

*На правах рукописи*



**Гусев Дмитрий Сергеевич**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГОРЯЧЕЙ ОБЪЕМНОЙ  
ШТАМПОВКИ ПОКОВОК С ТОНКИМИ ПОЛОТНАМИ**

Специальность 2.5.7 – Технологии и машины обработки давлением

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2024

Работа выполнена на кафедре систем пластического деформирования федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва.

**Научный  
руководитель:**

**Сосенушкин Евгений Николаевич,**  
доктор технических наук, профессор, Заслуженный работник высшей школы РФ, профессор кафедры систем пластического деформирования федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва

**Официальные  
оппоненты:**

**Шибakov Владимир Георгиевич**  
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Машиностроение» Набережночелнинского института (филиала) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет», г. Набережные Челны

**Лисунец Николай Леонидович**  
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры обработки металлов давлением федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский политехнический университет», г. Москва

Защита состоится «27» июня 2024 г. в 15.00 на заседании диссертационного совета 24.2.332.01 при ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», по адресу: 127994, г. Москва, ГСП-4, Вадковский пер., д. 1. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» и на сайте: [https://stankin.ru/pages/id\\_115/page\\_1459](https://stankin.ru/pages/id_115/page_1459)

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью учреждения (организации), просим направлять в диссертационный совет 24.2.332.01 по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря совета.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

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



Е.С. Сотова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** Технологические процессы обработки металлов давлением с предварительным нагревом заготовок характеризуются высокими производительностью и коэффициентом использования металла (КИМ), повторяемостью форм и размеров поковок, однако сопровождаются значительными удельными силами деформирования и циклическим изменением температур, что приводит к преждевременному выходу из строя штампов. Горячая объемная штамповка (ГОШ) на молотах и на современном этапе остается востребованной технологией изготовления поковок из сталей и цветных сплавов в условиях, как мелкосерийного производства, так и при изготовлении поковок крупными партиями.

Отличия штампованных поковок по различным параметрам формы указывает на необходимость их объединения в технологически однородные группы. Группа поковок с тонкими полотнами или с высокими ребрами жесткости пополняется из года в год более сложными по форме изделиями. В номенклатуру поковок, имеющих тонкие полотна, входят детали слесарного и медицинского инструмента, а также оребренные панели. Список таких поковок можно продолжить: балансиры и вкладыши, детали рам, рычаги, шатуны, рессоры, тяги, фланцы и прочее. Для получения поковок с тонким полотном необходимо приложить удельную силу в несколько раз превосходящую напряжение текучести материала, при этом снижается стойкость штампов и экономичность штампованных изделий. Поэтому возникает необходимость наряду с применением типовых технологий и кузнечно-штамповочного оборудования, проектировать специализированное оборудование и создавать ориентированные на него технологические процессы ГОШ, что, несомненно, является **актуальной задачей**.

**Степень разработанности проблемы.** Большой вклад в создание и развитие теории и технологий ГОШ внесли отечественные и зарубежные научные школы обработчиков давлением, яркими представителями которых являются отечественные и зарубежные ученые: Аксенов Л.Б., Артес А.Э., Богатов А.А., Гречников Ф.В., Воронцов А.Л., Грешнов В.М., Губкин С.И., Гун Г.Я., Джонсон У., Дмитриев А.М., Евстратов В.А., Ильюшин А.А., Кийко И.А., Колмогоров В.Л., Кудо Г, Ланской Е.Н., Малинин Н.Н., Меллор П.Б., Мещерин В.Т., Надаи А., Непершин Р.И., Овчинников А.Г., Охрименко Я.М., Полухин П.И., Прандтль Л., Работнов Ю.Н., Рудской А.И., Семенов Е.И., Соколовский В.В., Сосенушкин Е.Н., Степанский Л.Г., Сторожев М.В., Тарновский И.Я., Томленов А.Д., Унксов Е.П., Утяшев Ф.З., Целиков А.И., Шibaков В.Г., Хилл Р., Яковлев С.П., Яковлев С.С. и многие другие.

В работах этих ученых представлены результаты исследований пластического формоизменения, рассмотрены аналитические, графо-аналитические и численные методы исследования течения металла в очаге пластической деформации. Обоснованы технологические возможности процессов горячей штамповки и используемого оборудования, рассмотрены различные методы прогнозирования энергосиловых параметров. Однако следует отметить, что в основном исследования проводились для поковок с осевой симметрией в осесимметричной или плоской постановке, при этом применялись метод линий скольжения, метод баланса мощности, метод верхней оценки, метод конечных элементов.

Форма контура плоской поковки в процессе формообразования зависит от положения границы раздела течения металла и направления линий тока, что позволяет сформулировать граничные условия. Для аналитического решения краевых задач теории пластичности А.А. Ильюшиным создана теория течения тонкого пластического

слоя по поверхностям, применение которой обеспечивает возможность расчета формообразования тонких плоских поковок и определения технологических параметров деформирования с помощью аналитического метода.

**Целью работы** является проектирование и исследование эффективных вариантов технологических процессов горячей объемной штамповки поковок с тонким полотном, ориентированных на использование молотов со встречным движением ударных масс горизонтальной компоновки – импакторов.

Чтобы достичь сформулированной в работе цели были поставлены и решены следующие **задачи исследования**:

1. Провести анализ номенклатуры поковок, штампуемых на молотах, и выбрать представителей удлиненных в плане поковок, имеющих тонкие полотна, с оценкой возможности их штамповки на импакторах.

2. Разработать варианты технологических процессов ГОШ поковок представителей с учетом специфики работы молотов горизонтальной компоновки.

3. Разработать цифровые математические модели заготовок, поковок и штампового инструмента для проведения имитационного моделирования и исследования вариантов разработанных технологических процессов ГОШ методом конечных элементов (МКЭ). По результатам моделирования выявить особенности кинематики течения металла при заполнении ручья штампа, установить зависимость сил деформирования от хода ударных масс, проанализировать напряженно-деформированное состояние (НДС) металла заготовки и распределение температуры по объему заготовки на этапах деформирования для обоснования технологических параметров и термомеханических режимов.

4. Поставить и решить контактную задачу о нестационарном течении пластического слоя по плоскостям с получением аналитических зависимостей для оценки давления на контактных поверхностях и силовых параметров деформирования поковок представителей, имеющих сложную форму.

5. Поставить и провести экспериментальные исследования наиболее эффективной технологии ГОШ для подтверждения достоверности разработанных математических и компьютерных моделей.

6. Разработанные варианты технологического процесса ГОШ передать для использования на промышленные предприятия, в кузнечных цехах которых используется штамповка на молотах. Отдельные результаты работы, обладающие новизной, включить в учебный процесс.

**Объект исследования** – поковки удлиненные в плане с тонким полотном, представителями которых являются ключи гаечные с открытым зевом, изготавливаемые в условиях крупносерийного и массового производства.

**Предмет исследования** – технологический процесс горячей объемной штамповки поковок гаечных ключей, ориентированный на специализированное оборудование - молот горизонтальной компоновки - импактор.

**Научная новизна** работы заключается в:

1. Установлении степени влияния размера сетки конечных элементов и числа узлов на картину течения металла при численном моделировании процесса ГОШ, с помощью 3D моделей штампового инструмента и вариантов заготовок для проведения имитационного моделирования МКЭ по предложенным новым технологическим процессам ГОШ поковок гаечного ключа, для которых обоснованы рациональные значения температур заготовки из стали 40Х (950°С) и штампа из стали 5ХНМ (300°С), величина коэффициента заполнения облойной канавки (0,4), а также возможность

деформирования заготовок научно обоснованных форм и размеров за один удар импактора.

2. Решении краевой задачи нестационарного течения тонкого пластического слоя по определению контактного давления и силовых параметров при горячей объемной штамповке поковок гаечных ключей, имеющих сложный внешний контур с получением аналитических зависимостей для определения расчетных показателей методом песчаной аналогии.

3. Установлении характера изменения силы в зависимости от хода инструмента, а также максимального значения силы, которого она достигает в конце процесса деформирования, результаты проведенного физического эксперимента позволили определить возникающие нагрузки на разных этапах молотовой штамповки и подтвердить возможность заполнения рабочих элементов штампа за один удар молота.

4. Сравнении вариантов предложенных технологических процессов ГОШ из заготовок разных форм и размеров, которое показало, что по расходу металла, характеризующегося КИМ, затрачиваемой энергии при ударе молота и расходуемой на нагрев заготовок, следует отдать предпочтение варианту, реализуемому из штучной фигурной заготовки, изготавливаемой из полос листового металла необходимой толщины. Что касается варианта штамповки из предварительно прокатанных заготовок, то здесь нужно остановиться на варианте с использованием длиномерной непрерывной заготовки, все формоизменяющие операции в котором реализуются при однократном нагреве заготовки.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы**

1. Спроектированы чертеж поковки и новые варианты технологического процесса горячей объемной штамповки гаечного ключа с научным обоснованием термомеханических режимов, выбором и корректировкой конструктивных элементов поковки, построением эпюры диаметров и эпюры сечений поковки для определения усредненных размеров заготовок. Техническая новизна разработанных вариантов технологического процесса подтверждена 4-мя патентами РФ на изобретения.

2. По результатам имитационного моделирования получены графические зависимости эффективных напряжений и температуры заготовки от времени цикла штамповки: максимальные напряжения не превысили 550 МПа, что является удовлетворительным результатом в плане удельной нагрузки на штамп; при начальной температуре заготовки 950 °С она оставалась не выше 1250 °С, несмотря на дополнительный разогрев металла при ударе за счет теплового эффекта деформации, что обезопасит штампуемый материал от перегрева.

