

На правах рукописи



КАЛИНИН СЕРГЕЙ СЕРГЕЕВИЧ

**РАДИАЛЬНАЯ ШТАМПОВКА СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ
СТАБИЛИЗАТОРОВ СТРЕЛОВИДНЫХ ПУЛЬ
К ОХОТНИЧЬИМ БОЕПРИПАСАМ**

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

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тула 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении высшего образования (ФГБОУ ВО) «Тульский государственный университет».

Научный руководитель	доктор технических наук, профессор Панфилов Геннадий Васильевич
Официальные оппоненты	Лавриненко Владислав Юрьевич, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана», профессор кафедры «Технологии обработки металлов». Митин Олег Николаевич, кандидат технических наук, АО «НПО «СПЛАВ» (г. Тула). начальник службы инновационного разви- тия.
Ведущая организация	ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева».

Защита диссертации состоится «14» февраля 2017 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.271.01 при ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» (300012, г. Тула, пр. Ленина, 92, 9-101).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» по адресу <http://tsu.tula.ru/science/dissertation/diss-212-271-01/kalinin-ss/>.

Автореферат разослан «14» декабря 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Черняев Алексей Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время среди основных путей повышения эффективности производства особое внимание уделяется снижению трудоемкости изготовления продукции, внедрению малоотходной и безотходной технологии изготовления изделий. В значительной мере это относится к типовой группе стержневых цилиндрических деталей, имеющих участки крестообразного профиля. К ним могут относиться валы с шлицевыми торцевыми участками, передающими силовое вращательное движение, крестообразные отвертки повышенного качества, оперенные стреловидные пули и пр.

В данный момент в развитых странах наблюдается тенденция к приближению эффективности стрельбы пулевым патроном из гладкоствольных ружей на относительно дальних дистанциях к возможностям аналогичного выстрела из нарезного охотничьего оружия. Эта задача во многом может быть решена за счет использования стреловидных оперенных пуль. Применение оперенных пуль в гладкоствольных охотничьих ружьях позволяет увеличить начальную скорость пули в 1,5 – 2 раза по сравнению со скоростью обычных пуль за счет подкалиберного принципа конструирования патронов, повысить убойное действие на дальних расстояниях за счет большей поперечной нагрузки пули, улучшить кучность боя и настильность траектории. Все перечисленные баллистические и эксплуатационные характеристики такого пулевого патрона позволяют надежно поражать зверя на дистанциях до 300 м включительно.

Наиболее важным для функционирования и сложным для изготовления в условиях массового производства является стабилизатор стреловидной пули.

В связи с изложенным, теоретическое и экспериментальное обоснование усовершенствованных способов штамповки стабилизаторов стреловидных пуль к охотничьим боеприпасам, эффективных для условий массового изготовления и повышающих качество производимой продукции является актуальной научной задачей.

Цель работы. Разработка новых технологических схем холодной штамповки стабилизаторов стреловидных пуль к охотничьим патронам путем разработки новых способов их изготовления и проектирования специальной штамповой оснастки, теоретического и экспериментального обоснования технологических режимов.

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

1. Решить аналитическим методом линий скольжения классические силовые задачи о течении жесткопластического слоя в клиновом канале, имеющем криволинейные участки профиля образующей этого канала, для условий плоской деформации.

2. С использованием результатов решения указанных задач, провести силовой анализ операций штамповки лопастей стабилизаторов стреловидных пуль, имеющих криволинейный участок лопастей, с одновременной отрубкой облоя по внешнему контуру, инструментом с различной конфигурацией клиновых выступов.

3. Экспериментальным методом делительных сеток изучить распределение деформаций в пластической области при течении деформируемого материала в криволинейном сужающемся канале и определить координату опасной точки, в которой наблюдается наибольшее исчерпание запаса пластичности,

4. Разработать бойки специальной конструкции, имеющие профильные клиновые выступы, позволяющие совместить заключительную формообразующую операцию штамповки лопастей стабилизаторов и их обрубкой по внешнему контуру, и провести многофакторные экспериментальные исследования по установлению рациональных геометрических размеров профильных клиновых выступов на бойках, уменьшающих дефекты, возникающие при обрубке лопастей стабилизаторов стреловидных пуль из различных марок сталей.

5. Разработать радиально штампуемое устройство с поступательным движением рабочих бойков, обеспечивающее холодное пластическое формообразование стабилизаторов с плоским задним торцом, исключаящее весьма нетехнологичную завершающую механическую обработку лопастей и позволяющее расширить возможности холодного пластического формообразования участков крестообразного профиля на стержневых цилиндрических заготовках.

6. Разработать практические рекомендации к проектированию технологического процесса изготовления стабилизатора стреловидных пуль, а также штамповой оснастки и инструмента. Использовать результаты исследования в учебном и промышленном процессе на предприятии ОАО «ЦНИИТОЧМАШ» (г. Климовск Московской обл.).

Объект исследования. Новая технологическая схема радиального холодного пластического формообразования участков крестообразного профиля на цилиндрических стержневых заготовках.

Предмет исследования. Теоретические и экспериментальные модели влияния различных факторов на результирующие параметры технологического процесса радиального холодного пластического формообразования сложно-профильных стабилизаторов стреловидных пуль к охотничьим боеприпасам.

Методы исследования. В теоретических исследованиях использован аналитический метод линий скольжения с применением интегрального преобразования Лапласа-Карсона (операционного исчисления), позволяющий получить компактные результирующие зависимости для расчета геометрических и силовых параметров процесса холодной радиальной штамповки лопастей стабилизаторов стреловидных пуль в условиях плоского деформированного состояния.

Установление деформированного состояния, степени использования запаса пластичности и координат точек, где он использовался в наибольшей степени, в пластических областях проводился при помощи экспериментального метода делительных сеток.

Для установления рациональных геометрических размеров, формы клиновых выступов на рабочем инструменте для радиальной штамповки лопастей стабилизаторов с одновременной отрубкой облоя, использованы элементы теории моделирования и основные положения планируемого многофакторного натурного эксперимента.

