

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Московский государственный технологический  
университет «СТАНКИН»

*На правах рукописи*



**Гусев Дмитрий Сергеевич**

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

Специальность 2.5.7 – Технологии и машины обработки  
давлением

**Диссертация**

на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор,  
«Заслуженный работник высшей школы РФ»  
Сосенушкин Евгений Николаевич

Москва 2024

## Оглавление

Оглавление .....	3
Введение.....	6
Глава 1. Анализ состояния разработок в области штамповки поковок с тонкими полотнами.....	15
1.1 Пути совершенствования кузнечно-штамповочного производства ....	15
1.2 Технологические особенности получения тонкополотных поковок... 16	
1.2.1 Технологические процессы изготовления тонкополотных поковок типа «гаечный ключ».....	19
1.2.2 Выбор оборудования для изготовления поковок.....	28
1.3 Процессы пластического течения в тонком слое металла.....	32
1.4 Контактное трение .....	44
1.5 Методы расчета напряженно-деформированного состояния.....	47
1.6 Компьютерное моделирование технологических процессов обработки металлов давлением .....	50
1.6.1 Влияние температуры нагрева заготовки на технологические параметры штамповки.....	52
1.6.2 Обзор возможностей программных комплексов, основанных на методе конечных элементов .....	53
1.6.3 Компьютерное моделирование картины течения металла .....	54
1.7 Выводы по главе 1 .....	55
Глава 2. Проектирование новых вариантов технологических процессов горячей объемной штамповки тонкополотных поковок на примере гаечных ключей с учетом специфики их реализации на импакторе .....	56
2.1 Выбор детали представителя .....	56
2.2 Проектирование чертежа поковки .....	57
2.3 Определение параметров заготовки для ГОШ .....	59
2.4 Новые способы штамповки тонкополотных поковок на примере гаечного ключа на горизонтальном молоте .....	65

2.4.1 Использование предварительного профилирования длинномерных непрерывных заготовок перед окончательной штамповкой .....	65
2.4.2 Особенности технологии изготовления гаечного ключа 4×5 на вертикальном молоте .....	81
2.5 Выводы по главе 2 .....	86
Глава 3. Компьютерное моделирование предложенных технологии горячей объемной штамповки тонкополотных поковок .....	87
3.1 Программное обеспечение и входные параметры для численного моделирования .....	87
3.1.1 Условия теплопередачи и граничные условия .....	88
3.1.2 Энергетические параметры оборудования .....	90
3.2 Результаты моделирования НДС и силовых параметров за один цикл штамповки.....	92
3.2.1 Влияние размера ячеек сетки КЭ и числа узлов на точность представляемых результатов .....	92
3.2.2 Влияние температуры заготовки и штампа на технологические параметры процесса и заполняемость ручья штампа.....	96
3.2.3 Выбор формы и размеров заготовки и температурных параметров штамповки.....	101
3.3 Оценка возможности использования вертикального молота с пневматическим приводом.....	104
3.3.1 Горячая штамповка Z-образной заготовки.....	109
3.3.2 Сравнение эффективности предлагаемых технологий .....	113
3.4 Выводы по главе 3 .....	121
Глава 4. Экспериментальные исследования технологии горячей объемной штамповки поковки гаечного ключа.....	123
4.1 Физическое моделирование .....	123
4.2 Изготовление модельной штамповой оснастки.....	125
4.3 Постановка и проведение экспериментальной штамповки.....	127

4.4 Выводы по главе 4 .....	134
Глава 5. Песчаная аналогия в процессах нестационарного течения тонкого пластического слоя металла .....	135
5.1 Постановка краевой задачи.....	135
5.2 Гипотезы и допущения.....	137
5.3 Решение краевой задачи.....	141
5.3.1 Метод песчаной аналогии .....	143
5.3.2 Постановка эксперимента для песчаной аналогии.....	144
5.3.3 Расчет силовых параметров .....	146
5.4 Выводы по главе 5 .....	149
Заключение .....	151
Список использованных источников .....	154
Приложение А Чертежи штампа для молота МА4129 .....	175
Приложение Б Акты.....	177
Приложение В Патенты.....	179

## Введение

**Актуальность темы исследования.** В современном обществе кузнечно-штамповочное производство (КШП) задействовано во многих отраслях промышленного производства, таких как строительство, машиностроение, сельскохозяйственная техника, автомобилестроение, нефтепромысловое оборудование, транспорт и многое другое.

Технологические процессы обработки металлов давлением 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. Для повышения технологичности и снижения стоимости поковок стремятся использовать новые способы формообразования, ведь расчет технологии штамповки имеет свои сложности. Отличия штампованных поковок по различным параметрам формы указывает на необходимость деления на группы [114, 122, 140]: одной из которых являются поковки, удлиненные в плане с тонким полотном [20, 130].

Группы поковок с тонкими полотнами или с высокими ребрами жесткости [24] пополняются 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.

Волжский автозавод изготавливает тонкополотные поковки в

количестве примерно 13% от всей номенклатуры производства изделий и практически треть поковок без учета катаных заготовок от всей массы производства изделий завода [155].

Специфика технологий горячей объемной штамповки состоит в том, что поковки удлиненной формы, имеющие сравнительно тонкие протяженные элементы в виде полотен, требуют при формоизменении приложения удельной нагрузки, в 20-30 раз превосходящую предел текучести штампуемого материала, это обстоятельство влияет на стойкость штампов и экономичность штампованных изделий. Поэтому возникает необходимость наряду с применением типовых технологий и кузнечно-штамповочного оборудования, проектировать специализированное оборудование [18, 75, 81] и создавать ориентированные на него технологические процессы ГОШ.

**Степень разработанности темы исследования.** 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. [2], Артес А.Э. [6, 7], Богатов А.А. [16], Воронцов А.Л. [25], Гречников Ф.В. [42], Грешнов В.М. [43], Губкин С.И. [44, 45], Гун Г.Я. [46], Джонсон У. [49, 50], Дмитриев А.М. [51], Евстратов В.А. [52], Ильюшин А.А. [59 - 62], Кийко И.А. [68 - 72], Колмогоров В.Л. [74], Кудо Х. [49], Ланской Е.Н. [82], Малинин Н.Н. [84], Меллор П.Б. [50], Мещерин В.Т. [88], Надаи А. [90], Непершин Р.И. [93], Овчинников А.Г. [54, 94], Охрименко Я.М. [95], Полухин П.И. [163], Прандтль Л. [109], Работнов Ю.Н. [111], Рудской А.И. [116], Семенов Е.И. [120, 121], Соколовский В.В. [124], Сосенушкин Е.Н. [128 - 140, 177] Степанский Л.Г. [141], Сторожев М.В. [142, 143], Тарновский И.Я. [144, 145], Томленов А.Д. [149], Унксов Е.П. [151], Утяшев Ф.З. [152], Хилл Р. [154], Целиков А.И. [156], Шibaков В.Г. [159], Яковлев С.П. [28, 161, 162], Яковлев С.С. [161 - 163] и многие другие.

