высаженного участка. Вследствие малости угла конусности конического участка полуфабриката калибровка не требует большой технологической силы, однако такого угла и длины, равной $1/4$ длины головной части получаемого сердечника, достаточно, чтобы полуфабрикат сердечника гарантированно остался в матрице после штамповки.

Штамповка головных частей удлиненных (относительно диаметра цилиндрической части) сердечников пуль требует соответственно большого хода выталкивателя, а следовательно, и большой его длины для извлечения изготовленного полуфабриката из матрицы. Процесс извлечения сопровождается преодолением значительных сил трения на достаточно протяженном цилиндриче-

ском участке, что приводит к проблеме обеспечения стойкости указанных выталкивателей. При этом особую важность имеет качество соосности цилиндрической и головной частей штампуемых сердечников. Указанные проблемы в значительной степени снимаются разработанным специальным штампующим устройством, схема и этапы работы которого приведены на рис. 20: а - этап загрузки заготовки в устройство; б - завершающий этап штамповки; в - извлечение отштампованного полуфабриката выталкивателем.

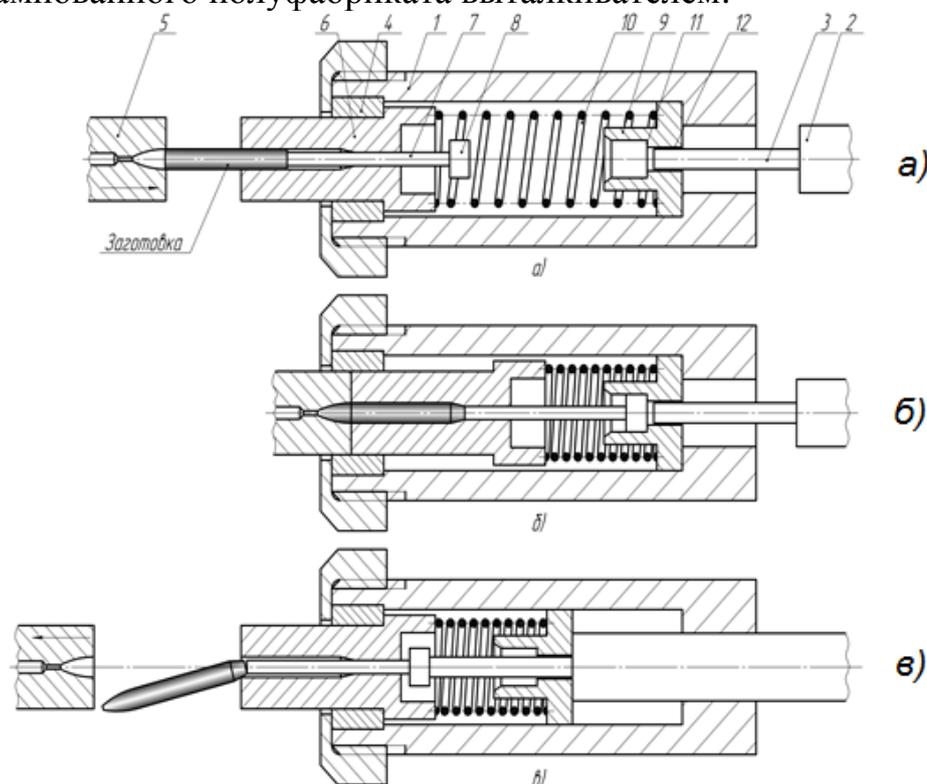


Рис. 20. Штамповая оснастка с выталкивателем повышенной стойкости и инструмент для штамповки удлинённых сердечников повышенного качества:

- 1 – корпус; 2 – кольцевое утолщение; 3 – толкатель; 4 – втулка; 5 – пуансон;
 6 – матрица; 7 – выталкиватель; 8 – упор; 9 – переходник-подпятник;
 10 – пружина; 11 – донная поверхность; 12 – отверстие

В заключении приводятся основные результаты и выводы по выполненной работе.

В приложении представлены листинг кода компьютерной программы CoreTech, содержащей разработанную методику расчета числа формообразующих операций и размеры промежуточных полуфабрикатов сердечников пуль повышенного качества и акты внедрения.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В работе решена актуальная научно-техническая проблема, заключающаяся в теоретическом и экспериментальном обосновании новых способов и технологических решений многооперационной холодной штамповки высокопроч-

ных остроконечных сердечников пуль, а также проектирование специальной штамповой оснастки для реализации указанных способов.