3. Компьютерное моделирование вариантов технологии ГОШ позволило добиться нужных форм и размеров заготовок и необходимых температурных и силовых параметров для обеспечения эффективной штамповки поковки гаечного ключа с наибольшим КИМ за один удар молота при однократном нагреве заготовки.

4. Для проведения физических экспериментов обоснована возможность использования вертикального ковочного молота МА4129 с пневматическим приводом, для которого были разработаны чертежи верхнего и нижнего штампов. Сравнению с импактором подвергались энергия удара и время соударения штампов. Обоснован вариант конструктивного изменения элементов молотового штампа: размеров облойной канавки для штамповки поковки ключа 4×5 с уменьшением ширины мостика до 3,5 мм и уменьшением ширины магазина до 8,5 мм.

5. Проведен эксперимент по определению конфигурации линии раздела течения и суммарной силы с помощью аналогии с песчаной насыпью. По предельной насыпи

определены геометрические характеристики, необходимые для расчета параметров эпюры давлений и силы деформирования на конечной стадии формоизменения. Экспериментально подтверждено, что суммарная сила, рассчитанная с помощью аналогии с песчаной насыпью, удовлетворительно коррелирует со значениями, полученными компьютерным моделированием и в ходе физического эксперимента.

**Методы исследования и оборудование.** Теоретические положения ГОШ основаны на уравнениях теории нестационарного течения тонкого пластического слоя, а расчет контактных давлений и силовых параметров – на методе песчаной аналогии. Однозначность получаемых результатов достигается заданием начальных и граничных условий в полном соответствии с поставленными задачами.

Численные эксперименты в виде компьютерного моделирования МКЭ проведены с использованием лицензионного программного обеспечения DEFORM 3D. Физические эксперименты базировались на методике аналогового моделирования. Технологические процессы ГОШ проектировались с учетом особенностей импакторов и реализовывались на сертифицированном оборудовании технологического полигона ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», в частности, на универсальном комплексе на базе испытательной машины INSTRON 3500 KPX силой 3500 кН и на ковочном пневматическом молоте модели МА4129.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Математическая постановка и решение краевой задачи механики деформируемого твердого тела, проведенные в соответствии с теорией нестационарного течения тонкого слоя, с определением силовых параметров на конечной стадии деформирования в соответствии с методом песчаной аналогии, что позволило получить силовые характеристики для предложенных вариантов технологического процесса ГОШ и подтвердить обоснованность выбора кузнечно-штамповочного оборудования для экспериментов и промышленной реализации новых технологий.

2. Установленная взаимосвязь заполняемости гравюры штампа с изменениями формы, размеров и температуры заготовки и элементов штампа.

3. Результаты компьютерного моделирования новых вариантов технологических процессов ГОШ на молоте с оценкой напряженного состояния, контактных давлений и силовых параметров формоизменения, деформированного состояния и уровня скоростей деформаций, а также температурных полей металла поковки гаечного ключа.

#### **Степень достоверности и апробация результатов**

Достоверность результатов исследований и выводов подтверждается корректностью исходных данных и граничных условий имитационного моделирования, проведенного с использованием современных объектно-ориентированных программных средств. Сформулированные в тексте теоретические положения и сопутствующие им допущения обоснованы, т.к. построены на хорошо зарекомендовавшей себя теории пластического течения в тонком слое.

Практические результаты получены на сертифицированном и поверенном испытательном оборудовании с помощью современной регистрирующей аппаратуры и подтверждаются удовлетворительным согласованием расчетных результатов с результатами экспериментальных исследований.

**Апробация работы.** Результаты исследований были доложены и обсуждались на: Всероссийской конференции «Цифровая экономика: оборудование, управление, человеческий капитал», Вологда, 25 декабря 2018 года; Всероссийской конференции

«Станкостроение и инновационное машиностроение. Проблемы и точки роста», Уфа, 26–28 февраля 2019 года; XIV-ый международный конгресс «Кузнец-2019», посвященный 80-летию со дня рождения Ю.А. Зимина «Состояние и перспективы развития технологических процессов обработки металлов давлением и оборудования кузнечно-прессового машиностроения в современных условиях», Рязань, 10–13 сентября 2019 года; «Актуальные проблемы науки и техники», Ростов-на-Дону, 17–19 марта 2021 года; научном семинаре кафедры систем пластического деформирования «МГТУ «СТАНКИН», 2019, 2021, 2024 гг. Москва.

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности.** Работа соответствует формуле специальности 2.5.7 «Технологии и машины обработки давлением». В работе разрабатывается и исследуется технология горячей объемной штамповки поковок гаечных ключей, являющихся представителями группы поковок, удлиненных в плане и имеющих тонкое полотно, что соответствует п. 1 «Закономерности деформирования материалов и повышения их качества при различных термомеханических режимах, установление оптимальных режимов обработки», п. 3 «Технологии ковки, прессования, листовой и объемной штамповки и комплексных процессов с обработкой давлением, например, непрерывного литья и прокатки заготовок» и п. 5 «Методы оценки напряженного и деформированного состояния и способы увеличения жесткости, прочности и стойкости штампового инструмента» паспорта научной специальности 2.5.7.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 12 печатных работ, в том числе 3 статьи в изданиях, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК Министерства науки и образования РФ, 5 статей в материалах и сборниках научных трудов конференций, а также получено 4 патента РФ на изобретения.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения. В состав работы включены 12 таблиц, 93 рисунка, список литературы из 182 наименования и приложение. Общий объем диссертации – 185 страниц.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, представлена научная новизна, перечислены методы исследования, теоретическая и практическая значимость, представлены результаты, полученные автором лично и выносимые на защиту, приведены данные об апробации результатов работы и подтверждающая их достоверность.

**В первой главе** рассмотрена группа поковок, удлиненных в плане и имеющих тонкие полотна, обоснован выбор детали-представителя – гаечного ключа с открытым зевом для ее изготовления методами ГОШ, области их применения и существующие технологии изготовления, рассмотрены работы по теории пластического течения металла в относительно тонком слое.

Штамповка поковок гаечных ключей осуществляется в условиях крупносерийного и массового производства, поэтому в качестве оборудования выбраны молота с горизонтальным движением ударных масс – импакторы (рисунок 1). На выбор оборудования повлиял и тот факт, что молоты с паровоздушным приводом признаны экономически не эффективными. Обзор показал, что на технологические параметры процесса пластического деформирования поковок гаечных ключей существенное влияние оказывают не только механические свойства материалов, из которых они изготавливаются, но и, наряду с геометрическими характеристиками, особенности кинематики течения в тонком пластическом слое с затеканием металла в облой. При этом математическая проработка вопросов теории формоизменения в указанных

условиях для практического применения на сегодняшний день выполнена не в достаточно полной мере.

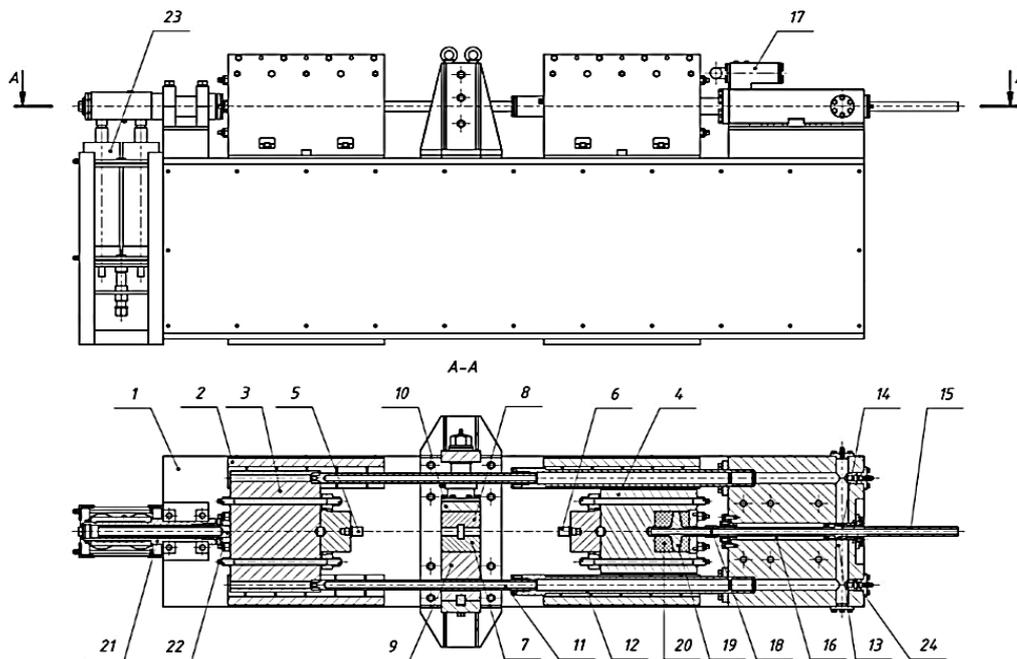


Рисунок 1 – Схема импактора ГШМ-4 конструкции МГТУ «СТАНКИН»

Во второй главе по стандартной методике проведен расчет необходимых параметров и спроектирован чертеж поковки гаечного ключа 7811-0001 D1 X9 ГОСТ 2839-80 с размерами зевов 4×5. На выбор размеров поковки повлияло ограничение энергии удара имеющегося импактора 4 кДж. Построенные эпюры диаметров и сечений поковки позволили выбрать усредненные параметры заготовки.