Контур деформируемой плоской поковки в процессе формообразования

зависит от положения границы раздела течения металла и направления линий тока. Как показали исследования [1, 79], наиболее приемлемой в этом случае является радиальная картина течения металла. В работе [125] рассмотрен аналитический подход к определению формы деформируемой плоской заготовки в процессах объемной штамповки. Для аналитического решения краевых задач теории пластичности А.А. Ильюшиным [1, 62] создан упрощенный вариант теории растекания сравнительно тонкого слоя пластического материала по плоскостям, что послужило толчком для новых исследований формообразования тонких удлиненных поковок с определением технологических параметров деформирования.

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

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

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 новых технологических процессов ГОШ поковок представителей с учетом специфики работы молотов горизонтальной компоновки.

3. Разработать новые цифровые математические модели заготовок, поковок и штампового инструмента для проведения имитационного моделирования и исследования вариантов разработанных технологических процессов ГОШ методом конечных элементов.

4. Выявить, по результатам моделирования, особенности кинематики течения металла при заполнении ручья штампа, установить зависимость сил деформирования от хода ударных масс, проанализировать напряженно-

деформированное состояние металла заготовки и распределение температуры по объему заготовки на этапах деформирования для обоснования технологических параметров и термомеханических режимов.

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

6. Поставить и провести экспериментальные исследования новых предложенных технологии ГОШ для подтверждения достоверности разработанных математических и компьютерных моделей.

**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 следующем.

1. В 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. В решении краевой задачи нестационарного течения тонкого пластического слоя по оценке давления на контактных поверхностях 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. В 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. В 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. В варианте штамповки из предварительно прокатанных заготовок необходимо остановиться на варианте с использованием длинномерной непрерывной заготовки, все формоизменяющие операции в котором реализуются при однократном нагреве заготовки.

**Теоретическая значимость работы** заключается в следующем.

1. По результатам имитационного моделирования получены 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 за счет теплового эффекта

деформации, что обезопасит штампуемый материал от перегрева.

2. Компьютерное моделирование вариантов технологии ГОШ позволило добиться нужных форм и размеров заготовок и необходимых температурных параметров для обеспечения эффективной штамповки гаечного ключа с наибольшим КИМ и заполнением ручья штампа за один удар молота.

**Практическая значимость работы** заключается в следующем.

1. Спроектирована поковка 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. 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 ключа 4×5 на вертикальном молоте МА4129 с уменьшением ширины мостика до 3,5 мм и уменьшением ширины магазина до 8,5 мм.

3. Проведен эксперимент по определению конфигурации линии раздела течения и суммарной силы с помощью аналогии с песчаной насыпью. По предельной насыпи определены ее геометрические характеристики, необходимые для построения эпюры давлений и расчета 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.** Теоретические положения ГОШ основаны на уравнениях теории нестационарного течения тонкого пластического слоя, а расчет контактных давлений и силовых параметров – на методе песчаной аналогии. Достоверность полученных результатов и однозначность их трактовки достигались обоснованностью начальных и граничных условий для решаемых задач.

Виртуальные эксперименты, построенные на численном методе конечных элементов и реализуемые в виде компьютерного моделирования, проведено на ЭВМ с использованием лицензионного программного обеспечения DEFORM 3D, ориентированного на исследование процессов обработки металлов давлением.

Физические эксперименты базировались на методике аналогового моделирования. Новые 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 с компьютерным управлением и обработкой экспериментальных данных и на ковочном пневматическом молоте модели MA4129.

### **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 получением аналитических зависимостей силовых параметров деформирования в соответствии с методом песчаной аналогии, что позволило определить 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** 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 зарекомендовавших себя и апробированных на практике теоретических методах механики сплошной среды.

Физические эксперименты поставлены и проведены на поверенном и снабженном необходимыми сертификатами испытательном оборудовании, а результаты получены с помощью современной регистрирующей аппаратуры, которые подтверждают удовлетворительное согласование с ними расчетных результатов, полученных аналитически, и результатов виртуальных исследований.

**Апробация работы.** Основные результаты исследования доложены и обсуждены на 4-х всероссийских и международной конференциях и симпозиумах:

«Цифровая экономика: оборудование, управление, человеческий капитал», Вологда, 25 декабря 2018 года;

«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.

По теме диссертации опубликовано 12 печатных работ, из них 3 – в журналах, рекомендованных Перечнем ВАК для опубликования основных результатов диссертаций, получено 4 патента на изобретения и 5 работ – в других рецензируемых изданиях.

**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 пунктам 1 «Закономерности деформирования материалов и повышения их качества при различных термомеханических режимах, установление оптимальных режимов обработки», 3 «Технологииковки, прессования, листовой и объемной штамповки и комплексных процессов с обработкой давлением, например, непрерывного литья и прокатки заготовок» и пункту 5 «Методы оценки напряженного и деформированного состояния и способы увеличения жесткости, прочности и стойкости штампового инструмента» паспорта научной специальности 2.5.7.

### **Структура и объем работы**

Работа изложена на 182 страницах машинописного текста, включает: введение, 5 глав, заключение, 91 рисунок, 12 таблиц, список литературы из 182 источника и приложение.

## **Глава 1. Анализ состояния разработок в области штамповки поковок с тонкими полотнами**

### **1.1 Пути совершенствования кузнечно-штамповочного производства**

Технологические процессы обработки металлов давлением с предварительным нагревом заготовок характеризуются высокой производительностью и коэффициентом использования металла, повторяемостью форм и размеров поковок. Однако они сопровождаются большими удельными силами деформирования и циклическим изменением температур, что может привести к выходу из строя штампов [76].

Горячая объемная штамповка на молотах остается популярной технологией для производства поковок из сталей и цветных сплавов в условиях как мелкосерийного, так и крупносерийного производства.

Отличия штампованных поковок по форме указывают на необходимость их объединения в группы [20, 24, 114, 122, 130, 140]. Группа поковок с тонкими полотнами или высокими ребрами жесткости становится сложнее из года в год. В эту группу входят различные детали, такие как инструменты, балансиры, детали рамы, рычаги и другие.