Теоретическим методом была определена лишь сила, воспринимаемая одним бойком. Для установления общей потребной силы, прикладываемой со стороны прессового оборудования, было проведено экспериментальное исследование крешерным методом, позволившее определить коэффициент передачи силы на бойки штампуемого устройства.

Положения, выносимые на защиту:

- Основные результирующие зависимости анализа аналитическим методом линий скольжения геометрических соотношений, распределения напряжений и необходимых технологических сил при течении жесткопластического слоя в клиновом сужающемся канале, имеющем участки криволинейного профиля.

- Особенности распределения напряжений, деформаций и степени использования запаса пластичности при штамповке сложнопрофильных лопастей стабилизаторов стреловидных пуль с одновременной отрубкой облоя по внешнему контуру.

- Экспериментальные результаты анализа деформированного состояния материала в пластической области при течении жесткопластического слоя в клиновом сужающемся канале, имеющем участки криволинейного профиля, включающие оценку степени использования запаса пластичности и установление опасной точки, в которой она достигает наибольшего значения, полученные методом делительных сеток.

- Статистически обоснованные проведением многофакторного эксперимента регрессионные модели, позволяющие количественно оценить и уменьшить дефекты, возникающие при обрубке лопастей стабилизаторов стреловидных пуль из различных марок сталей по внешнему контуру, а также установленные рациональные геометрические размеры профильных клиновых выступов на бойках.

- Разработанные практические рекомендации к проектированию технологического процесса изготовления стабилизатора стреловидных пуль, а также штамповую оснастку и инструмент.

Научная новизна. Установлены закономерности распределения напряжений и деформаций в пластической области при штамповке стабилизаторов стреловидных пуль с одновременной отрубкой облоя криволинейными клиновыми выступами на инструменте, заключающиеся в повышении гидростатического сжимающего давления в пластической области, обеспечивающего заживление микродефектов, увеличение предельных однооперационных степеней деформации и улучшение механических характеристик деформируемого материала.

Практическая значимость. Аналитическим методом линий скольжения получены компактные геометрические и силовые результирующие зависимости для процесса течения жесткопластического слоя в клиновом канале, имеющем криволинейные участки, позволяющие решать ряд типовых технологических задач обработки металлов давлением.

На основе результатов экспериментального метода делительных сеток разработан алгоритм определения координат микрозоны, в которой запас пла-

стичности исчерпывается в наибольшей степени, и его величины при течении материала в криволинейном клиновом канале, что позволяет устанавливать обоснованное количество формообразующих операций с рациональным распределением пооперационных степеней деформации.

Усовершенствован способ штамповки стабилизаторов стреловидных пуль, исключаяющей нетехнологичную операцию обрезки лопастей по внешнему контуру.

Многофакторным экспериментальным исследованием установлены статистически обоснованные регрессионные модели, позволяющие определять рациональные геометрические размеры клиновых выступов на бойках и уменьшать дефекты, возникающие при штамповке лопастей стабилизаторов стреловидных пуль с отрубкой облоя из различных материалов.

Спроектировано радиально-штампующее устройство с поступательным движением рабочего инструмента, обеспечивающее формообразование плоского заднего торца изготавливаемого стабилизатора.

Реализация работы. На основе результатов комплекса проведенных исследований, конструкторско-технологических разработок и полученных практических рекомендаций усовершенствованы технологические процессы изготовления ряда конструктивных вариантов стреловидных пуль к охотничьим боеприпасам. Результаты исследований использованы на предприятии ОАО «ЦНИИТОЧМАШ» (г. Климовск Московской обл.) и в учебном процессе при подготовке магистров по направлениям: 15.04.01 «Машиностроение» и 15.04.02 «Технологические машины и оборудование».

Апробация работы.

Результаты исследований доложены на: Всероссийской научно-технологической конференции студентов и аспирантов «Современные технологии обработки металлов и средств их автоматизации» (Тула: ТулГУ, 2011-2015 гг. с дипломами 2 и 3 степени); Международной научно-технической конференции «Автоматизация: проблемы, идеи, решения» (Тула: ТулГУ, 2012); VII региональная молодежная научно-практическая конференция Тульского государственного университета «Молодежные инновации» (Тула: ТулГУ, 2013); X Региональная магистерская научная конференция (Тула: ТулГУ 2015); ежегодных магистерских конференциях ТулГУ и НТК профессорско-преподавательского состава каф. МПФ; на основе конкурсного отбора, соискатель стал победителем в конкурсе «Участник молодежного научно-инновационного конкурса («УМНИК» 2011 г.).

Публикации. Материалы проведенных исследований отражены в 4 статьях в изданиях, рекомендуемых ВАК для опубликования материалов диссертационных работ, 11 статьях и тезисах докладов на научно-технических конференциях различного уровня.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения и пяти разделов, заключения, списка использованных источников из 66 наименований. Работа изложена на 192 страницах, содержит 86 рисунков и 18 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность рассматриваемой задачи, приведено краткое содержание разделов диссертационной работы и сформулирована цель работы.

В первом разделе проведен обзор существующих конструкций и особенностей функционирования охотничьих патронов со стреловидными пулями. При этом отмечено, что использование новых технологических схем патронов позволит уменьшить себестоимость производимой продукции.

Проведены патентные исследования радиально-штампующих устройств [6], с помощью которых изготавливают близкие по форме изделия. Наиболее эффективным представляется радиально-штампующее устройство с поворотным движением бойков, разработанное для пластического формообразования стабилизаторов стреловидных пуль из высокопрочных сталей и сплавов. Однако, его существенным недостатком является отсутствие возможности изготовления плоского заднего торца стабилизатора, что требует проведения нетехнологичной операции его подрезки.

Установлена целесообразность применения метода линий скольжения для оценки напряженного состояния в пластической области и проведения силового анализа технологического процесса радиального холодного пластического формообразования стабилизаторов стреловидных пуль.