При использовании импакторов рациональным является применение заготовок, максимально приближенных к форме готовых поковок, полученных вальцовкой на ковочных вальцах, профилированных поперечно-винтовой, радиально-сдвиговой или поперечно-клиновой прокаткой. Это дает возможность свести число ударов подвижных частей до одного. Специфика технологии изготовления гаечных ключей пластическим деформированием на импакторе заключается в необходимости использования устройств подачи заготовок в рабочую зону машины, точного позиционирования и удержания ее в месте соударения ударных масс до нанесения удара по заготовке. Реализация технологических процессов ГОШ в этом случае может вестись двумя путями: использовать специально подготовленные длинномерные профилированные заготовки из легированных сталей или проектировать штучные заготовки специальной геометрии.

Для изготовления длинномерных заготовок может быть использован сортовой прокат необходимого диаметра, либо листовой прокат нужной толщины. Сортовой прокат после предварительного нагрева в проходном индукторе процессами поперечно-винтовой или радиально-сдвиговой прокатки преобразуется в прокат периодического профиля, при этом участок под будущую рукоятку ключа уменьшается в диаметре, чтобы на этапе штамповки уменьшить выход металла в облой. Также прокатывается участок, соединяющий две смежные заготовки между собой. После этого, согласно разработанной технологии, участок длинномерной заготовки, приходящийся на одну поковку, поступает с помощью подающего устройства в рабочую зону импактора и точно позиционируется в месте соударения подвижных масс. Заполнение полости ручья происходит во время смыкания половин штампа за

один удар. В зависимости от организации производственного процесса обрезка облоя может осуществляться поштучно, если технологией предусмотрено отделение каждой отштампованной поковки от длинномерной заготовки, или на обрезку может поступать секция, содержащая несколько отштампованных поковок. Рисунок 2 иллюстрирует этап ГОШ по описанным вариантам технологии. Техническая новизна описанных технологических процессов защищена 2-мя патентами на изобретения (патент RU 2781825 C1, патент RU 2784307 C1).

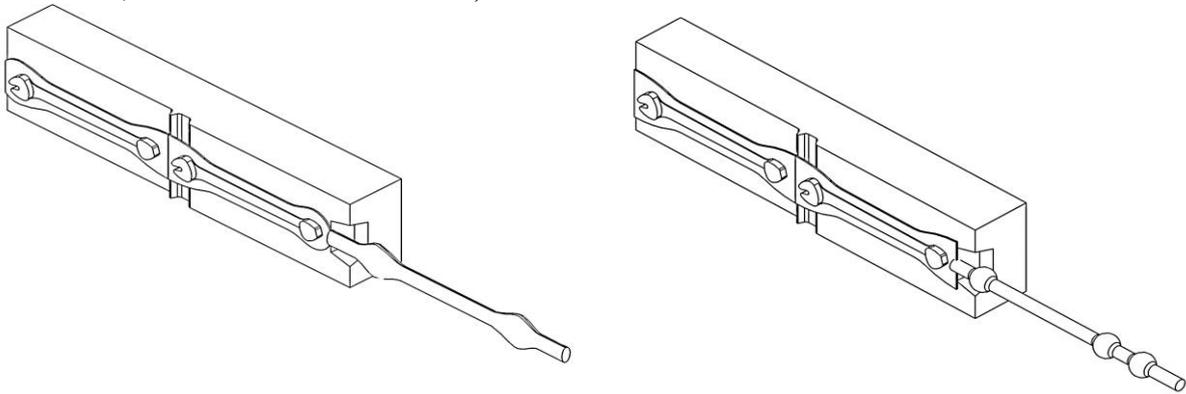


Рисунок 2 – Штамповка из длинномерных профилированных заготовок

Также разработаны варианты штамповки поковки гаечного ключа на импакторе из листовых заготовок. Из нагретой до температуры  $T_1$  в проходном индукторе полосы необходимой ширины получают непрерывную плоскую заготовку поэлементной отрезкой противоположных удаляемых участков с образованием участков под рукоятку гаечного ключа (рисунок 3а) (Патент RU 2781826 C1).

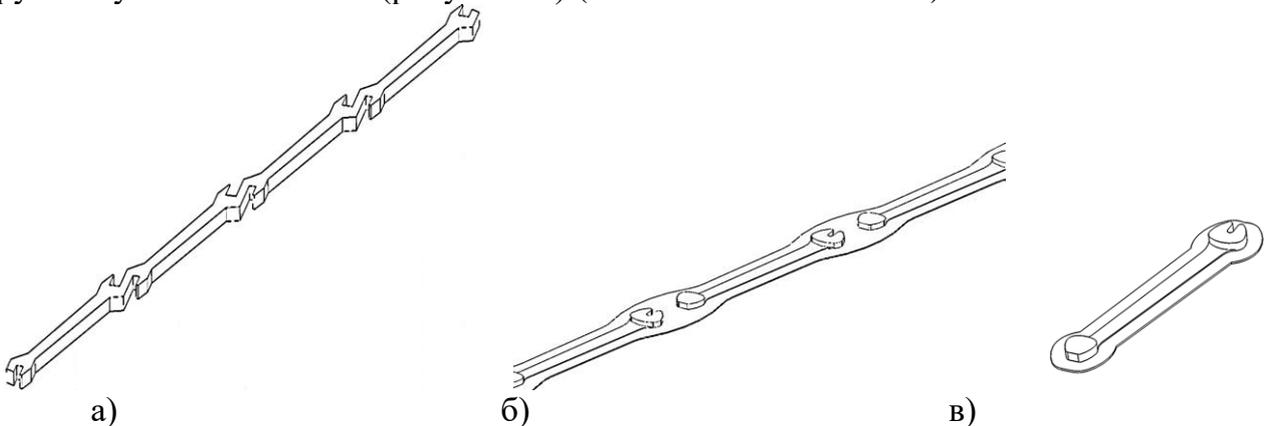


Рисунок 3 – Технология ГОШ из непрерывной листовой заготовки

Одновременно производят оформление пазов в местах расположения зевов гаечных ключей. Смежные заготовки соединяют головками и получают на стыке S-образный участок. Затем при остаточной температуре  $T_2$  заготовку подают на позицию соударения ударных масс молота и деформируют участок плоской заготовки, приходящийся на одну поковку гаечного ключа (рисунок 3б). Одновременно отделяют в отрубном ручье отштампованную поковку (рисунок 3в). В результате ГОШ ведется за один удар в окончательном ручье, а также обеспечивается транспортировка заготовки на этапах обработки и позиционирование в месте соударения подвижных масс импактора.

В альтернативном варианте технологического процесса (патент RU 2784309 C1) вырубкой получают заготовку с утолщениями на концах под головки ключа (рисунок 4а). Смежные заготовки соединяют утолщениями с получением общего участка, в середине которого пробивают отверстие удлиненной формы под зевы смежных ключей. Полученную заготовку сначала нагревают в проходном индукторе до

температуры горячей штамповки, а затем подают с необходимым шагом на молот с горизонтальным расположением ударных масс.

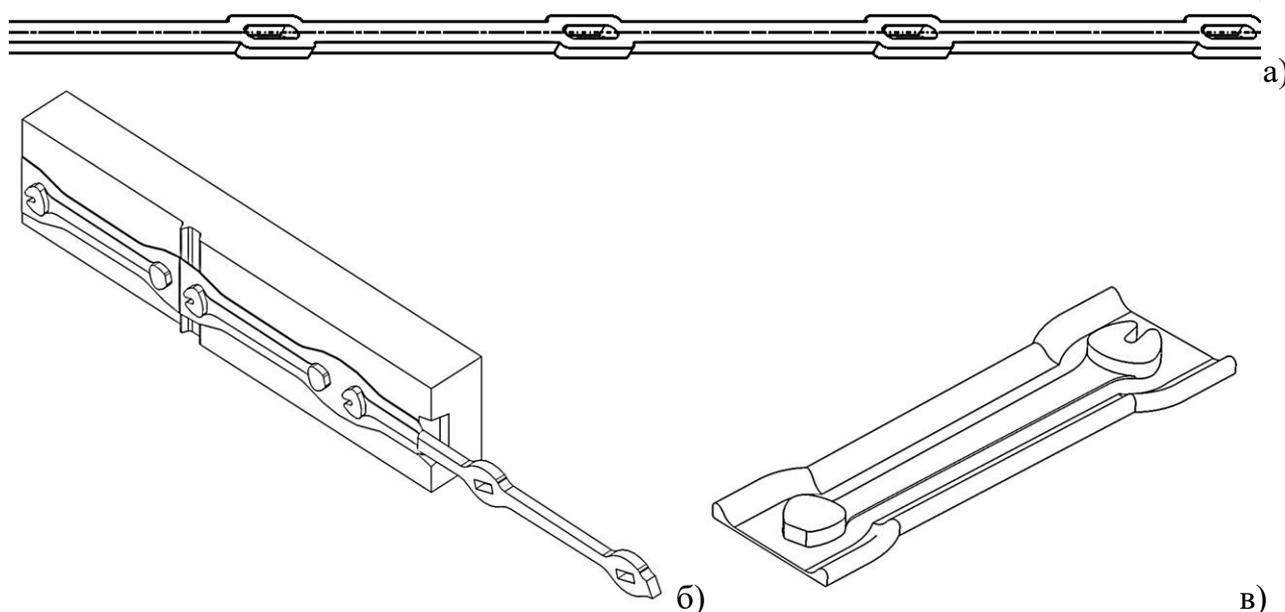


Рисунок 4 – Альтернативный вариант технологического процесса

С помощью штампа деформируют за один удар участок периодического профиля, приходящийся на одну поковку (рисунок 4б). Отштампованную поковку гаечного ключа при соударении половин штампа отделяют от профильной заготовки в отрубном ручье, расположенном соосно со штамповочным ручьем (рисунок 4в). В результате обеспечиваются снижение нагрузок на молотовый штамп, транспортировка заготовки на этапах обработки и позиционирование в месте соударения подвижных масс импактора для формоизменения деформируемого участка плоской заготовки в штампе за один удар.