Для изготовления таких поковок требуется приложить большую силу, что может снизить стойкость и экономичность продукции. Поэтому возникает необходимость наряду с применением типовых технологий и кузнечно-штамповочного оборудования, проектировать специализированное оборудование и создавать ориентированные на него технологические процессы горячей объемной штамповки.

Изготовление, например, гаечных ключей методом штамповки производится в условиях массового производства. Для этой цели рекомендуется использовать импактор - молот с горизонтальным движением ударных масс. Молоты с паровоздушным приводом не считаются

экономически целесообразными.

Использование импакторов становится более рациональным при использовании заготовок, максимально приближенных к форме готовых поковок, полученных, например, на ковочных вальцах. Это позволяет сократить число ударов до одного.

При изготовлении гаечных ключей пластическим деформированием на импакторе необходимо использовать устройства для подачи заготовок, точно позиционировать и удерживать их до удара. В процессе горячей объемной штамповки можно использовать длинномерные профилированные заготовки из легированных сталей или разрабатывать штучные заготовки специальной геометрии.

В настоящее время кузнечно-штамповочное производство из года в год совершенствуется. На основе научно-обоснованных методов разрабатываются технологические процессы, внедряются полностью автоматизированные линии штамповки деталей и поковок, разрабатываются системы автоматизированного проектирования (САПР) [2, 82] и гибкого автоматизированного производства (ГАП) [7, 89]. Все это свидетельствует о перспективах и необходимости дальнейшего развития кузнечно-штамповочного производства.

## **1.2 Технологические особенности получения тонкополотных поковок**

Стальные заготовки могут быть изготовлены и обработаны с помощью различных процессов объемной штамповки. Среди широко применяемых способов объемной штамповки металлов преобладает горячая объемная штамповка в открытых штампах.

Для повышения точности и снижения металлоемкости поковок предпочтительна штамповка в закрытых штампах [160]. Однако она сопряжена с трудностями получения точных по объему заготовок. Такая



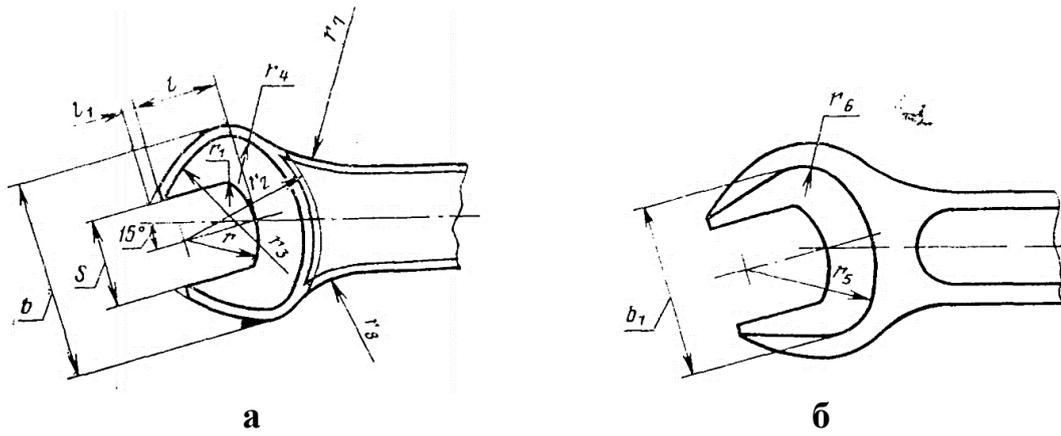


Рисунок 1.2 – Параметры головок гаечных ключей по ГОСТ 2839-80: а – с зевом  $S \leq 10$  мм, б – с зевом  $S > 10$  мм

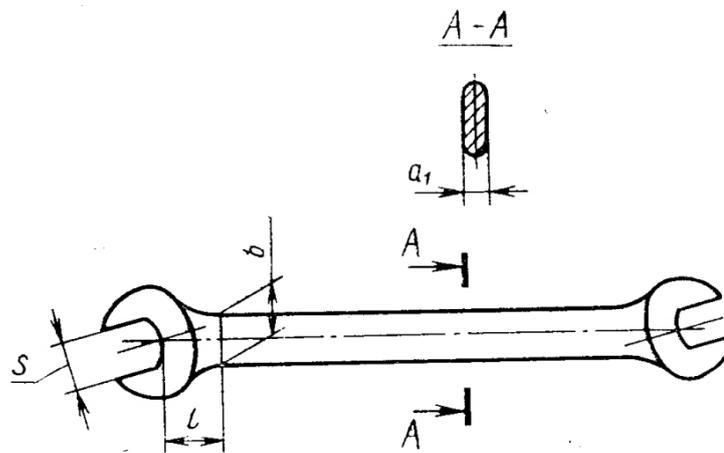


Рисунок 1.3 – Параметры сечений рукояток гаечных ключей по ГОСТ 2839-80 с зевом  $S \leq 10$

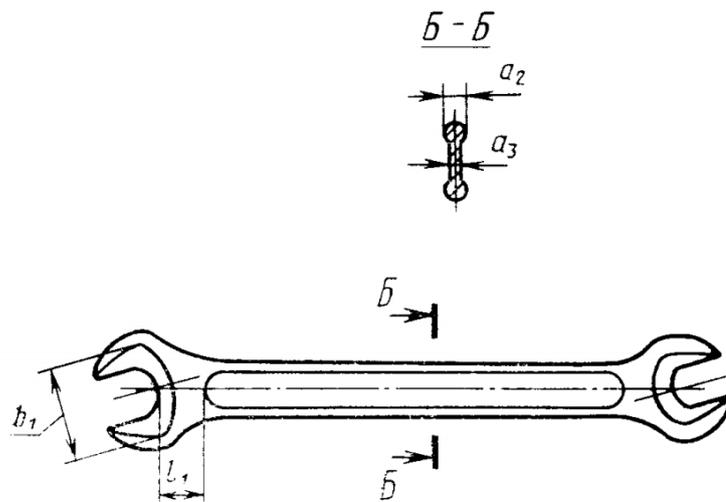


Рисунок 1.4 – Параметры сечений рукояток гаечных ключей по ГОСТ 2839-80 с зевом  $S > 10$

### 1.2.1 Технологические процессы изготовления тонкополотных поковок типа «гаечный ключ»

Чтобы проектировать эффективные технологические процессы и оставаться конкурентоспособными, производители поковок должны поддерживать качество продукта за счет снижения уровня брака, а также потерь металла в отход, уменьшения износа штамповой оснастки и увеличения срока ее службы, использования современных методов проектирования как поковок, так и процессов с помощью программного обеспечения для трехмерного параметрического проектирования, таких, например, как SolidWorks [4], также моделирования численным методом конечных элементов (МКЭ) [56, 119] и тесное сотрудничество с заказчиками при разработке будущих приложений [170].