Также рассмотрены подходы к проведению экспериментальных исследований по определению деформированного состояния с последующим установлением степени использования запаса пластичности в различных точках пластической области и к известным технологиям изготовления стабилизаторов стреловидных пуль.

На основании проведенного обзора и изложенного выше сформулированы задачи исследования.

Во втором разделе с использованием аналитического метода линий скольжения и интегрального преобразования Лапласа – Карсона проведен анализ напряженного состояния в пластической области при течении деформируемого материала в криволинейном клиновом канале и силовой анализ двух вариантов операции штамповки лопастей стабилизатора с одновременной отрубкой облоя [7] инструментом с прямоугольной (рис. 1 точка F) и криволинейной вершиной (приведено в диссертационной работе).

Интегрируя по угловым параметрам радиусы кривизны соответствующих граничных линий скольжения, получим геометрические размеры, необходимые для реализации процесса радиальной штамповки лопастей с одновременной отрубкой облоя или для конструкции поля линий скольжения, представленного на рисунке 1:

- длину контактной границы инструмента со штампуемой лопастью на наклонном (коническом) участке

$$l_{AC} = \frac{t_C}{\omega \cdot \exp \omega} - \frac{t_0}{\sin \omega},$$

где t_0 - половина наименьшей толщины отделяемого облоя;

t_C - половине толщины штампуемого клина.

- горизонтальную проекцию длины наклонного участка контактной границы

$$h_{AC} = \left(\frac{t_C}{\omega \cdot \exp \omega} - \frac{t_0}{\sin \omega} \right) \cos \omega,$$

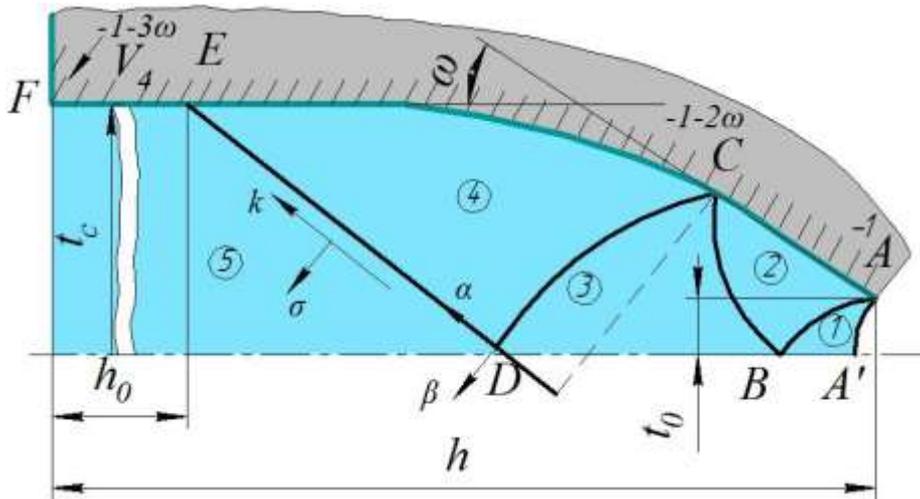


Рис. 1. Поле линий скольжения, соответствующее штамповке лопастей стабилизаторов стреловидных пуль с отрубкой облоя по внешнему контуру инструментом с прямоугольной вершиной.

- радиус кривизны криволинейного участка контактной поверхности

$$R_{CE}(\eta) = 2 \frac{t_0}{\omega \cdot \exp \omega} (1 + \eta) \exp \eta,$$

где η - угловой параметр, отсчитываемый от точки C вдоль CE ;

- горизонтальную проекцию переходного криволинейного участка контактной границы

$$h_{CE} = \frac{t_C}{\omega} \left(1 + \omega - \frac{\cos \omega}{\exp \omega} \right);$$

- общую высоту штампуемой лопасти

$$h = h_0 + h_{AC} + h_{CE} = h_0 + \frac{t_0}{\omega} \left(1 + \omega - \frac{t_0}{t_C} \omega \cdot \operatorname{ctg} \omega \right),$$

где h_0 - высота участка лопасти постоянной толщины.

Получено соотношение для определения параметра в виде безразмерной технологической силы, воспринимаемой одной гранью бойка и приходящейся на единицу длины лопасти (на единицу размера в направлении, перпендикулярном плоскости рисунка 1)

$$\bar{P}_{II} = \frac{P_{II}}{2k \cdot t_C} = \left(\frac{h}{t_C} + 1 \right) \cdot (\omega + 1) + \ln \frac{t_C \cdot \sin \omega}{t_C \cdot \omega \cdot \exp \omega} \left(\frac{h}{t_C} + 1 + \frac{1}{\omega} \right) + 1.$$

В третьем разделе экспериментальным методом делительных сеток изучено распределение деформаций в пластической области при течении деформируемого материала в криволинейном сужающемся клиновом канале. Относи-

тельные координаты опасной точки, в которой максимально исчерпывается запас пластичности в зависимости от степени обжатия для различных радиусов образующей профиля представлены на рисунке 2 (H_0 - расстояние от кромки лопасти до опасной точки, в которой запас пластичности исчерпывается в наибольшей степени). Значения накопленной степени деформации сдвига от тех же параметров показаны на рисунке 3.