Следующий вариант разработанной технологии предусматривает использование многоштучной штамповки поковок из участка непрерывной заготовки круглого сечения, примером может служить технологический процесс горячей штамповки одновременно 2-х поковок, как показано на рисунке 5. Предварительным расчетом с последующим моделированием технологического процесса назначается диаметр исходной заготовки  $D_3$  из сортового проката круглого сечения так, чтобы на длине равной длине поковки  $L_{п}$  объем соответствовал сумме удвоенного объема поковки и удвоенного объема облоя с необходимым коэффициентом заполнения облойной канавки.

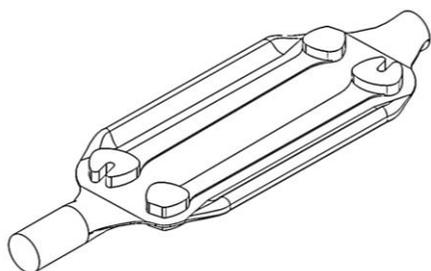


Рисунок 5 – Многоштучная штамповка участка, рассчитанного на две поковки с облоем, длинномерной непрерывной заготовки

Обоснована возможность использования штучной, так называемой Z-образной заготовки (рисунок 6а, в), которая отделяется от полосового проката (ГОСТ 103 – 2006) либо от цельного листового проката (ГОСТ 19903 – 2015), изначально отрезав полосы нужной ширины (рисунок 6б), или лист раскраивается с помощью автоматизированного комплекса лазерной отрезки. После достижения заданной температуры нагретую плоскостную заготовку 1 (рисунок 7) на выходе из индуктора

устанавливают в питатель 2 в виде подвижной рамки, ориентируя ее в наклонном положении под углом  $8^{\circ}20'$ , таким образом, чтобы отросток, выполняющий функцию клещевины и расположенный на одном из утолщений концевой участка плоскостной заготовки, был направлен вверх и в таком положении плоскостную заготовку выдают поступательным движением питателя 2 на позицию, расположенную параллельно месту соударения половин 3 и 4 штампа.

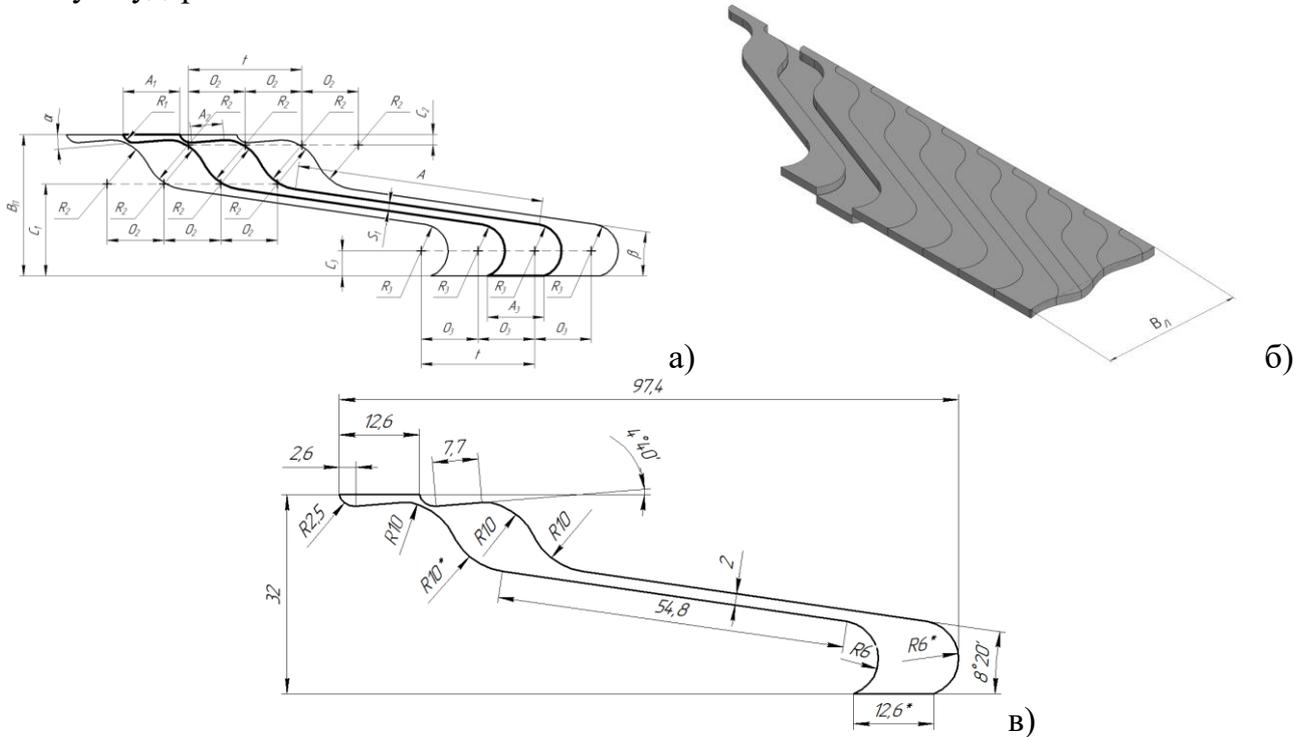
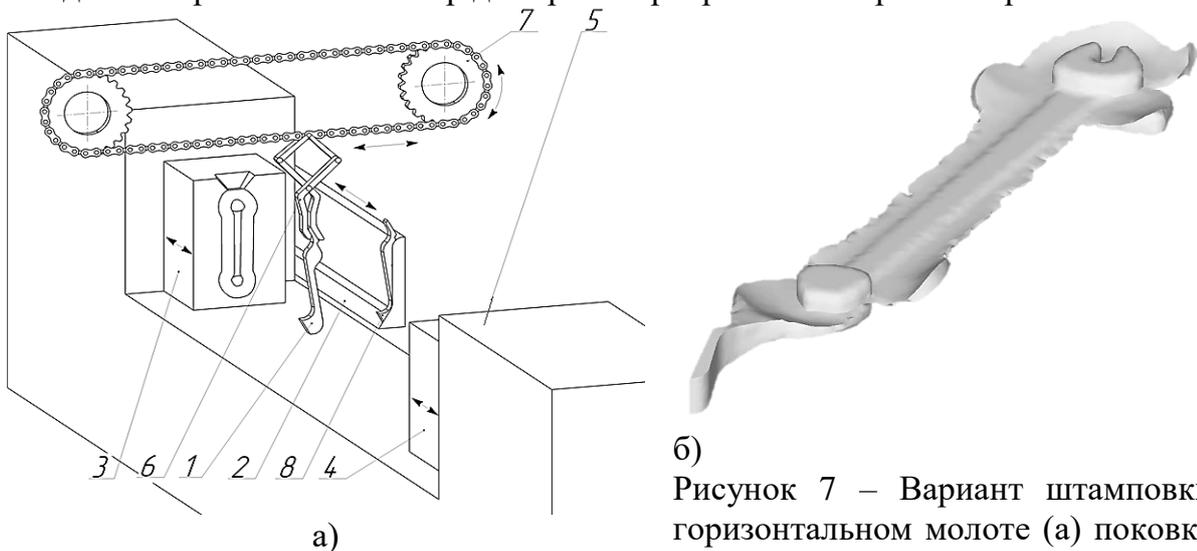


Рисунок 6 – Раскрой полосы: а - параметрический чертеж раскроя для полосового, либо листового проката; б - размещение плоских штучных заготовок в полосе и позиция двухсторонней отрезки; в – Z-образная штучная заготовка

Удерживая плоскостную заготовку 1 за клещевину, с помощью захвата 6 грейферного устройства, расположенного также вертикально, перемещают цепным механизмом 7 в рабочее пространство импактора 5 на место соударения половин 3 и 4 штампа, одновременно с этим питатель 2 отводится на исходную позицию. После штамповки разжимают захват 6, освобождая его от поковки (см. рисунок 7), которая попадает на траповый конвейер для транспортировки на обрезной пресс.



б) Рисунок 7 – Вариант штамповки на горизонтальном молоте (а) поковки (б) из штучной Z-образной заготовки

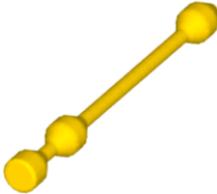
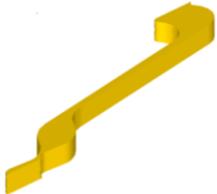
После нанесения одного удара штампом по предварительно нагретой плоскостной заготовке 1, грейферный захват 6 отводит цепным механизмом 7 из рабочей зоны импактора 5 на исходную позицию вне рабочей зоны импактора 5.

**Глава 3** посвящена компьютерному моделированию разработанной технологии ГОШ поковки гаечного ключа в программном комплексе DEFORM-3D. В качестве исходных данных использовались: температуры заготовки 1250°C, 1100°C, 950°C, температура штампа 150°C, 250°C, 300°C; поскольку заготовка контактирует со штампом только во время удара, принимались условия контактного теплообмена при граничных условиях II рода; фактор трения Прандтля – Зибеля при условии применения смазки – 0,35; эффективность удара молота – 0,85; аналоги металлов заготовки и штампа подбирались из базы данных программного комплекса.