В результате комплекса проведенных исследований и новых конструкторско-технологических разработок получены следующие основные результаты и сделаны выводы.

1. Проведены патентные исследования конструкций современных и перспективных остроконечных высокопрочных сердечников пуль, в результате которых установлены три основные группы, отличающиеся особенностями и размерами конструктивных элементов и требующие индивидуального подхода к технологии изготовления. Анализ возможных способов изготовления указанных сердечников позволил обосновать в качестве наиболее перспективного способ холодной штамповки разъемным инструментом с извлечением полуфабриката или готового сердечника выталкивателем с упором в массивный задний торец.

2. Разработаны и запатентованы новые способы многооперационной холодной штамповки высокопрочных остроконечных сердечников пуль, которые применяются в зависимости от группы сердечников, на которые они классифицированы. Сущность предлагаемых способов изготовления сердечников заключается в том, что сначала на одной или нескольких первых формообразующих операциях инструментом с рабочей полостью, имеющей угол конусности, значительно превышающий заданный чертежом, получают (при повышенном гидростатическом давлении) укороченный участок головной части с окончательно требуемым диаметром вершинки. На последующих операциях участок головной части, примыкающий к вершинке, практически не деформируется, а формируется смежный участок, который ранее не подлежал формоизменению или деформировался с малыми степенями. При этом длина головной части сердечника увеличивается до требуемой, а хороший уровень механических характеристик материала на наиболее важном участке, примыкающем к вершинке, полученном ранее при повышенном гидростатическом давлении, сохраняется.

3. Развита аналитический метод линий скольжения, обеспечивающий возможность его применения для решения класса осесимметричных задач теории пластичности путем установления следующих составляющих:

3.1. Впервые получены интегральные соотношения для аналитического расчета среднего напряжения вдоль линий скольжения в осесимметричных задачах теории пластичности для двух основных режимов «А» и «В» «полной пластичности» и различного взаимного расположения начальной и конечной точек расчета в цилиндрической системе координат. В указанных интегральных соотношениях первые два алгебраических слагаемых правой части полностью аналогичны соотношениям Генки для условий плоской деформации и отражают изменение среднего напряжения σ вдоль линий скольжения только от соответствующего изменения характеристического угла φ . Третье слагаемое характеризует изменение среднего напряжения вдоль линий скольжения только от удаленности самих линий скольжения от оси симметрии r_0 и от разницы радиальных Δr и осевых Δz координат начальной и конечной расчетных точек на линии скольжения. Указанные режимы «А» и «В» позволяют аналитически решать значительный класс осесимметричных задач теории пластичности за ис-

ключением тех, в которых реализуются сложные винтовые кинематические перемещения материальных частиц в процессе деформирования материала.

3.2. Правильность работоспособности полученных формул проверена на аналитическом описании ряда классических конструкций полей линий скольжения и их отдельных пластических участков, где результаты уже были известны из ранее полученных численных решений. В частности, расчетами было подтверждено положение Р. Шилда о том, что при условиях осевой симметрии прямолинейный треугольный участок напряженного состояния, свойственный выходу пластической области на прямолинейную свободную границу в задачах плоской деформации, возможен лишь в одном случае, когда осесимметричная прямолинейная свободная граница ортогональна радиальной оси координат. Однако при этом данный участок уже не является участком равномерного состояния.

При этом аналитически выполнено решение осесимметричной задачи о начальном вдавливании плоского цилиндрического штампа в полость полупространства, которую А.Д. Томленов рассмотрел для условий плоской деформации, и определены особенности пластических участков, схематизируемых центрированным веером линий скольжения. В результате для осесимметричных условий деформирования установлено:

а) центрированный веер не является полем простого напряженного состояния, и изменения среднего напряжения в нем связаны не только с изменениями характеристического угла текущей расчетной точки, но и с изменением ее радиальной и осевой координат, и расчеты среднего напряжения в текущих точках такого следует производить только вдоль отрезков дуг окружностей, но не вдоль лучей веера;

б) в указанных вариантах конструкций полей полученные интегральные зависимости для расчета средних напряжений вдоль линий скольжения дают не равномерное распределение контактных сжимающих напряжений, как при решениях для условий плоской деформации, а логично увеличивающееся (по модулю) радиально от периферии к центру контактной поверхности штампа;

в) различия в расчетных значениях силовых параметров при решении аналогичных задач для условий плоской и осесимметричной деформации в зависимости от конструкции поля линий скольжения могут варьироваться от нескольких до 80 – 90 %.