Остановимся на одном из комбинированных способов пластического деформирования для изготовления поковок гаечных ключей с открытым зевом, описанном в работе [98], в которой ступенчатую заготовку получают поперечно-клиновой прокаткой при температуре полугорячего деформирования (рисунок 1.5).

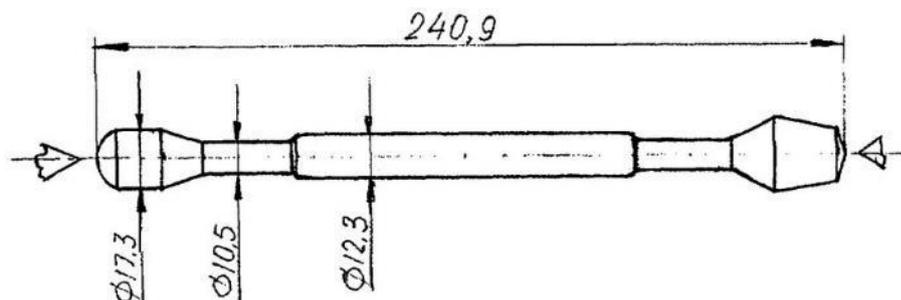


Рисунок 1.5 – Предварительно профилированная заготовка

Затем полученный полуфабрикат отправляют на горячую штамповку в закрытом штампе (рисунок 1.6).

Данный способ предполагает уменьшение окалинообразования и затрат, связанных с нагревом заготовки. Готовую поковку получают с повышенной размерной точностью и более чистыми поверхностями.

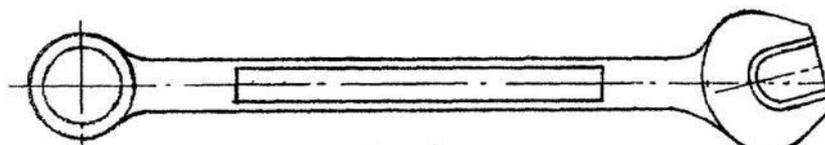


Рисунок 1.6 – Поковка удлиненной формы, полученная штамповкой в закрытом штампе

Известен патент [97], в котором описана конструкция гаечного ключа, на каждой головке (2, 3) которого предусмотрено по два открытых зева (В, В1, В2, В3) с прямыми губками, параллельными оси симметрии рукоятки (1) ключа (рисунок 1.7).

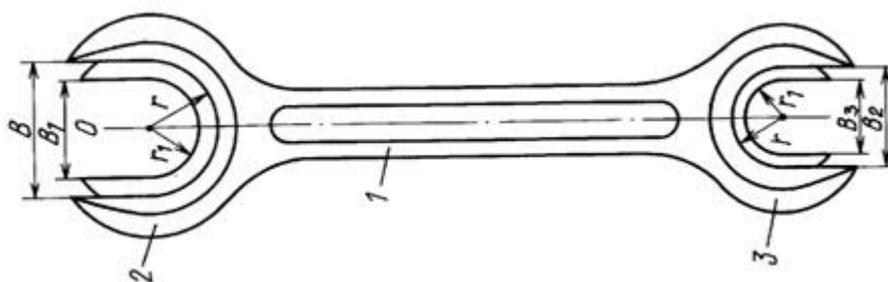


Рисунок 1.7 – Общий вид гаечного ключа с параллельными зевами

Описан способ получения ключа из предварительно нагретого металлического прутка с помощью операций штамповки в черновом и чистовом ручьях. В той же работе описывается и штамп для изготовления данного ключа, и поворотное устройство для его обработки. По описанию можно сделать вывод, что ключ не соответствует действующему стандарту [36], а сфера его применения ограничена параллельностью зевов к оси рукоятки ключа.

Из другого источника [110] гаечные ключи UNIOR изготавливаются по следующей технологии. Из листовой стали вырубает заготовки, которые подвергают штамповке, после чего удаляют излишки металла в виде облоя по периметру поковки. На другом оборудовании в заготовке пробивают отверстие в накладной и паз в рожковой части ключа (рисунок 1.8). После операций зачистки и шлифования поковку маркируют и подвергают гибке для поворота головки ключа на необходимый угол. Элементы открытого зева и

накидной части ключа калибруют протяжкой в размер. Полуфабрикат подвергают закалке и отпуску на необходимую твердость. После сошлифовывания припуска и полировки, деталь проходит этап гальванической обработки для создания декоративного антикоррозионного покрытия на поверхности.



Рисунок 1.8 – Ключ гаечный UNIOR

Существует патент на изобретение [103] с описанием способа изготовления гаечного ключа, который включает этапы отрезки и нагрева заготовки из круглого проката до температуры горячей штамповки, для уменьшения сопротивления деформированию. Затем процесс предварительного формообразования заготовки осуществляется на стане клиновой прокатки плоским инструментом (рисунок 1.9), где заготовка удлиняется с образованием рукоятки и двух головок. Далее при достаточной температуре выполняется этап штамповки (рисунок 1.10).

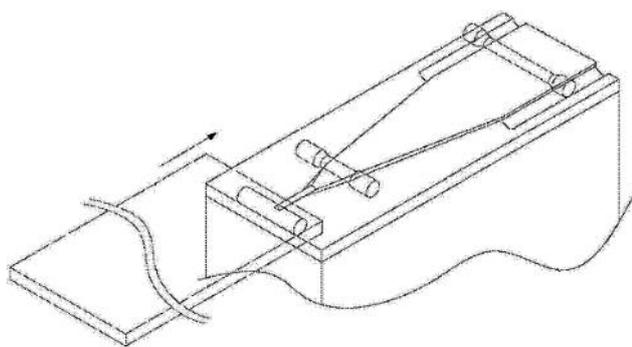


Рисунок 1.9 – Формообразование поковки

Таким образом, количество отходов сокращается, реализуется предварительная формовка на специализированном оборудовании, затраты на механическую обработку и связанное с этим оборудование могут быть значительно снижены, а эффективность окончательной штамповки гаечного ключа может быть повышена.

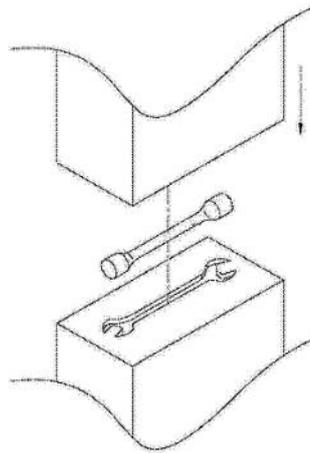


Рисунок 1.10 – Штамповка ключа

В приведенной выше технологии нет описания, как центрировать заготовку во время штамповки. Также возможно, что замена поперечно-клиновой прокатки на более универсальную вальцовку будет уместнее. Использование трех видов оборудования, показанных в работе, для одной поковки, на наш взгляд, слишком велико.