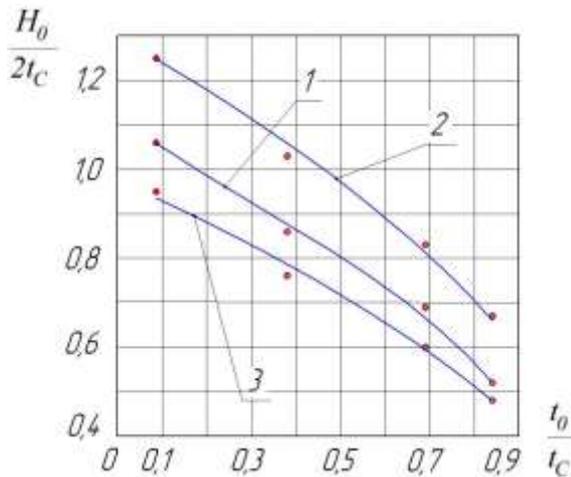


Рис. 2. Зависимости координаты опасной точки от относительной толщины кромки пластины-образца для различных значений относительного радиуса образующей профиля матрицы.
 1 - $\bar{R}_1 = 3,33$; 2 - $\bar{R}_1 = 13,33$;
 3 - $\bar{R}_1 = 1,55$

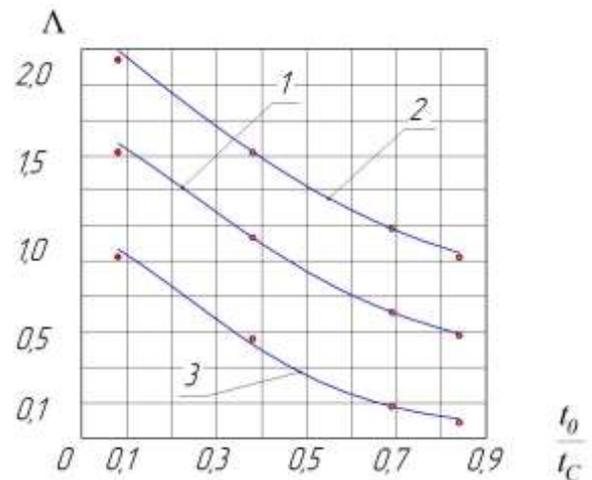


Рис. 3. Зависимости накопленной степени деформации сдвига в опасной точке от относительной толщины кромки для различных значений относительного радиуса образующей профиля.
 1 - $\bar{R}_1 = 3,33$; 2 - $\bar{R}_1 = 13,33$;
 3 - $\bar{R}_1 = 1,55$

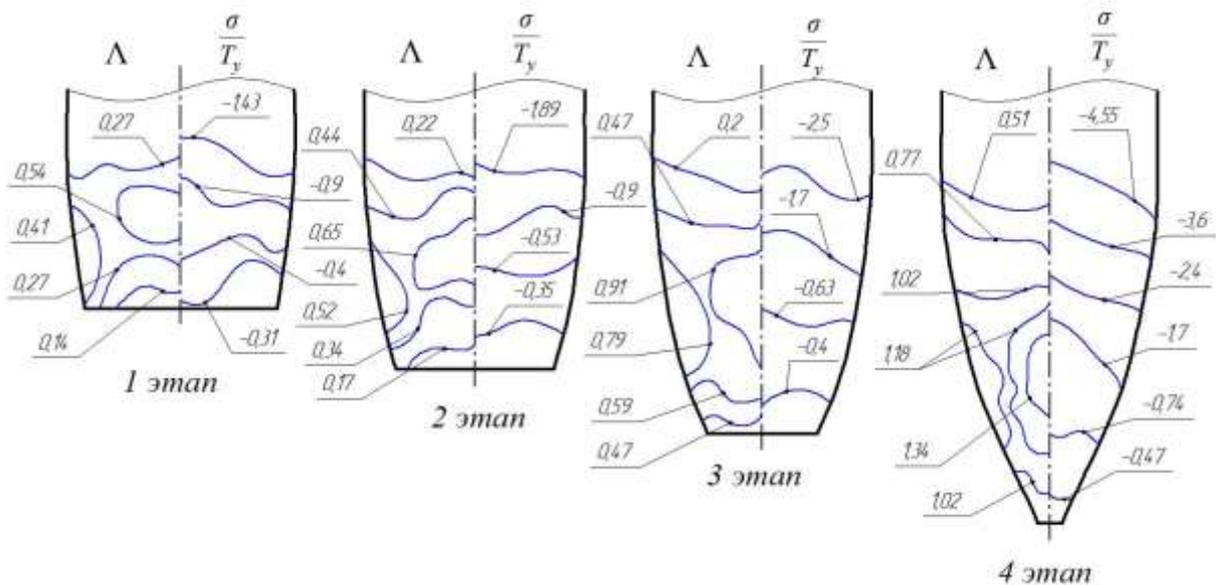


Рис. 4. Изолинии распределения Λ и σ/T_y на 4-х этапах формообразования криволинейного профиля инструментом с относительным радиусом образующей $\bar{R}_1 = R_1/2t_C = 3,33$.
 R_1 - радиус криволинейного участка лопасти.

Изолинии накопленной степени деформации сдвига (рис. 4, левая половина) и показателя напряженного состояния (рис. 4, правая половина) (T_y - интенсивность касательных напряжений с учетом упрочнения), для различных степеней обжатия, полученные при проведении поэтапных экспериментальных исследованиях, позволили утверждать, что деформация является простой и можно использовать метод конечных деформаций. На рисунке 5 представлен алгоритм расчета степени использования запаса пластичности, с возможностью определения рационального количества формообразующих операций.