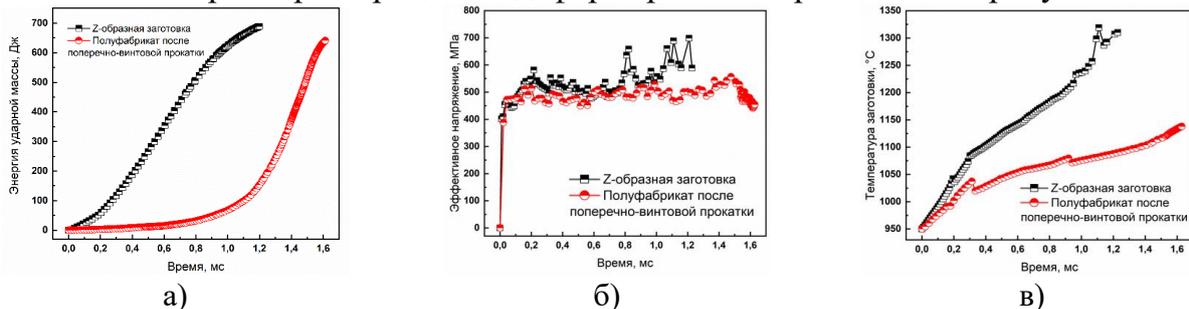
Сравнению подвергались варианты технологии ГОШ из заготовки, полученной поперечно-винтовой прокаткой, и из Z-образной заготовки, результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1

Сравнение технологии ГОШ из двух видов заготовок

	Вид заготовки	
	Полуфабрикат после поперечно-винтовой прокатки	Z-образная
3D модель заготовки		
Масса, г / объем, см <sup>3</sup> заготовки	23,8 / 3,04	18,8 / 2,39
3D модель поковки, конечный этап		
Сила деформирования, кН	572	1014
Затрачиваемая энергия, Дж	641	689
Интенсивность напряжений, МПа	556	698
КИМ	0,5	0,64

Изменение параметров процессов деформирования приведены на рисунке 8.



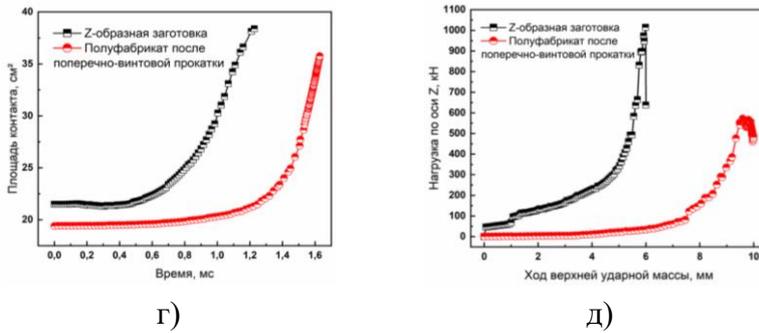


Рисунок 8 – Технологические параметры 2-х вариантов ГОШ: а – энергия ударной массы; б – эффективные напряжения; в – температура заготовки; г – площадь контакта; д – сила сжатия

В главе 4 описаны экспериментальные исследования технологии ГОШ поковок гаечного ключа. Форма и размеры заготовок, использованных при физическом моделировании, были выбраны по результатам компьютерного моделирования с учетом выявленных недостатков. В качестве модельного материала использован свинец марки С0 ГОСТ 3778-98. Данный материал выбран в качестве модельного в связи с тем, что в холодном состоянии при  $T=20^{\circ}\text{C}$  свинец симулирует штамповку стали в горячем состоянии, т.к. процессы рекристаллизации этого металла начинаются при  $T=-32^{\circ}\text{C}$ , а при нормальной температуре проходят полностью. Экспериментальный штамп был выполнен из блока пластин. Плоские срезы полости ручья штамповой оснастки проектировались по готовому чертежу штампа с использованием программного обеспечения КОМПАС-3D. По выполненным послойным чертежам на автоматизированном комплексе лазерной резки получен комплект пластин для сборки модельного штампа. После центрирования пластины сваривались, затем блок пластин обрезался и ручей подвергался тщательной зачистке. Фотографии изготовленных верхней и нижней половин штампа (а), профилированных заготовок (б) для проведения физического моделирования ГОШ и поковка с облоем (в) представлены на рисунке 9.

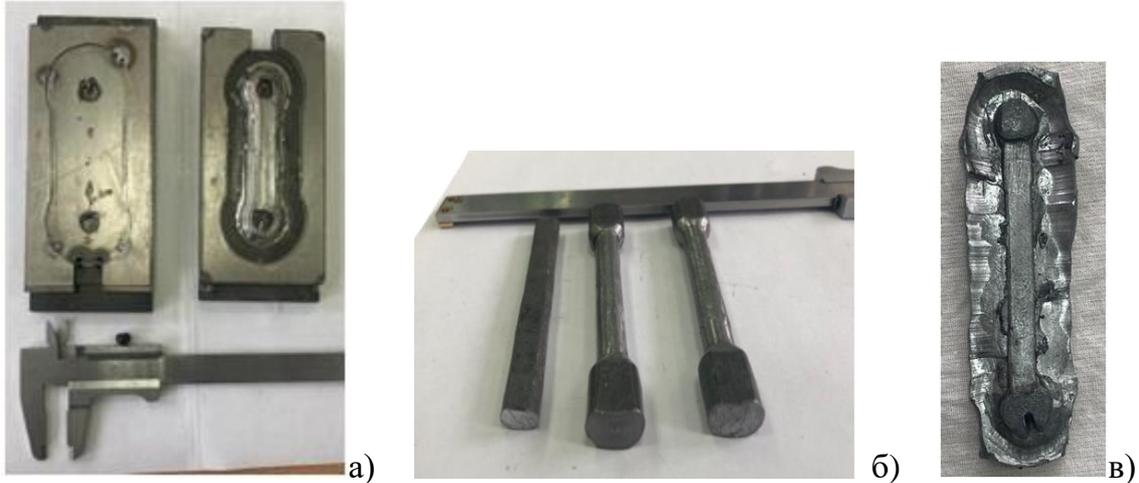


Рисунок 9 – Результаты физического моделирования: а – модельный штамп; б – профилированные заготовки; в – поковка с облоем

Полученные экспериментальные данные с использованием универсального комплекса на базе испытательной машины INSTRON 3500 КРХ силой 3500 кН по нагрузке и перемещению верхней части штампа во время процесса штамповки легли в основу построения соответствующих графических зависимостей. Установлена зависимость изменения силовых характеристик деформирования от перемещения ударной массы, характер изменения силы показан на рисунке 10 для заготовок из свинца, использованного в качестве модельного материала.

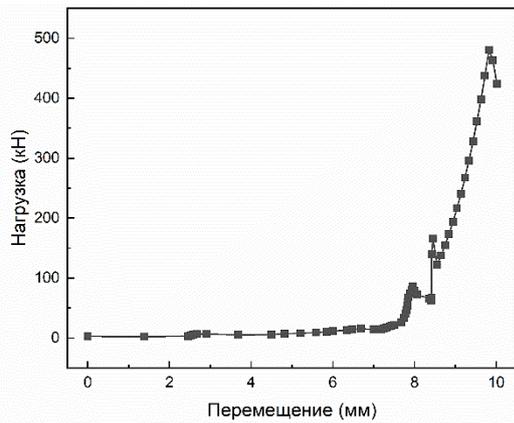


Рисунок 10 – Зависимость нагрузки от перемещения верхнего штампа

Исследования по качеству заполнения ручья штампа проведены на молоте вертикальной компоновки МА4129 с пневматическим приводом. Отметим, что энергия удара у этого оборудования в 2,7 раза меньше, чем у горизонтального молота ГШМ-4, на который были ориентированы разработанные технологические процессы ГОШ. Численными и физическими экспериментами доказано, что ручей штампа заполняется за один удар на пневматическом молоте с меньшей энергией удара, а значит, не будет сомнений, что те же технологические процессы могут быть реализованы также за один удар на импакторе с заведомо большей энергией удара.

**Глава 5** посвящена математической формулировке задачи пластического течения в тонком слое. Поставленная краевая задача решается методом характеристик, в котором линии скольжения  $\alpha, \beta$  выбраны так, чтобы векторы  $\frac{\partial r}{\partial \alpha}, \frac{\partial r}{\partial \beta}$  были ортогональны, поэтому  $\alpha$  и  $\beta$  будут являться ортогональными криволинейными координатами поверхности инструмента  $F(x, y, z) = 0$ . Коэффициенты первой квадратичной формы  $A$  и  $B$  и главные радиусы кривизны  $R_1$  и  $R_2$  должны удовлетворять уравнениям Гаусса – Кодацци:

$$\begin{aligned} A \frac{\partial}{\partial \beta} \left( \frac{1}{R_1} \right) + \frac{\partial A}{\partial \beta} \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) &= 0, \\ B \frac{\partial}{\partial \alpha} \left( \frac{1}{R_2} \right) + \frac{\partial B}{\partial \alpha} \left( \frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right) &= 0, \quad (1) \\ \frac{AB}{R_1 R_2} + \frac{\partial}{\partial \alpha} \left( \frac{1}{A} \frac{\partial B}{\partial \alpha} \right) + \frac{\partial}{\partial \beta} \left( \frac{1}{B} \frac{\partial A}{\partial \beta} \right) &= 0. \end{aligned}$$