4. Для осесимметричных задач теории пластичности впервые разработаны правила аналитического построения полей линий скольжения, схематизирующих пластические участки, примыкающие к свободным от контакта и внешним нагрузкам прямолинейным пластическим границам. При этом граничные линии скольжения схематизированы логарифмическими спиралями и установлены аналитические зависимости предельного изменения углового параметра (характеристического угла) вдоль них, существенно зависящего от удаления указанного пластического участка от оси симметрии схемы исследуемого процесса. Разработанные правила апробированы и проверены на аналитическом решении осесимметричной задачи А.Ю. Ишлинского – Р. Шилда о начальном вдавливании гладкого плоского цилиндрического штампа в полупространство, рассмотренной ими ранее численно. Расхождение по суммарной длине кон-

тактной и свободной пластических границ составило 6,8 %, а расхождение по уровню среднего относительного контактного давления – 1,73 %.

5. С использованием разработанного математического аппарата впервые решена осесимметричная задача о течении жесткопластического слоя в коническом гладком канале, позволившая провести силовой анализ типовых операций пластического формообразования остроконечных сердечников пуль, который показал увеличение потребной технологической силы по сравнению с известными аналогичными решениями на основе теории плоской деформации до 65 %. При этом получены распределения в пластической области среднего напряжения для различных степеней обжатия и углов конусности сердечников, используемые в последующих экспериментальных исследованиях и расчетах для установления показателя напряженного состояния и степени использования запаса пластичности материала.

6. По результатам комплекса экспериментальных исследований, проведенных методом делительных сеток, выявлены особенности кинематики течения деформируемого материала в коническом канале при штамповке сердечников пуль, способствующие созданию новых рациональных способов штамповки указанных изделий. При этом установлено, что микрообласти с наибольшим исчерпанием запаса пластичности расположены на оси симметрии, на определенном удалении от вершинки, существенно зависящем от угла конусности головной части сердечника.

7. На основе комплекса проведенных исследований разработана методика расчета числа формообразующих операций, размеров заготовки и промежуточных полуфабрикатов с учетом повреждаемости деформируемого материала, положенная в основу компьютерной программы «CoreTech» с дополнительным модулем «Arrow». Она позволяет проектировать рациональные технологии (с уменьшенным количеством формообразующих и сопутствующих операций до 22 %) многооперационной штамповки конструктивных вариантов компактных и удлиненных поражающих элементов повышенного качества (14–27 %) и улучшенного функционирования (17–21 %) к стрелковым боеприпасам.

8. Проведены статистические исследования качества по длине и массе заготовок и отштампованных сердечников с прогнозированием уровня вероятности брака. Обоснована необходимость введения в технологический процесс предварительной калибровки заготовок по длине и массе, совмещенной с первой формообразующей операцией.

9. Спроектирована и запатентована специальная штамповая оснастка, позволяющая реализовать многооперационное холодное пластическое формообразование по разработанным способам изготовления различных конструктивных вариантов высокопрочных остроголовых сердечников пуль.

10. Практические результаты данной диссертационной работы внедрены на АО «Тульский патронный завод» и АО «КБП им. академика А.Г. Шипунова». Отдельные результаты диссертационной работы используются в преподавании ряда учебных дисциплин при подготовке магистров направлений 15.04.01 - «Машиностроение» и 15.04.02 – «Технологические машины и оборудование» на кафедре «Механика пластического формоизменения» Тульского государственного университета.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В ПУБЛИКАЦИЯХ

Издания, входящие в «Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёных степеней доктора и кандидата наук»

1. Недошивин С.В., Шибаетов М.Л. Разработка методики проектирования технологических процессов многооперационной холодной штамповки сердечников пуль // Известия ТулГУ. Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением. Тула: Изд-во ТулГУ, 2006. Вып.1. С. 229-237.