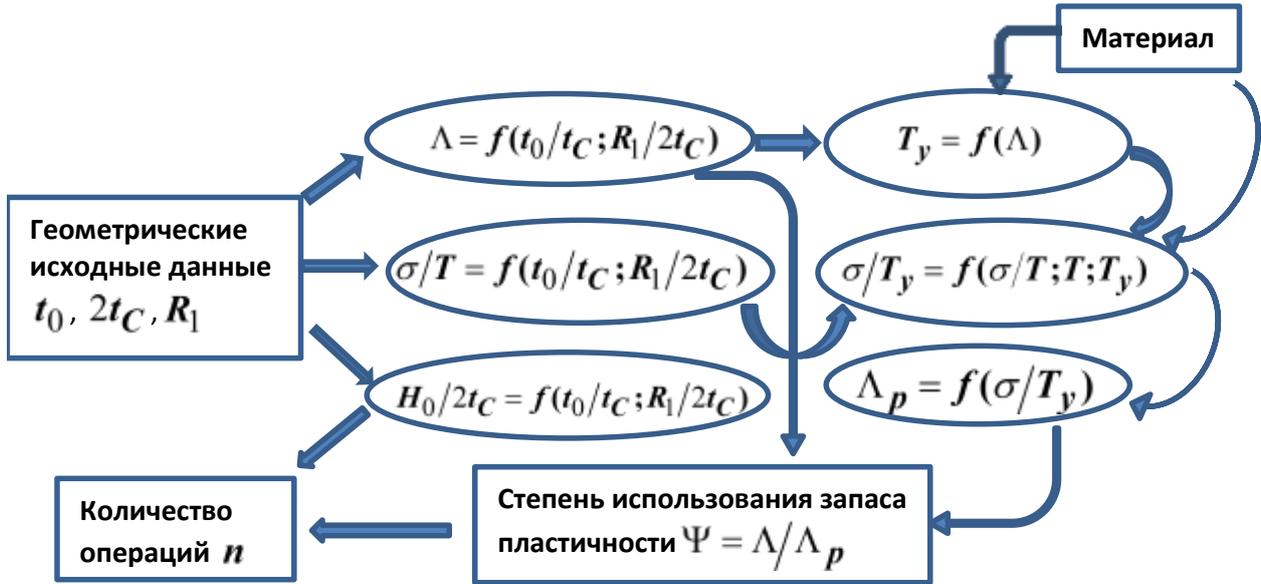


Рис. 5. Алгоритм расчета степени использования запаса пластичности.

Методика определения степени использования запаса пластичности включает расчет следующих параметров (a_i , b_i , c_i - коэффициенты).

1. Определение относительного расстояния от кромки штампуемой лопасти до опасной точки, находящейся на оси симметрии профиля

$$\frac{H_0}{2t_C} = \frac{\left[a_1 - a_2 \cdot \frac{R_1}{2t_C} - a_3 \cdot \ln \frac{t_0}{t_C} + a_4 \cdot \left(\frac{R_1}{2t_C} \right)^2 + a_5 \cdot \left(\ln \frac{t_0}{t_C} \right)^2 - a_6 \cdot \frac{R_1}{2t_C} \cdot \ln \frac{t_0}{t_C} \right]}{\left[a_7 - a_8 \cdot \frac{R_1}{2t_C} + a_9 \cdot \ln \frac{t_0}{t_C} + a_{10} \cdot \left(\frac{R_1}{2t_C} \right)^2 + a_{11} \cdot \left(\ln \frac{t_0}{t_C} \right)^2 - a_{11} \cdot \frac{R_1}{2t_C} \cdot \ln \frac{t_0}{t_C} \right]}.$$

2. Определение значения накопленной степени деформации сдвига в опасной точке

$$\Lambda = \frac{\left[-b_1 - b_2 \cdot \ln \frac{t_0}{t_C} + b_3 \left(\ln \frac{t_0}{t_C} \right)^2 + b_4 \left(\ln \frac{t_0}{t_C} \right)^3 + b_5 \cdot \frac{R_1}{2t_C} - b_6 \cdot \left(\frac{R_1}{2t_C} \right)^2 \right]}{\left[b_7 - b_8 \cdot \ln \frac{t_0}{t_C} - b_9 \left(\ln \frac{t_0}{t_C} \right)^2 - b_{10} \cdot \frac{R_1}{2t_C} \right]}.$$

3. Определение в опасной точке показателя напряженного состояния

$$\frac{\sigma}{T} = \frac{\left(-c_1 - c_2 \cdot \left(\frac{R_1}{2t_c} \right) + c_3 \cdot \left(\frac{R_1}{2t_c} \right)^2 - c_4 \cdot \left(\frac{R_1}{2t_c} \right)^3 + c_5 \cdot \ln \left(\frac{t_0}{t_c} \right) \right)}{\left(c_6 + c_7 \cdot \left(\frac{R_1}{2t_c} \right) - c_8 \cdot \left(\frac{R_1}{2t_c} \right)^2 + c_9 \cdot \ln \left(\frac{t_0}{2t_c} \right) + c_{10} \cdot \ln \left(\frac{t_0}{t_c} \right)^2 \right)}.$$

4. Аппроксимация диаграмм предельной пластичности (на примере стали У12А)

$$\Lambda_p = 1,717 \cdot \exp \left(-0,693 \cdot \frac{\sigma}{T_y} \right).$$

Сопоставляя накопленную при формообразовании лопастей стабилизатора степень деформации сдвига с ее предельным значением, можно оценить суммарную степень использования запаса пластичности, в зависимости от требований к качеству изготавливаемых изделий установить количество формообразующих операций (рис. 6) и назначить рациональные пооперационные степени деформации.

$$2k_{CP} = 1079,635 + 20,822 \cdot \frac{R_1}{2t_c} - 1043,829 \cdot \frac{t_0}{t_c} - 0,823 \cdot \left(\frac{R_1}{2t_c} \right)^2 + 1952,8414 \cdot \left(\frac{t_0}{t_c} \right)^2 + 17,657 \cdot \frac{R_1}{2t_c} \cdot \frac{t_0}{2t_c} - 0,00235 \cdot \left(\frac{R_1}{2t_c} \right)^3 - 1506,94 \cdot \left(\frac{t_0}{t_c} \right)^3 - 0,468 \cdot \frac{R_1}{d_0} \cdot \left(\frac{t_0}{t_c} \right)^2 - 0,989775 \cdot \left(\frac{R_1}{2t_c} \right)^2 \cdot \frac{t_0}{t_c};$$

Последняя формула позволяет осуществить переход от безразмерной характеристики технологической силы графические зависимости, для которой к ее размерному значению, оценив осредненное по объему пластической области значение пластической постоянной материала. Соответствующие графики для стали У12А приведены на рисунке 6.

В четвертом разделе разработана конструкция рабочих бойков с криволинейными клиновыми выступами, обеспечивающими возможность сочетать штамповку с одновременной отрубку облоя по внешнему контуру лопастей.