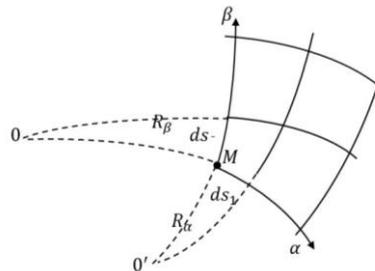


Рисунок 11 – Сетка ортогональных линий скольжения, где линии  $\alpha$  и  $\beta$  взяты за криволинейные оси координат

Поскольку радиусы кривизны линий  $\alpha$  и  $\beta$  удовлетворяют соотношениям:

$$\frac{ds_1}{R_\alpha} = \frac{\partial(ds_1)}{\partial \beta} \frac{\partial \beta}{\partial s_2}, \quad \frac{ds_2}{R_\beta} = \frac{\partial(ds_2)}{\partial \alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial s_1}, \quad (2)$$

находим радиусы кривизн линий  $\alpha, \beta$ :

$$\frac{1}{R_\alpha} = \frac{1}{AB} \frac{\partial A}{\partial \beta}, \quad \frac{1}{R_\beta} = \frac{1}{AB} \frac{\partial B}{\partial \alpha}. \quad (3)$$

Для описания процесса течения в тонком слое пластического материала примем следующие кинематические гипотезы:

- скорости физических частиц пластического вещества, расположенных на общей нормали к поверхности  $F$ , мало отличаются между собой и могут считаться одинаковыми;

- скорости деформации частиц, расположенных на общей нормали к поверхности  $F$ , в направлении этой нормали мало отличаются между собой и равны средней скорости деформации толщины слоя;

- средние по толщине значения отношения скоростей деформации к их интенсивности с точностью до множителя, близкого к единице, равны отношению средних по толщине скоростей деформации к их интенсивности.

Значительного упрощения системы дифференциальных уравнений можно добиться, вводя следующие динамические гипотезы:

- принимаем условие полной пластичности, которое предполагает равенство нулю касательных напряжений и в тоже время нормальные напряжения вдоль линий  $\alpha$  и  $\beta$  с точностью до величины  $\frac{h}{L}$  ( $h$  – толщина слоя;  $L$  – длина заготовки) в сравнении с единицей равны между собой. Третье главное нормальное напряжение равно среднему давлению  $-p$  в слое и находится из условия пластичности Мизеса:  $\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_1 + p = \sigma_s$  ( $\sigma_s$  – напряжение текучести).

Обозначим через  $u(\alpha, \beta, t)$  и  $v(\alpha, \beta, t)$  эйлеровы компоненты скорости частиц вдоль линий  $\alpha$  и  $\beta$  соответственно, тогда скорости деформаций выразятся формулами:

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_{\alpha\alpha} = \dot{\epsilon}_1 &= \frac{1}{A} \frac{\partial u}{\partial \alpha} + \frac{v}{AB} \frac{\partial A}{\partial \beta}, & \dot{\epsilon}_{\beta\beta} = \dot{\epsilon}_2 &= \frac{1}{B} \frac{\partial v}{\partial \beta} + \frac{u}{AB} \frac{\partial B}{\partial \alpha}, \\ \dot{\gamma}_{\alpha\beta} = \dot{\epsilon}_{12} &= \frac{1}{B} \frac{\partial u}{\partial \beta} + \frac{1}{A} \frac{\partial v}{\partial \alpha} - \frac{u}{AB} \frac{\partial A}{\partial \beta} - \frac{v}{AB} \frac{\partial B}{\partial \alpha} \end{aligned} \quad (4)$$

Скорость деформации волокна, расположенного вдоль нормали, есть средняя скорость относительного изменения толщины слоя:

$$\dot{\epsilon}_{zz} = \dot{\epsilon}_3 = \frac{1}{h} \left( \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{u}{A} \frac{\partial h}{\partial \alpha} + \frac{v}{B} \frac{\partial h}{\partial \beta} \right) = \frac{1}{h} \frac{dh}{dt} = \frac{d \ln h}{dt}. \quad (5)$$

Поскольку мы рассматриваем здесь только процессы активной пластической деформации, причем в основном монотонные, за степень деформации естественно принять функцию, полная производная по времени от которой равна интенсивности скоростей деформации, т.е. определить степень деформации  $\lambda(\alpha, \beta, t)$  уравнением:

$$\frac{\partial \lambda}{\partial t} + \frac{u}{A} \frac{\partial \lambda}{\partial \alpha} + \frac{v}{B} \frac{\partial \lambda}{\partial \beta} = \dot{\epsilon}_i. \quad (6)$$

Воспользовавшись связью напряжений и скоростей деформаций, найдем главные напряжения:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma + \frac{2\delta \sigma_s}{3 \dot{\epsilon}_i} \dot{\epsilon}_1, & \sigma_3 &= \sigma + \frac{2\delta \sigma_s}{3 \dot{\epsilon}_i} \dot{\epsilon}_3, \\ \sigma_2 &= \sigma + \frac{2\delta \sigma_s}{3 \dot{\epsilon}_i} \dot{\epsilon}_2, & \sigma_{12} &= \frac{\delta \sigma_s}{3 \dot{\epsilon}_i} \dot{\epsilon}_{12}, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $\sigma$  – среднее напряжение, являющееся неизвестной функцией  $(\alpha, \beta, t)$ , и  $\delta$  – постоянный числовой множитель порядка единицы: если одно или оба тела, ограничивающие течение пластического материала, отсутствуют, то  $\delta = 1$ ; в противном случае  $\frac{\pi}{4} \leq \delta \leq 1$ .

Условие несжимаемости на основании (4) и (5) запишется в главной системе координат:

$$\dot{\epsilon}_1 + \dot{\epsilon}_2 + \dot{\epsilon}_3 = 0 \quad (8)$$

или

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{AB} \frac{\partial}{\partial \alpha} (hBu) + \frac{1}{AB} \frac{\partial}{\partial \beta} (hAv) = 0. \quad (9)$$

Интенсивность скоростей деформаций при условии (8) равна:

$$\dot{\epsilon}_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\dot{\epsilon}_1^2 + \dot{\epsilon}_1 \dot{\epsilon}_2 + \dot{\epsilon}_2^2 + \frac{1}{4} \dot{\epsilon}_{12}^2} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\dot{\epsilon}_2^2 + \dot{\epsilon}_2 \dot{\epsilon}_3 + \dot{\epsilon}_3^2 + \frac{1}{4} \dot{\epsilon}_{12}^2}. \quad (10)$$

Направление вектора касательного напряжения, вызванного силами контактного трения, противоположно направлениям относительных скоростей скольжения, тогда условия сохранения импульсов, действующих на элемент объема слоя  $\rho h A d\alpha B d\beta$ , описывается уравнениями:

$$\begin{aligned} \rho g_\alpha + \frac{\partial p}{A \partial \alpha} &= -\frac{2\tau_s}{h} \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}} \frac{\partial p}{B \partial \beta} = -\frac{2\tau_s}{h} \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}}; \\ \rho g_\beta + \frac{\partial p}{B \partial \beta} &= -\frac{2\tau_s}{h} \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}} \frac{\partial p}{A \partial \alpha} = -\frac{2\tau_s}{h} \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}}, \end{aligned} \quad (11)$$

где  $\rho$  – плотность деформируемого металла;  $g_\alpha, g_\beta$  - ускорения вдоль направлений  $\alpha$  и  $\beta$ ;  $\tau_s$  - равно пределу текучести материала на сдвиг.

Квазистатическое нагружение деформируемого тонкого слоя позволяет пренебречь силами инерции, тогда для контактного давления получаем уравнение, независящее от компонент скоростей течения:

$$\left(\frac{\partial p}{A \partial \alpha}\right)^2 + \left(\frac{\partial p}{B \partial \beta}\right)^2 = \frac{4\tau_s^2}{h^2}. \quad (12)$$

В частном случае, когда течение слоя происходит под действием параллельных плоскостей штампового инструмента,  $A d\alpha = dx$ ,  $B d\beta = dy$  и уравнение (12) преобразуется к виду:

$$\left(\frac{\partial p}{dx}\right)^2 + \left(\frac{\partial p}{dy}\right)^2 = \frac{4\tau_s^2}{h^2}. \quad (13)$$

Выпишем граничные условия задачи. На краю облойного мостика контактное давление  $p = p'_0$ , где  $p_0$  находится из условия, что течение в районе облойного мостика происходит по тем же законам течения по недеформируемым плоскостям тонкого слоя толщиной  $h_1$  ( $h_1$  – высота облойного мостика). На выходе металла в зону магазина при  $x=b$  граничным условием будет  $p' = \sigma_s$  ( $b$  – ширина облойного мостика). Тогда для давления в щели имеем уравнение:

$$\frac{\partial p'}{\partial x} = -\frac{2\tau_s}{h_1}. \quad (14)$$

Интегрируем (14) с учетом граничного условия и получаем решение задачи в виде:

$$p' = \sigma_s + \frac{2\tau_s}{h_1}(b - x). \quad (15)$$

Следовательно, давление на входе в облойный мостик будет:

$$p'_0 = p'|_{x=0} = \sigma_s + \frac{2\tau_s}{h_1}b = \sigma_s \left[1 + \frac{2b}{\sqrt{3}h_1}\right]. \quad (16)$$

Из уравнения (16) следует, что, если  $b \sim h_1$ , то  $p'_0 \sim 2\sigma_s$ .

Если вместо функции давления  $p$  ввести новую функцию в соответствии с уравнением:

$$z = \frac{h}{2\tau_s} \left(p - \sigma_s - \frac{2b}{\sqrt{3}h_1} \sigma_s\right), \quad (17)$$

которая удовлетворяет уравнению:

$$\left(\frac{\partial z}{dx}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{dy}\right)^2 = 1 \quad (18)$$

и краевому условию  $z=0$  на границе области  $G$ , то уравнение (18) с приведенным краевым условием указывает на существование аналогии между задачами течения и определения формы насыпи однородного песка.