2. Панфилов Г.В., Недошивин С.В., Шибаетов М.Л. Стабилизация массы и длины заготовок при штамповке сердечников пуль // Известия ТулГУ. Проблемы специального машиностроения. Тула: Изд-во ТулГУ, 2006. Вып. 9: в 2 ч. Ч. 2. С. 140-144.

3. Панфилов Г.В., Недошивин С.В., Шибаетов М.Л. Статистические исследования точности заготовок сердечников пуль // Известия ТулГУ. Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением. Тула: Изд-во ТулГУ, 2006. Вып.2. С. 188-198.

4. Панфилов Г.В., Хвостов Е.Ю., Недошивин С.В. Совершенствование способов холодного пластического формообразования сердечников пуль // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2009. Вып. 3. С. 218–222.

5. Панфилов Г.В., Недошивин С.В., Хвостов Е.Ю. Совершенствование технологии многооперационной холодной штамповки остrokонечных цилиндрических деталей из малопластичных сталей // Журнал «Заготовительные производства в машиностроении. Кузнечно-штамповочное, литейное и другие производства». 2011. №2. С. 15–20.

6. Панфилов Г.В., Недошивин С.В., Хвостов Е.Ю. Особенности многооперационной холодной штамповки остrokонечных стержневых соединительных элементов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением: ежемесячный научно-технический и производственный журнал. М.: Машиностроение, 2011. № 11. С. 29-37.

7. Панфилов Г.В., Недошивин С.В., Судаков П.В. Разложение специальных цилиндрических функций по степеням переменных аргументов при интегральном преобразовании Лапласа-Карсона // Известия ТулГУ. Естественные науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. Вып. 1. С. 130–140.

8. Панфилов Г.В., Недошивин С.В., Перминов Д.А. Анализ процессов холодной штамповки конических головных частей сердечников пуль аналитическим методом линий скольжения // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. Вып. 5. С. 77–86.

9. Недошивин С.В. Линейный множественный регрессионный анализ в статистическом машинном эксперименте // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. Вып. 7. С. 38-52.

10. Панфилов Г.В., Недошивин С.В. Построение методом линий скольжения полей, примыкающих к прямолинейным свободным границам, в задачах осевой симметрии // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. Вып. 10. С. 107-117.

11. Недошивин С.В. Нелинейный множественный регрессионный анализ в статистическом машинном эксперименте // Известия ТулГУ. Технические науки. Ч. 1. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. Вып. 10. С. 68-81.

12. Панфилов Г.В., Недошивин С.В., Перминов Д.А. Аналитическое решение методом линий скольжения задачи о вдавливании цилиндрического штампа в условиях осевой симметрии // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. Вып. 10. С. 150-163.

13. Панфилов Г.В., Недошивин С.В., Гаврилин И.А. Аналитический расчет напряжений в полях линий скольжения, моделирующих процессы осесимметричного деформирования // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. Вып. 11: в 2 ч. Ч. 2. С. 80–86.

14. Панфилов Г.В., Недошивин С.В., Хвостов Е.Ю. Технологические возможности холодного пластического формообразования высокопрочных дубелей // Заготовительные производства в машиностроении. Кузнечно-штамповочное, литейное и другие производства: научно-технический журнал. М.: Машиностроение, 2014. № 12. С. 14–24.

15. Панфилов Г.В., Недошивин С.В. Развитие аналитического метода линий скольжения применительно к задачам плоского пластического течения // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением: ежемесячный научно-технический и производственный журнал. М.: Изд-во «Машиностроение», 2014. № 11. С. 18–27.

16. Недошивин С.В., Панфилов Г.В., Гаврилин И.А. Экспериментальное моделирование методом делительных сеток штамповки остроконечных головных частей сердечников пуль // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 7: в 2 ч. Ч. 1. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. С. 156-163.

17. Недошивин С.В. Комплексный машинный эксперимент по исследованию технологических процессов, представленных детерминированной моделью // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. Вып. 8: в 2 ч. Ч. 1. С. 89-99.