Проведено многофакторное экспериментальное исследование [1,3,4], позволившее определить закономерности влияния геометрических размеров клиновых выступов на качество изготавливаемых стабилизаторов стреловидных пуль.

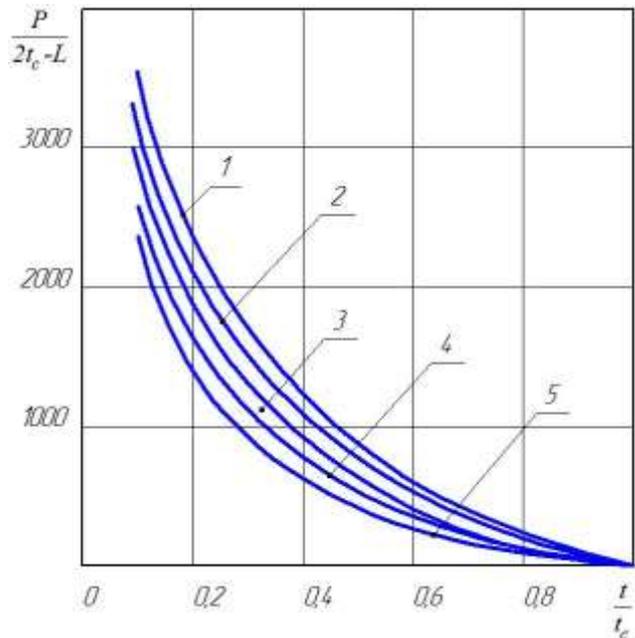


Рис. 6. Зависимости размерной относительной силы от степени обжатия и радиуса кривизны контура инструмента для стали У12.
 1 - $\bar{R}_1 = 20,0$; 2 - $\bar{R}_1 = 15,0$; 3 - $\bar{R}_1 = 10,0$;
 4 - $\bar{R}_1 = 10,0$; 5 - $\bar{R}_1 = 1,0$;

Варьируемые в эксперименте факторы представлены на рисунке 7 (X_0 - фиктивная переменная для расчета свободного члена регрессии), выходным параметром являлось толщина следа отрубki облоя. Представленная в матрице планирования полного факторного эксперимента с тремя факторами (табл. 1), варьируемыми на двух уровнях с первичной экспериментальной информацией.

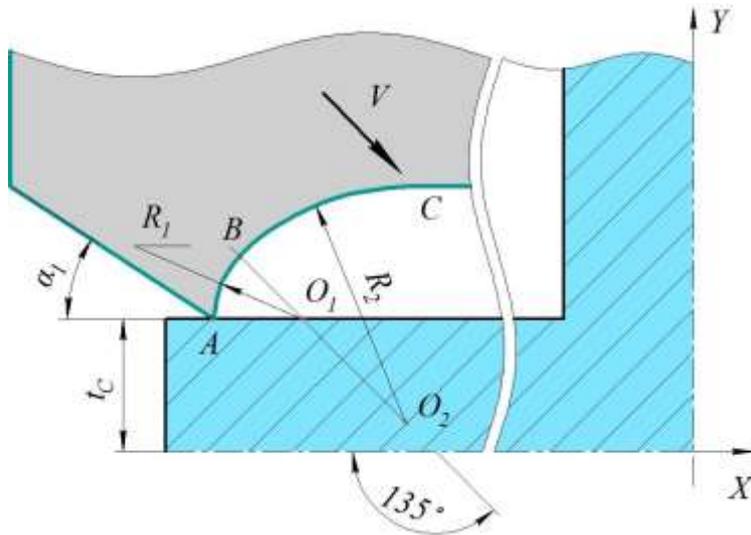


Рис. 7. Схема процесса обрубki облоя по внешнему контуру лопастей с варьируемыми факторами: $R_1(X_1)$ – малый радиус передней поверхности клина; $R_2(X_2)$ – большой радиус передней поверхности клина; $\alpha_1(X_3)$ – угол задней грани клина.

лого радиуса передней поверхности клина, Второе по величине оказывает влияние α_1 – угла задней грани клина.

Таблица 1. Матрица планирования с первичной экспериментальной информацией для сталей:

\bar{Y}_1 - сталь 20; \bar{Y}_2 - сталь 45; \bar{Y}_3 - сталь 40ХН2СМА.

№ опыта	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	$X_1X_2X_3$	\bar{Y}_{1j}	\bar{Y}_{2j}	\bar{Y}_{3j}
1	+	-	-	-	+	+	+	-	0,1010	0,1497	0,1865
2	+	+	-	-	-	-	+	+	0,1506	0,1845	0,2335
3	+	-	+	-	-	+	-	+	0,1246	0,1744	0,2155
4	+	+	+	-	+	-	-	-	0,2114	0,2378	0,2798
5	+	-	-	+	+	-	-	+	0,0148	0,0936	0,1286
6	+	+	-	+	-	+	-	-	0,1020	0,1574	0,1927
7	+	-	+	+	-	-	+	-	0,0384	0,1183	0,1575
8	+	+	+	+	+	+	+	+	0,1628	0,2107	0,2389

Для набора марок сталей, из которых рекомендуется изготавливать стреловидные пули для охотничьих боеприпасов получены статистически обоснованные уравнения регрессии, связывающие варьируемые факторы с результи-

рующей переменной. Проведенные экспериментальные исследования позволили установить, что наибольшее влияние на толщину следа отрубki облоя оказывает величина R_1 – величина ма-

лового радиуса передней поверхности клина, Второе по величине оказывает влияние α_1 – угла задней грани клина.

рующим параметром качества изготавливаемых изделий.