Исходя из вышеприведенного китайского патента, американские исследователи [107] предложили свой способ изготовления штампованного ключа. Схема объемной штамповки и режимы нагрева были схожими, но набор металла головок на заготовке проводился высадкой, исключая этап поперечно-клиновой прокатки (рисунок 1.9). Таким образом, избавившись от дополнительного оборудования, увеличилась производительность изготовления ключей. Однако, как и в предыдущем случае, в технологии нет необходимости в специальных устройствах для удержания заготовки на позиции перед штамповкой.

Способ изготовления ключа согласно изобретению исследователей из Японии [105] включает этап подготовки, этап предварительной штамповки, этап штамповки первой торцевой головки и этап чистовой обработки (рисунок 1.11). На этапе подготовки удлиненная плоская металлическая заготовка 5 из листового сортамента подвергается высокотемпературному нагреву и деформируется путем обжатия области будущей рукоятки 52. На следующем этапе штамповки на одном конце заготовки набирается головка

под зев 51. Далее на противоположном конце формируется область второй головки (d2). Затем формируются зевы 81 и 82 и калибруется область рукоятки 8.

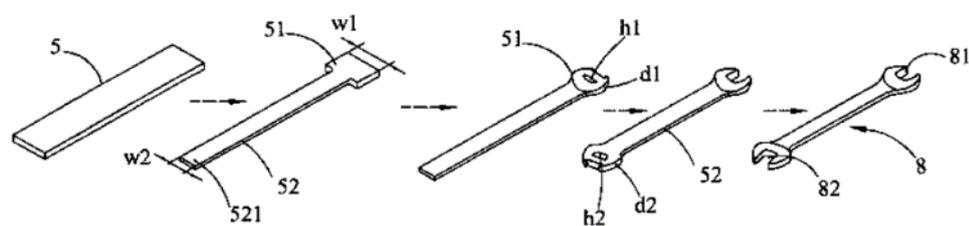


Рисунок 1.11 – Способ изготовления ключа

В частности, как показано на рисунке 1.12, штамповочный пресс 7 выполняет второй этап торцевой штамповки головки на концевой части 521 области рукоятки 52.

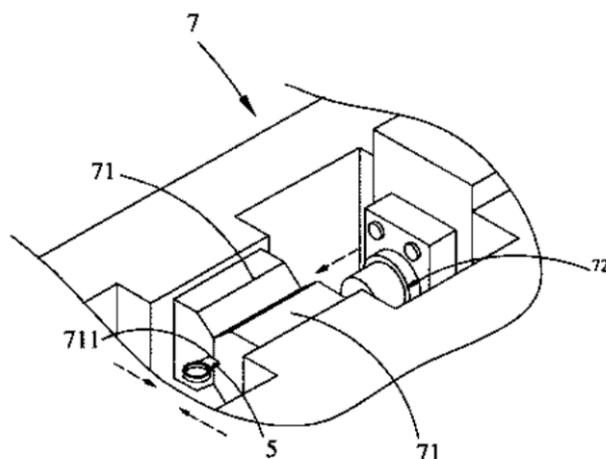


Рисунок 1.12 – Обжатие рукоятки и торцевая штамповка головки ключа

Штамповочный пресс 7 имеет привод пары боковых матриц 71, способных обжать рукоятку и удерживать заготовку 5 от проскальзывания. На торце каждой боковой матрицы 71 выполнена полость под штамповку рукоятки ключа. Перемещение пуансона 72 осуществляется отдельным ползуном прессы, который совершает движение перпендикулярное направлению смыкания матриц 71, для формообразования головки с открытым зевом ключа.

Целью другого изобретения [106] является создание способа изготовления гаечного ключа, обеспечивающего быструю формовку гаечного

ключа, упрощение этапов обработки, что приводит к снижению затрат, уменьшение количества отходов материалов и повышение эффективности штамповки. Способ включает стадию подготовки, на которой отрезается цилиндрическая заготовка необходимой длины; стадию нагрева до высокой температуры; этап формовки головных секций на формообразующем устройстве, как было показано на рисунке 1.11; этап безоблойной штамповки (рисунок 1.13).

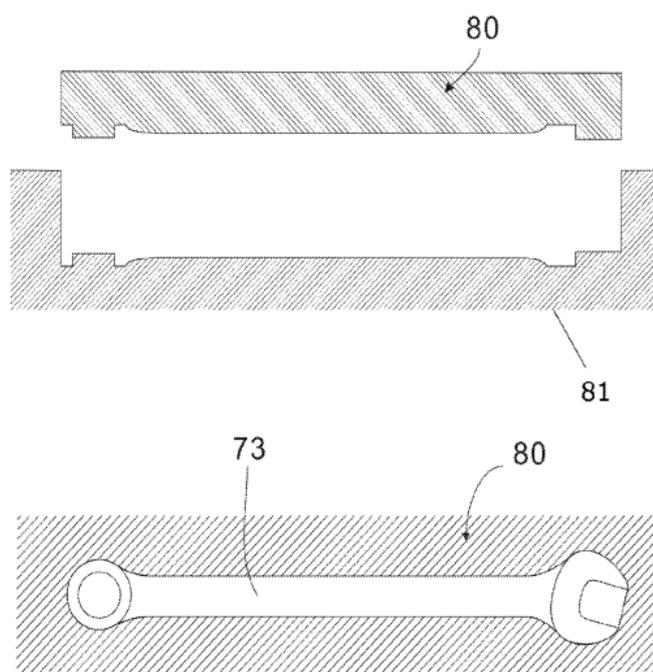


Рисунок 1.13 – Схематический вид безоблойной штамповки (80 – верхний штамп, 81 – нижний штамп, 73 – окончательный ручей)

Заготовительный этап образования головок можно проводить и на штамповочном молоте в протяжном ручье, а безоблойная штамповка, показанная в примере, нерациональна с точки зрения технологичности, т.к. компенсатором служит толщина получаемой поковки, и она будет разной в зависимости от колебания объема заготовки, что усложняет дальнейшую обработку.

Исследователи из Мюнхена [104] рассматривали также безоблойную штамповку поковки ключа. Согласно патенту, изначально от листового металла отделяются заготовки в виде полос односторонней отрезкой с

минимальными потерями материала (рисунок 1.14) на некрatность и концевой отход.