Подобрав однородный мелкодисперсный песок с теоретически одинаковым коэффициентом внутреннего трения  $\nu$ , насыпать его на горизонтально расположенную форму, контур которой совпадает с контуром области течения, то в результате образуется определенной формы предельная насыпь, ордината которой  $\zeta$  будет удовлетворять уравнению:

$$\left(\frac{\partial \zeta}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \zeta}{\partial y}\right)^2 = \nu^2 \quad (19)$$

и однородному граничному условию  $\zeta|_G = 0$ .

Предельная насыпь характерна тем, что угол наклона ее образующей к горизонту есть величина постоянная и равная  $\varphi$ , причем  $\operatorname{tg} \varphi = \nu$ . Отсюда следует, что образуемая насыпью поверхность линейчатая, содержащая прямолинейные образующие. Если ввести функцию  $\frac{\zeta}{\nu}$ , то видно, что она совпадает с функцией  $z$ , поскольку тождественны уравнения и граничные условия, которым эти функции удовлетворяют. Поэтому имеем уравнение:

$$p = \sigma_s \left[ 1 + \frac{2l}{\sqrt{3}\delta} \right] + \frac{\zeta}{\nu} \frac{2\tau_s}{h}. \quad (20)$$

Подобрав песок, чтобы величина его коэффициента  $\nu$  численно совпадала со значением отношения  $\frac{2\tau_s}{h}$ , функция давления выразится:

$$p = \sigma_s \left( 1 + \frac{2l}{\sqrt{3}\delta} \right) + \zeta. \quad (21)$$

Если по контуру плоской модели гаечного ключа выполнить вертикальный борт высотой  $\sigma_s \left( 1 + \frac{2l}{\sqrt{3}\delta} \right)$ , то ордината такой насыпи  $\zeta$  будет совпадать с функцией давления  $p$ , и для них справедливы одинаковые математические постановки задачи.

Для аналогового моделирования была изготовлена 3D печатью из пластмассы поверхностная модель в масштабе 1:1, соответствующая в плане контуру формы поковки гаечного ключа 4×5, которая показана на рисунке 12а. После заполнения формы песком получена предельная насыпь, геометрические параметры которой представлены на рисунке 12б.

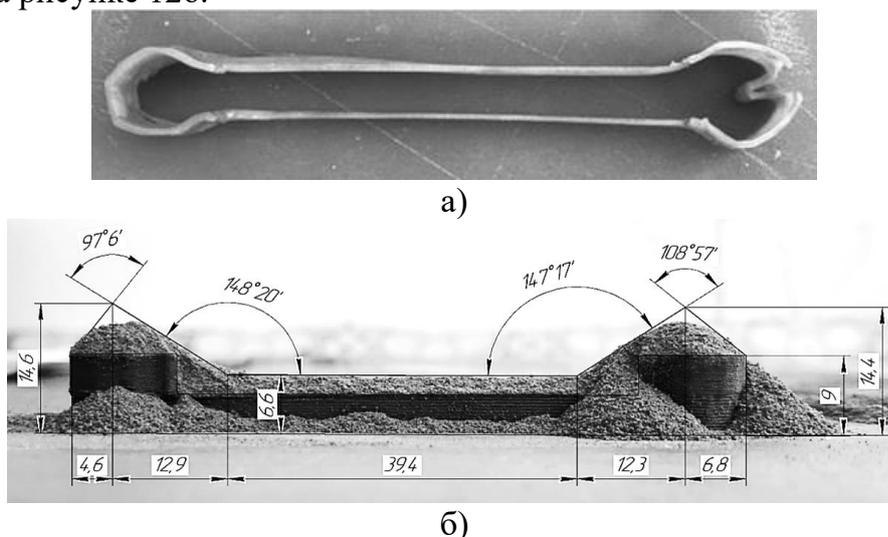


Рисунок 12 – Предельная насыпь песчаной аналогии

Из общей системы уравнений получаем соотношения для распределения контактного давления по плоскости заготовки, согласно которым пространственная эпюра контактных давлений представляет собой поверхность одинакового ската, все

образующие которой наклонены к плоскости контакта под одинаковым углом  $\varphi$ , называемым углом естественного скоса. Проекции гребней этой поверхности на плоскость контакта являются линиями раздела течения металла, а проекции линий ската – линиями тока. В силу описанных допущений эта теория дает приближенную картину течения металла, однако весьма удобна для анализа схемы течения металла, когда необходимо получить, наряду с количественными и качественные характеристики процесса течения.

По песчаной насыпи (см. рисунок 12) определяем границу раздела течения металла на характерных участках поковки, т.е. геометрическое место точек наибольшего давления (ребро давления). Сила  $Q$ , необходимая для осуществления процесса течения и являющаяся функцией толщины поковки, выражается:

$$Q = \sigma_s d^2 \left( 1 + \frac{2l}{\sqrt{3}\delta} + \frac{d}{3\sqrt{3}h} \right), \quad (22)$$

где  $d$  – длина паза,  $\delta$  – ширина паза,  $l$  – глубина паза,  $h$  – конечная толщина поковки,  $\sigma_s = 24$  МПа – предел текучести стали 40Х при температуре металла 1100°С в конце удара.

Разделим поковку гаечного ключа на несколько разных областей, для которых течение металла будет отличаться ввиду особенностей геометрии этих участков (рисунок 13). По формуле (22) определим силу в разных зонах. Общая сила равна сумме сил в разных областях, на которые условно разбита поковка. Характерные области представлены сложными фигурами (рисунок 13).

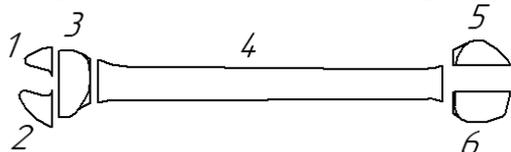


Рисунок 13 – Разбиение проекции контура поковки на характерные участки

Для упрощения вычислений площадей и объемов насыпи каждой из зон, их можно представить более простыми геометрическими фигурами, при условии, что площади проекций и объемы участков предельной насыпи будут равны реальным значениям рассматриваемых областей гаечного ключа. Расчеты объемов и площадей проведены, используя модели, разработанные в ПО КОМПАС-3D, что позволило с достаточной точностью рассчитать параметры сложных фигур. В качестве примера приведем расчет силы (22) по предельной насыпи зоны 1.

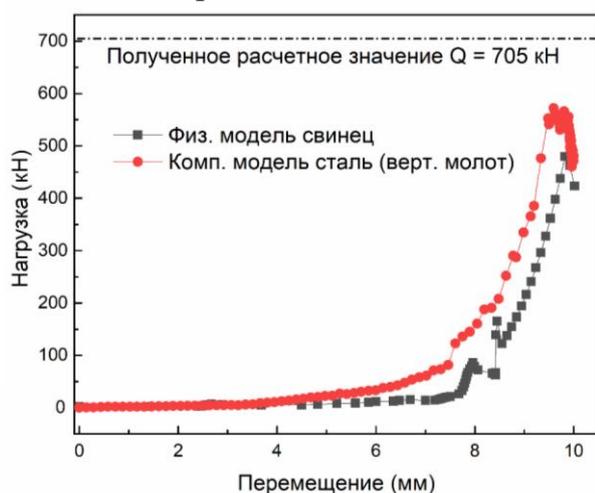


Рисунок 14 - Сравнение результатов моделирования и физического эксперимента: ● – компьютерное моделирование горячей штамповки стали 40Х; ■ – физический эксперимент на модельном материале свинец С0; - - - - метод песчаной аналогии

Параметры для расчета силы следующие:  $d = 4,1$  мм,  $\delta = 3,4$  мм,  $l = 3,25$  мм,  $h = 6,5$  мм,  $\sigma_s = 24$  МПа. Необходимо перевести все величины в Международную систему физических величин СИ, то есть мм в м:

$$Q_1 = 24 * 0,0041^2 \left( 1 + \frac{2 * 0,00325}{\sqrt{3} * 0,0034} + \frac{0,0041}{3\sqrt{3} * 0,00065} \right) = 0,0008977 \text{ (МПа * м}^2\text{)}$$
$$= 897,7 \text{ Н.}$$

После расчета всех участков поковки получим общую силу  $Q$ , необходимую для осуществления процесса течения и являющуюся функцией толщины участков поковки:

$$Q = \sum Q_i = 897,7 + 1368,3 + 901,2 + 694237,8 + 3457,7 + 4045 = 704907 \text{ Н} = 705 \text{ кН.}$$

На рисунке 14 представлены графики по данным, полученным компьютерным моделированием и физическим экспериментом. Пунктирной линией, параллельной оси абсцисс, отмечено расчетное значение силы  $Q$ , полученное методом аналогии с песчаной насыпью, который дает завышенные результаты, т.е. являются верхней оценкой силовых параметров, что объясняется необходимостью соблюдения ряда известных допущений, огрубляющих математическую модель.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные теоретические, технические и технологические решения и разработки, направленные на совершенствование технологических процессов горячей объемной штамповки поковок гаечных ключей, ориентированных на использование специализированного кузнечно-штамповочного оборудования – импакторов, которое заключается в уменьшении затрат энергии за счет уменьшения температуры и времени нагрева заготовок. Реализация новых вариантов технологии ГОШ обеспечит загрузку молотов горизонтальной компоновки и повысит производительность за счет штамповки за один удар молота, что имеет существенное значение для развития машиностроения.