18. Недошивин С.В. Аналитическое описание методом линий скольжения пластического течения в коническом канале при изготовлении сердечников пуль // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. Вып. 8: в 2 ч. Ч. 1. С. 8-16.

19. Недошивин С.В. Активное модельное экспериментальное исследование штамповки остrokонечных участков на стержневых заготовках // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением: ежемесячный научно-технический и производственный журнал. М.: Изд-во «Машиностроение», 2015. № 10. С. 41-48.

20. Панфилов Г.В., Недошивин С.В., Гаврилин И.А. Расчет напряжений в осесимметричных полях линий скольжения на примере задачи о вдавливании цилиндрического штампа в полость // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. Вып. 6: в 2 ч. Ч. 1. С. 304–318.

21. Панфилов Г.В., Недошивин С.В., Сухонин В.А. Результирующий силовой анализ при вдавливании осесимметричного штампа в полость полупространства // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. Вып. 6: в 2 ч. Ч. 1. С. 337-342.

22. Панфилов Г.В., Недошивин С.В., Сухонин В.А. Анализ напряженного состояния в процессах осесимметричного пластического течения // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. Вып. 7: в 2 ч. Ч. 1. С. 103-111.

23. Панфилов Г.В., Недошивин С.В., Сухонин В.А. Анализ осесимметричного пластического течения в процессах обработки металлов давлением // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением: ежемесячный научно-технический и производственный журнал. М.: Машиностроение, 2016. № 10. С. 28-35.

24. Панфилов Г.В., Недошивин С.В., Перминов Д.А. Первые этапы проектирования многооперационной технологии холодной штамповки сердечников пуль // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. Вып. 1: в 2 ч. Ч. 1. С. 35-48.

25. Панфилов Г.В., Недошивин С.В., Калинин С.С. Заключительные этапы проектирования технологии штамповки остrokонечных конических участков на цилиндрических заготовках // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. Вып. 1: в 2 ч. Ч. 1. С. 48-60.

26. Ларин С.Н., Пасынков А.А., Недошивин С.В., Исаева А.Н. Оценка напряженно-деформированного состояния изделия при комбинированном выдавливании прутковой заготовки // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2020. Вып. 3. С. 454-460.

27. Пасынков А.А., Недошивин С.В., Абрамов С.С. Анализ напряженного состояния при изотермическом обратном выдавливании прутковых заготовок // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2020. Вып. 3. С. 473-480.

28. Пасынков А.А., Недошивин С.В., Пасынкова Н.С. Изотермическое обратное выдавливание трубных заготовок с истечением металла по внутрен-

нему контуру пуансона // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2020. Вып. 7. С. 26-31.

Патенты

1. Способ штамповки остроконечных головных частей стальных сердечников пуль: пат. 2376099 РФ. Опубл. 20.12.2009. Бюл. № 35.
2. Способ изготовления остроконечной головной части стальных сердечников пуль: пат. 2422302 РФ. Опубл. 10.06.2011. Бюл. № 19.
3. Пуля для патронов стрелкового оружия: пат. 96944 РФ. Опубл. 20.08.2010. Бюл. № 23.
4. Дюбель: пат. 2448826 РФ. Опубл. 27.04.2012. Бюл. № 12.

Другие публикации

1. Недошивин С.В., Панфилов Р.Г., Хвостов Е.Ю. Совершенствование способов холодного пластического формообразования сердечников пуль // Международная конференция «Прогрессивные методы и технологическое оснащение процессов обработки металлов давлением». Санкт-Петербург : Изд-во Балт. гос. техн. ун-та, 2009. С. 104–108.
2. Панфилов Г.В., Недошивин С.В., Хвостов Е.Ю. Обеспечение качества остроконечных сердечников пуль с короткими головными частями в процессе формообразования // Вестник ТулГУ «Автоматизация: проблемы, идеи, решения (АПИР-14)»: в 2 ч. Ч. 2. Тула: Изд-во ТулГУ, 2009. С. 217-222.

Подписано в печать 04.08.2020.

Формат бумаги 70x100 $\frac{1}{16}$. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 2,9.

Тираж 100 экз. Заказ

Тулский государственный университет.
300012, г. Тула, просп. Ленина, 92.

Отпечатано в Издательстве ТулГУ.
300012, г. Тула, просп. Ленина, 97, а.