Затем обрезаются торцовые участки заготовки согласно выбранным формам. После этого заготовки помещают в закрытые штампы (рисунок 15).

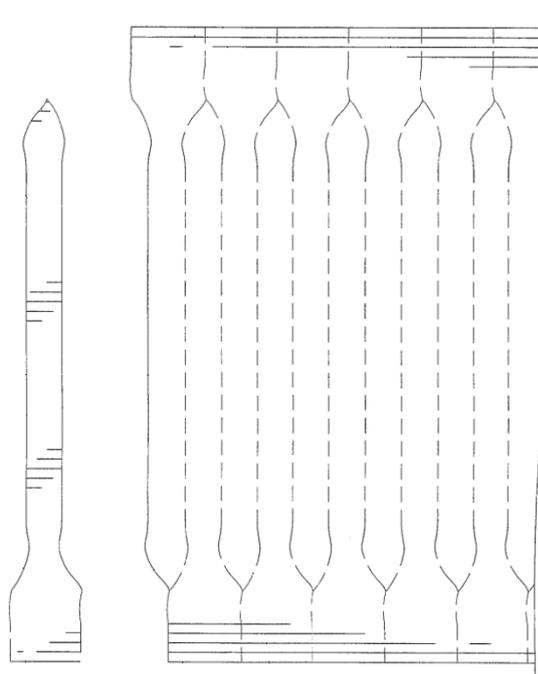


Рисунок 1.14 – Расположение заготовок в полосе

За один удар формируется поковка, которая после отправляется на пробивку перемычек, а затем на механическую обработку для формирования зевов ключа. К недостаткам данного метода можно отнести большое количество операций, предшествующих финишной штамповке.

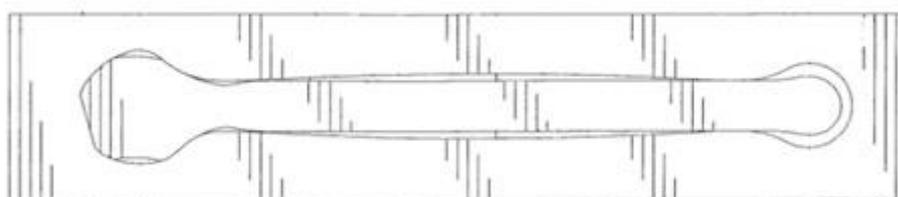


Рисунок 1.15 – Расположение заготовки в закрытом штампе

Другой вариант производства предлагает фирма Green Bay Drop Forge Co. (GBDF), частный производитель из Висконсина нестандартных поковок из различных материалов. В кузнечном цехе фирмы установлен молот простого действия, на котором реализуется часть производственных процессов ГОШ

поковок разной сложности и размеров. В качестве примера можно привести штамповку нестандартных стальных поковок из обширной группы ручных слесарных инструментов, специальных крепежных изделий и поковок деталей различной оснастки. Наряду с этим штампуют поковки стандартных стальных метизов и скобяных изделий, включая соединительные и крепежные компоненты мелких и средних размеров, в том числе скобы, хомуты, стяжки, рычажные ручки, различные гайки и крановые крюки, используемые при подъеме грузов.

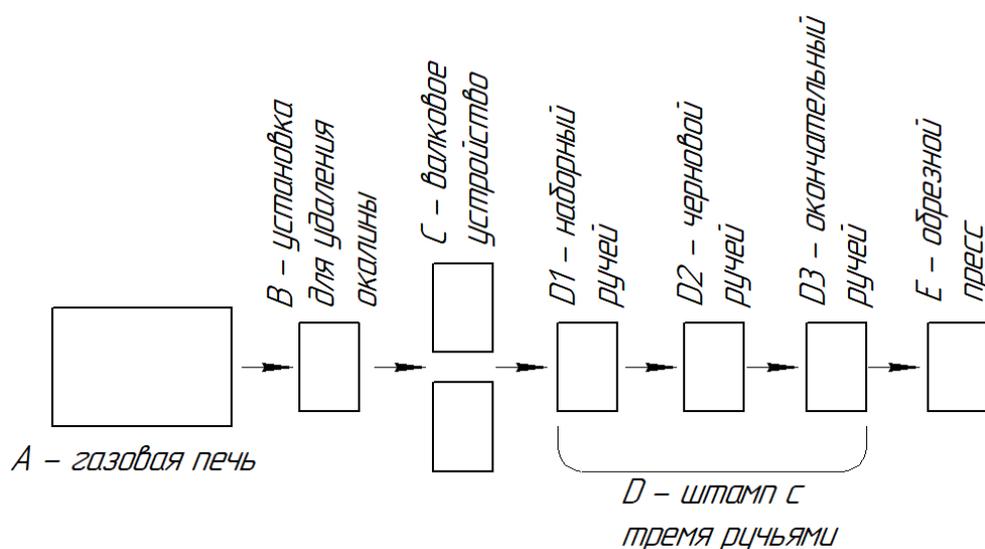


Рисунок 1.16 – Схема технологического процесса штамповки гаечного ключа большого размера, производимого в GBDF

Чтобы лучше понять существующий процесс штамповки [175], был представлен рисунок 1.16, на котором изображена схема технологического процесса штамповки гаечного ключа большого размера, производимого в GBDF. Подготовленную заготовку, имеющую нужный объем, помещают в газовую печь, рабочая температура которой составляет 1260 °С. Заготовка нагревается в течение примерно 10 - 15 минут в атмосферных условиях (А). Как только заготовка достигает постоянной температуры в диапазоне 1200 °С - 1260 °С, она удаляется вручную из печи нагревальщиком с помощью пары длинных щипцов. Затем заготовка помещается в установку для удаления окалины (В). После удаления окалины нагретую заготовку пропускают через

валковое устройство для сжатия и перераспределения материала, увеличивая длину и уменьшая толщину заготовки (С). Затем заготовку вручную переносят в штамповочный молот с массой падающих частей 1,4 тонны (D). Заготовка помещается в наборный ручей штампа (D1). Затем переносится на черновой ручей штампа (D2). После перемещается на окончательный ручей (D3). В конце процесса – на обрезной пресс (E). Существуют проблемы в описанном процессе штамповки поковки ключа, показанного на рисунке 1.16.