Уравнение регрессии в натуральных переменных:

Для стали 20:

$$\bar{z} = 0,1114 + 0,0056\bar{R}_1 + 0,0057\bar{R}_2 - 0,2332\alpha_1 + 0,0151\bar{R}_1 \cdot \bar{R}_2 + 0,0504\bar{R}_1 \cdot \alpha_1.$$

Для стали 45:

$$\bar{z} = 0,1474 - 0,0064\bar{R}_1 + 0,0089\bar{R}_2 - 0,1563\alpha_1 + 0,0117\bar{R}_1 \cdot \bar{R}_2 + 0,0390\bar{R}_1 \cdot \alpha_1.$$

Для стали 40ХН2СМА:

$$\bar{Y} = 0,1676 + 0,0114\bar{R}_1 + 0,0150\bar{R}_2 - 0,1489\alpha_1 + 0,0071\bar{R}_1 \cdot \bar{R}_2 + 0,0229\bar{R}_1 \cdot \alpha_1.$$

Значения толщины следа от отрубки облоя, минимизированные для различных материалов приведены в таблице 2.

Таблица 2. Относительная толщина следа облоя при штамповке стабилизаторов стреловидных пуль с одновременной отрубкой облоя.

№	Материал обрубаемой лопасти	Механические характеристики заготовки			Относительная толщина следа облоя $\bar{z}_{min} = \frac{z_{min}}{2t_C}$
		σ_B МПа	σ_T МПа	δ %	
1	Сталь 40ХН2СМА	1079	932	12	0,1286
2	Сталь 45	598	353	16	0,0938
3	Сталь 20	412	245	25	0,0148

В пятом разделе спроектировано радиально штампуемое устройство с поступательным движением рабочих бойков (рис.8) [5], обеспечивающее холодное пластическое формообразование стабилизаторов с плоским задним торцом, исключаяющее весьма нетехнологичную завершающую механическую обработку лопастей по заднему торцу.

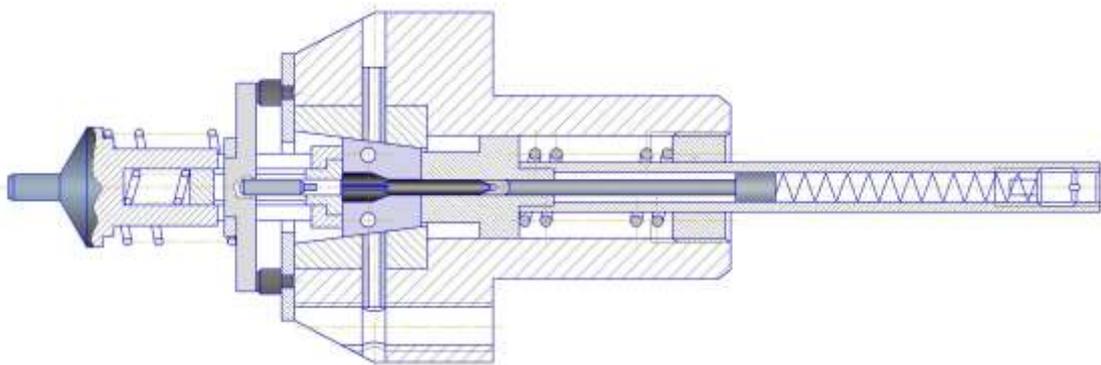


Рис. 8. Радиально-штампуемое устройство с поступательным движением рабочего инструмента.

Экспериментально, крешерным методом, определены необходимая технологическая сила радиальной штамповки стабилизаторов и коэффициент передачи силы разработанным штампуемым устройством от прессового оборудования на рабочие бойки. Для этого была изготовлена партия крешеров высотой 2,0 мм из стали 20 диаметром 4,5 мм. Часть этих крешеров осаживалась между параллель-

ными плитами на гидравлической тихоходной испытательной машине с целью получения тарировочной кривой "сила - текущая высота", которая определялась непосредственным измерением после осадки крешера при достижении фиксированного значения силы. Крешеры той же партии использовались для определения силы при радиальной штамповке в устройстве с поступательным движением инструмента. Таким образом можно получить соответствие между силой, воспринимаемой одним бойком, и силой, которая должна быть приложена со стороны прессы

$$P = n \cdot P_1 \quad (n - \text{число бойков})$$

$P_1 = \sqrt{2} \cdot N$, где P_1 - радиальная сила, передаваемая каждым бойком (рис. 9)

$$(T_{P_1} + P_1) \cos \beta_k + F_1 \sin \beta_k = Q_1$$

$$[(T_{P_1} + P_1) \sin \beta_k + T_{Q_1}] \cos \beta_k = F_1,$$

$$\text{где ; } F_1 = \frac{F}{n}$$

$$T_{P_1} = F_1 \cdot \mu_{P_1} ;$$

$$T_{Q_1} = Q_1 \cdot \mu_{Q_1}$$

После подстановки этих значений в выражение "коэффициента трансформации" сил и преобразований получаем:

$$\eta_T = \frac{F_1}{P_1} = \frac{\operatorname{tg} \beta_k + \mu_{Q_1}}{1 + \operatorname{tg}^2 \beta_k - (\mu_{P_1} + \mu_{Q_1}) \operatorname{tg} \beta_k - \mu_{P_1} \mu_{Q_1}}.$$

Таким образом, можно определить силу, передаваемую одному бойку F_1 от прессового оборудования, через теоретически найденную радиальную силу, воспринимаемую одним бойком P_1 .

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.

В результате комплекса проведенных теоретических и экспериментальных следований получены следующие основные результаты и сделаны выводы:

1. Усовершенствована технологическая схема холодной радиальной штамповки стабилизаторов стреловидных пуль с одновременной качественной отрубкой облоя по внешнему контуру лопастей, позволяющий исключить нетехнологичную операцию механической обработки или обрезки в штампе.