1. Для сокращения времени контакта нагретой заготовки со штампом целесообразно использовать молот со встречным движением ударных масс горизонтальной компоновки (импактор), что исключает контакт нагретой заготовки со штампом перед ударом. Другим немаловажным аспектом является подбор номенклатуры поковок для загрузки этого перспективного кузнечно-штамповочного оборудования.

2. По стандартной методике разработан чертеж поковки, которая включает построение эпюры средних диаметров и эпюры сечений, необходимых для расчетов средних размеров исходной заготовки. Для имитации формы заготовки после заготовительных переходов следует воспользоваться формой эпюры диаметров.

3. Научно обоснованы и разработаны 6 вариантов технологических процессов ГОШ поковок гаечного ключа с учетом специфики конструктивного исполнения импактора. Техническая новизна 4-х из них защищена патентами РФ на изобретения. Дополнительно обоснован и разработан вариант технологии штамповки штучной заготовки на ковочном молоте с пневматическим приводом вертикальной компоновки с целью проведения экспериментов. С применением комплекса графического проектирования выполнены 3D модели и чертежи половин штампа для молота МА4129. Обосновано изменение размеров облойной канавки, конструкция которой вошла в проект штампа.

4. Показано, что число конечных элементов влияет на изменение эффективных напряжений; для заготовки с малым числом ячеек повторяемость формы ручья штампа практически отсутствует (размывается контур поковки), что не дает полной картины кинематики течения при выполнении операции штамповки; при малых (6727) и

средних (21581) количествах элементов сетки зависимость температуры от времени носит нелинейный характер. В процессе имитационного моделирования установлена степень влияния температуры заготовки и штампов на технологические параметры ГОШ и на заполняемость ручья штампа, рекомендованы рациональные значения температур для заготовки из стали 40Х (950°С) и для штампа из стали 5ХНМ (300°С) с коэффициентом заполнения облойной канавки 0,4, а также обоснована возможность деформирования заготовок рациональных форм и размеров за один удар импактора.

5. Эксперименты по физическому моделированию предлагаемой технологии ГОШ поковки гаечного ключа выбранного типоразмера 4×5, показали удовлетворительное схождение с результатами численного моделирования с помощью 3D моделей силовых характеристик деформирования при отклонениях, связанных с разницей деформируемых материалов, что касается геометрических параметров формообразования при заполнении гравюры штампа, то гипотезы относительно траекторий и линий раздела течения подтверждаются совпадением по стадиям деформирования с результатами компьютерного моделирования с приемлемой для инженерных расчетов точностью.

6. С помощью метода характеристик теории пластичности проанализирована математическая формулировка краевой задачи нестационарного пластического течения в тонком слое с заданными границами, т.е. для поковки, имеющей сложную индивидуальную форму, и с помощью графо-аналитического метода аналогии с песчаной насыпью решена краевая задача по определению контактного давления и силовых параметров ГОШ поковки гаечного ключа 4×5. Аналитические зависимости для определения давления на поверхностях контакта деформируемого металла и штампового инструмента, а также интегральные уравнения для оценки сил деформирования получены с использованием теории течения в тонком слое. Однако следует отметить, что этот метод дает завышенные результаты, сравнимые с верхней оценкой силовых параметров, что объясняется необходимостью соблюдения ряда известных допущений, огрубляющих математическую модель.

7. Разработанные новые технологические процессы ГОШ, полученные при исследовании результаты теоретического анализа течения плоского слоя и численного решения краевых задач механики деформируемого твердого тела, а также результаты экспериментальных исследований могут быть после обобщения распространены на другие типоразмеры поволоков гаечных ключей при условии выбора соответствующего по характеристикам кузнечно-штамповочного оборудования.

8. Разработанные варианты технологического процесса ГОШ переданы для использования на промышленные предприятия, в кузнечных цехах которых используется штамповка на молотах, что отражено в Акте об использовании результатов диссертационной работы, размещенном в приложении. Отдельные результаты работы, обладающие научной новизной, использованы в учебном процессе при чтении лекций по дисциплинам: «Теория обработки металлов давлением», «Современные технологии обработки в машиностроении», «Специализированное оборудование для инновационных процессов обработки давлением», «Технология производства кузнечно-штамповочного оборудования и штамповой оснастки» в ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», что подтверждается Актом использования в учебном процессе.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В ПУБЛИКАЦИЯХ

*В ведущих рецензируемых научно-технических журналах, включенных ВАК РФ в Перечень изданий, рекомендуемых для опубликования основных научных результатов диссертаций:*

1. Сосенушкин, Е.Н. Развитие теории течения пластически деформируемого слоя / Е.Н. Сосенушкин, В.А. Кадымов, Е.А. Яновская, А.А. Архипов, Т.В. Гуреева, Д.С. Гусев, М.В. Прокин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. №5. С. 131–138.

2. Гусев Д.С. Моделирование горячей объемной штамповки поковки гаечного ключа на импакторе / Д.С. Гусев, Е.Н. Сосенушкин // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2021. № 2(57). С. 76–81.

3. Гусев Д.С. Обоснование выбора формы полуфабриката для штамповки поковки гаечного ключа на молоте / Д.С. Гусев, Е.Н. Сосенушкин, С.А. Рогулин // Заготовительные производства в машиностроении. 2023. Т. 21, № 4. С. 158–163.

### *Патенты:*

4. Пат. 2781825С1 Российская Федерация, МПК В21К5/16. Способ изготовления гаечных ключей пластическим деформированием [текст] / Сосенушкин Е.Н., Сосенушкин А.Е., Кадымов В.А., Яновская Е.А., Гусев Д.С., Рогулин С.А., Хохлова Н.Г.; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН». – № 2021136351; заявл. 09.12.2021; опубли. 18.10.2022, бюл. N 29.

5. Пат. 2781826С1 Российская Федерация, МПК В21К5/16. Способ штамповки гаечных ключей [текст] / Сосенушкин Е.Н., Сосенушкин А.Е., Кадымов В.А., Яновская Е.А., Гусев Д.С., Рогулин С.А., Хохлова Н.Г.; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН». – № 2021136348; заявл. 09.12.2021; опубли. 18.10.2022, бюл. N 29.

6. Пат. 2784307С1 Российская Федерация, МПК В21К5/16. Способ изготовления гаечных ключей пластическим деформированием [текст] / Сосенушкин Е.Н., Сосенушкин А.Е., Кадымов В.А., Яновская Е.А., Гусев Д.С., Шарыкин М.В., Хохлова Н.Г.; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН». – № 2021136355; заявл. 09.12.2021; опубли. 23.11.2022, бюл. N 33.

7. Пат. 2784309С1 Российская Федерация, МПК В21К5/16. Способ штамповки гаечных ключей [текст] / Сосенушкин Е.Н., Сосенушкин А.Е., Кадымов В.А., Яновская Е.А., Гусев Д.С., Шарыкин М.В., Хохлова Н.Г.; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН». – № 2021136354; заявл. 09.12.2021; опубли. 23.11.2022, бюл. N 33.

### *В других рецензируемых научных изданиях:*

8. Сосенушкин, Е.Н. Математическая модель свободного затекания металла в ребра жесткости при выдавливании плоских поковок / Е.Н. Сосенушкин, Д.С. Гусев, А.А. Архипов // Материалы всероссийской научно-практической конференции «Цифровая экономика: оборудование, управление, человеческий капитал». – Вологда: ООО «Маркер», 2018. – С. 89–91.

9. Сосенушкин, Е.Н. Математическое моделирование затекания пластически деформируемого слоя в ребра / Е.Н. Сосенушкин, В.А. Кадымов, Е.А. Яновская, А.А. Архипов, Т.В. Гуреева, **Д.С. Гусев** [и др.] // Теоретическая и прикладная механика [Электронный ресурс]: международный научно-технический сборник / Белорусский национальный технический университет ; редкол.: А.В. Чигарев (пред. редкол.). – Минск: БНТУ, 2019. – Вып. 34. – С. 184–189.

10. Сосенушкин, Е.Н. Математическая модель штамповки фланца с выдавливанием ребер / Е.Н. Сосенушкин, В.А. Кадымов, Е.А. Яновская, **Д.С. Гусев**, М.В. Прокин, А.А. Архипов, Т.В. Гуреева // Сб. научных статей и докладов «Состояние и перспективы развития отечественных технологий обработки металлов давлением и оборудования кузнечно-прессового машиностроения». – Рязань: ОАО «Тяжпрессмаш», 2019. – С. 341–349.

11. Сосенушкин Е.Н. Математическое моделирование течения металла по плоскостям со свободным затеканием в ребра / Е.Н. Сосенушкин, В.А. Кадымов, Е.А. Яновская, А.А. Архипов, Т.В. Гуреева, **Д.С. Гусев** // Станкостроение и инновационное машиностроение. Проблемы и точки роста: Материалы Всероссийской научно-технической конференции, Уфа, 2019. – С. 337–342.

12. Сосенушкин Е.Н. Моделирование горячей штамповки поковки гаечного ключа на импакторе / Е.Н. Сосенушкин, **Д.С. Гусев** // Актуальные проблемы науки и техники. 2021: Материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции. Ростов-на-Дону, 2021. – С. 926–928.

*Научное издание*

**Гусев Дмитрий Сергеевич**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГОРЯЧЕЙ ОБЪЕМНОЙ  
ШТАМПОВКИ ПОКОВОК С ТОНКИМИ ПОЛОТНАМИ**

*Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук*

*Подписано в печать*