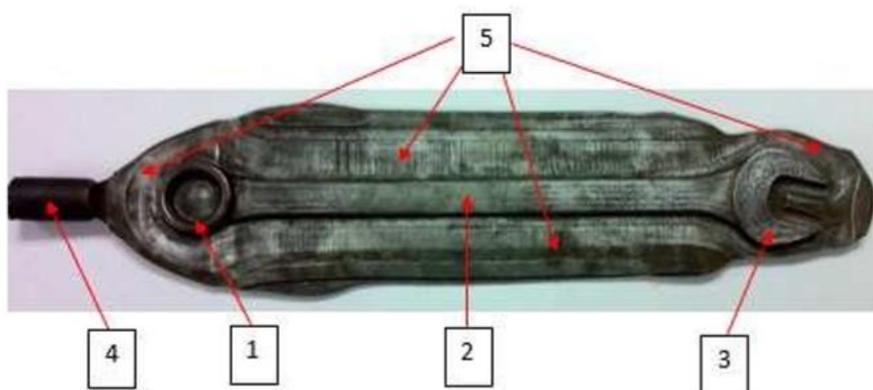


Рисунок 1.17 – Готовая поковка ключа большого размера: 1 – закрытый зев ключа, 2 – рукоятка ключа, 3 – открытый зев ключа, 4 – клещевина, 5 – облой

Как видно из рисунка 1.17, вокруг участков (1) и (2) образуется чрезмерное количество облоя, в то время как количество вытекающего облоя вокруг участков с зевами (3) существенно ограничено. Негативное последствие неравномерности вытекания облоя на различных участках поковки состоит в том, что, даже небольшое смещение открытого конца поковки гаечного ключа в ручье, увеличивает вероятность возможного незаполнения гравюры в процессе штамповки, что неизбежно приведет к браку. Другим недостатком приведенной технологии является повышенное количество ударов молота, необходимых для штамповки поковки. Их девять, что влечет за собой снижение производительности в связи с увеличением времени штамповки и повышенный износ штампов. Чтобы сделать существующий процесс штамповки более эффективным, необходимо сократить общее количество ударов молотом и минимизировать облой, для

чего потребуется правильно распределить объем на переходах штамповки с целью благоприятного течения металла при заполнении ручья.

### **1.2.2 Выбор оборудования для изготовления поковок**

Процесс штамповки на молоте широко использовался в течение многих лет из-за его универсальности и возможностей штамповки. По классификации А.И. Зимина [18, 54, 122] на производстве существуют следующие виды кузнечно-штамповочного оборудования: прессы, молоты, ротационные машины, импульсные машины и станы. Основным оборудованием кузнечно-штамповочного производства являются прессы и молоты.

Прессы — квазистатические кузнечно-штамповочные машины, в которых деформирующая сила воспроизводится замкнутой силовой системой, включающей привод, станину и другие элементы. Молоты – кузнечно-штамповочные машины ударного воздействия на поковку, где главным параметром является кинетическая энергия молота, запасенная ударной массой.

Для выполнения задач штамповки тонкополотных поковок идеально подходят штамповочные молоты. Молоты деформируют металл со скоростью 3-8 м/с в момент удара. Недостатком является ударный характер работы и, как следствие, вибрация фундамента и прилегающего грунта, отрицательно сказывающаяся на здоровье рабочих и несущей способности цеховых сооружений. КПД молота двойного действия с паровоздушным приводом примерно 2-3% [122].

Наибольший интерес представляют молоты горизонтальной компоновки с встречным движением ударных масс, называемые импакторами [178]. Не совсем обычное конструктивное исполнение этого вида кузнечно-штамповочного оборудования приводит к трудностям, которые могут возникнуть при транспортировке, подаче и позиционировании заготовок в

рабочей зоне импакторов (рисунок 1.18). Однако эта проблема может быть решена использованием средств механизации, специально спроектированных для этого вида оборудования. Также необходимо учитывать кратковременность удара, наносимого по заготовке, в условиях которого большая часть энергии переходит в теплоту, не успевает рассеяться и поглощается поковкой. Если штамповку полностью автоматизировать, это позволит осуществлять ГОШ удлиненных поковок с тонкими полотнами, в том числе из труднодеформируемых сплавов при ограниченном числе ударов за один нагрев.

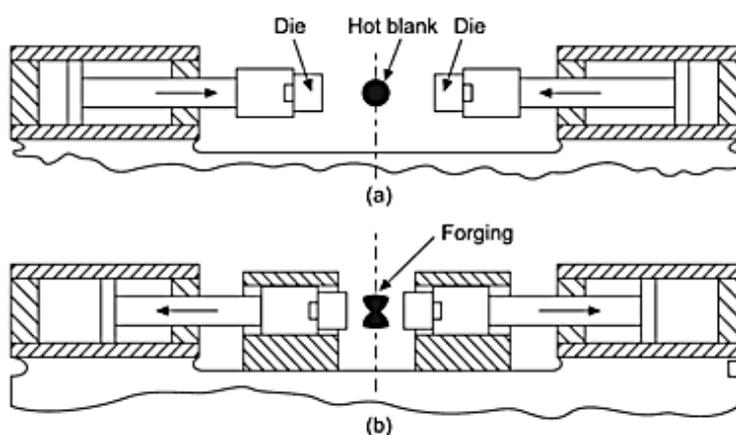


Рисунок 1.18 – Импактор Чамберсбурга

Встречное движение левой и правой ударных масс по горизонтально расположенным направляющим осуществляется с помощью гидроцилиндров под действием рабочей среды. Синхронизация движения достигается настройкой системы управления гидравлической связью баб. При этом заготовка позиционируется в плоскости соударения - в середине начального расстояния между ударными массами. Импактор может работать, совершая как одиночный ход, так и в режиме автоматических ходов с необходимой последовательной подачей заготовок в рабочую зону с помощью средств автоматизации.

На рисунке 1.19 изображена группа поковок, в том числе с удлиненной осью, из различных сталей и сплавов, в том числе труднодеформируемых, штамповку которых осуществляют на молотах.