2. При анализе типовой модельной задачи о течении жесткопластического слоя в криволинейном сужающемся клиновом канале без трения показано, что при аппроксимации свободной от контакта с инструментом границы деформируемого материала дугой окружности вся пластическая область схематизируется логарифмическими спиралями. Результирующие весьма простые геометрические и силовые зависимости не усложняются при увеличении протяженности

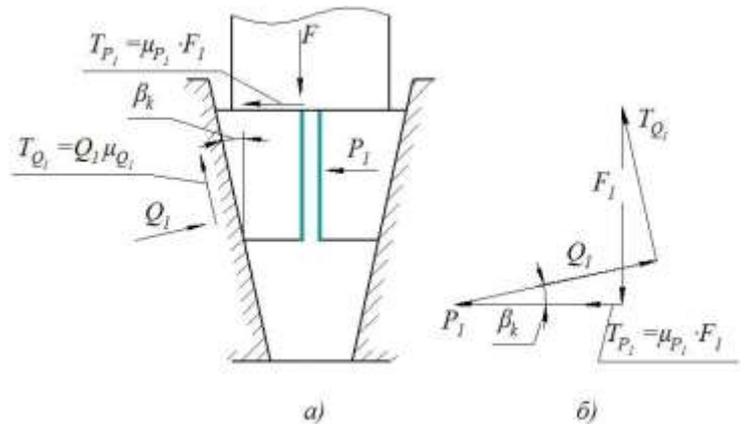


Рис. 9. Схема радиальной штамповки в устройствах с поступательным движением бойков: а) – схема радиальной штамповки, б) – силовой многоугольник.

слоя (количества пластических областей), что позволяет оценивать стадии, близкие к окончательному заполнению канала.

3. Силовой анализ операции штамповки лопастей стабилизатора с одновременной отрубкой облоя, проведенный аналитическим методом линий скольжения, показал, что повышенный уровень сжимающих контактных давлений, присущий данной операции, обеспечивает более интенсивное залечивание накапливаемых микроповреждений деформируемого материала и позволяет изготавливать стабилизаторы стреловидных пуль, имеющих более тонкие и высокие лопасти с улучшенными механическими характеристиками материала.

4. Экспериментальные исследования методом делительных сеток деформированного состояния материала при течении жесткопластического слоя в криволинейном клиновом сужающемся канале позволили устанавливать рациональное назначение количества операций и распределение степени деформации и использования запаса пластичности по формообразующим операциям. Так, установленное снижение степени использования запаса пластичности на 10-12,5 % позволили без потери качества получать стабилизаторы из цилиндрической заготовки диаметром 4,5 мм толщиной до 0,38 мм.

5. Разработано радиально-штампующее устройство с поступательным движением рабочих бойков, обеспечивающее холодное пластическое формообразование стабилизаторов с плоским задним торцом. Данное устройство расширяет возможности холодного пластического формообразования точных деталей крестообразного профиля на торцах стержневых цилиндрических заготовок из конструкционных малоуглеродистых сталей.

6. Разработаны бойки с криволинейными клиновыми выступами, повышающие качество внешнего контура лопастей при отрубке облоя и позволяющие исключить нетехнологичные операции обрезки лопастей по внешнему контуру.

7. В результате проведения многофакторных экспериментальных исследований получены статистически обоснованные регрессионные модели, позволяющие количественно оценить и уменьшить дефекты, возникающие при отрубке лопастей стабилизаторов стреловидных пуль из различных марок сталей по внешнему контуру, а также обосновать геометрические размеры профильных клиновых выступов на бойках.

8. Экспериментально определены необходимая технологическая сила радиальной штамповки стабилизаторов и коэффициент передачи силы разработанным штампующим устройством от прессового оборудования на рабочие бойки.

9. Разработаны практические рекомендации к проектированию технологического процесса изготовления стабилизатора стреловидных пуль, а также штамповой оснастки и инструмента. Результаты исследования использованы в учебном и промышленном процессе на предприятии ОАО «ЦНИИТОЧМАШ» (г. Климовск Московской обл.).

10. Технологическая схема, полученная в результате исследований и конструкторско-технологических разработок, позволила снизить себестоимость изготовления стабилизатора стреловидной пули на 15-20%.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В ПУБЛИКАЦИЯХ

1. Панфилов Г.В., Недошивин С.В., Калинин С.С. Планирование и первичная обработка результатов статистического машинного эксперимента на основе множественного корреляционно-регрессионного анализа // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 7. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. С. 20-28.
2. Панфилов Г.В., Недошивин С.В., Калинин С.С. Заключительные этапы проектирования технологии штамповки остроконечных конических участков на цилиндрических заготовках // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 7 Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. С 48-60.
3. Панфилов Г.В., Сухонин В.А., Калинин С.С. Планирование многофакторного эксперимента по радиальной штамповке концевых участков крестообразного профиля // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 7: в 2 ч. Ч. 2. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. С. 9-17.
4. Панфилов Г.В., Сухонин В.А., Калинин С.С. Обработка результатов многофакторного эксперимента по радиальной штамповке концевых участков крестообразного профиля // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 7: в 2 ч. Ч. 2. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. С. 29-41.
5. Калинин С.С. Разработка автоматизированного штампа для изготовления высокоточных оперенных стабилизаторов для перспективных охотничьих патронов // Вестник Тульского государственного университета. Автоматизация: проблемы идеи решения. В 2 ч. Ч.2. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. С. 6-10.
6. Калинин С.С. Патентный анализ конструктивных особенностей устройств радиальной штамповки // Молодежный вестник политехнического института: сб. статей. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. С. 85-87.
7. Калинин С.С. Технологические возможности штамповки стабилизаторов стреловидных пуль // Молодежный вестник политехнического института: сб. статей. Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. С. 134-136.
8. Калинин С.С. Управление геометрическими размерами стабилизаторов при радиальной штамповке // Молодежные инновации: сб. статей. В 2 ч. Ч.1. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013.С. 70-72.

Подписано в печать 08.12.16.

Формат бумаги 60×84 $\frac{1}{16}$. Бумага офсетная.

Усл. печ. л.0,9. Уч.-изд. л. 0,8.

Тираж 100 экз. Заказ 085.

Тульский государственный университет.
300600, г. Тула, просп. Ленина, 92.

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