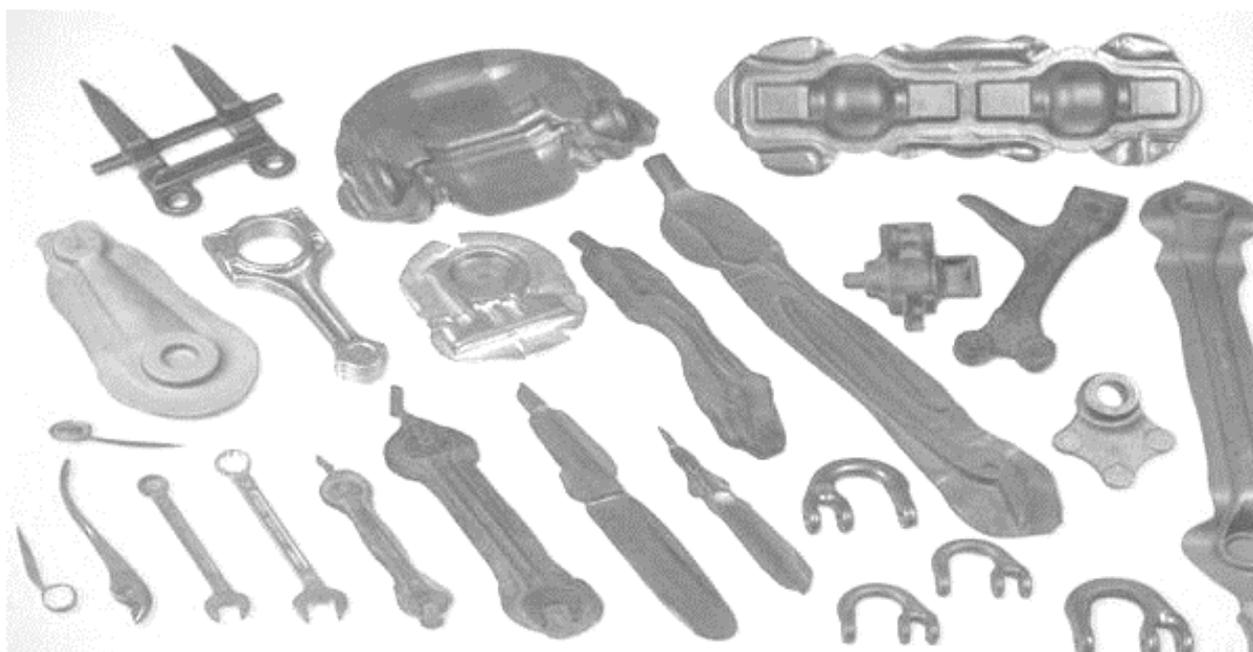


Рисунок 1.19 – Группа поковок, штампуемых на молотах

Следует отметить, что в настоящее время горизонтальные молоты с встречным ударом, предназначенные для горячей объёмной штамповки поковок, отечественной промышленностью серийно не выпускаются.

Тем не менее, существует опыт проектирования и изготовления этого перспективного кузнечно-штамповочного оборудования. Учеными и инженерами кафедры систем пластического деформирования (СПД) ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» разработан импактор с встречным горизонтальным перемещением подвижных масс с энергией удара 4 кДж (рисунок 1.20) [73]. Механизм синхронизации встречного движения ударных масс реализован средствами гидравлической связи, управление построено на электронной элементной базе [75].

На сборно-сварной станине 1 молота расположены X-образные направляющие 2, которые предназначены для возвратно-поступательного перемещения левой 3 и правой 4 ударных масс. На торцовых поверхностях левой 3 и правой 4 ударных масс, обращённых друг к другу, могут быть размещены сменные половины штампа с возможностью их жесткого закрепления. Для повышения универсальности импактора в средней части рабочего пространства может быть установлен механизм крепления

матричного блока для штамповки выдавливанием. Матрица представляет собой два разъемных полублока 7 и 8, при смыкании которых образуется рабочая полость. Сила для закрепления полублоков в штамподержателе составляет 0,1 МН. В этом случае пуансоны 5 и 6 установлены в пуансонодержателях, закрепляемых на ударных массах 3 и 4 [73].

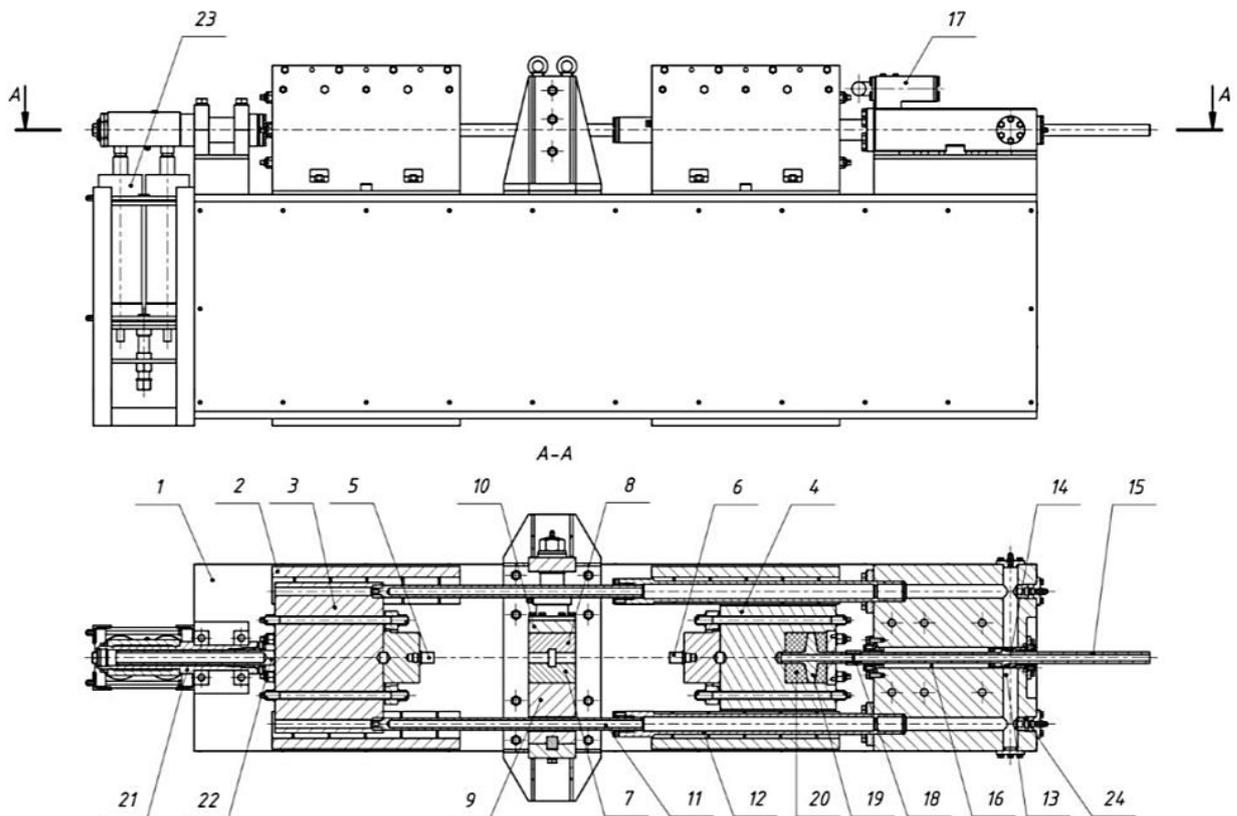


Рисунок 1.20 – Схема горизонтального молота ГШМ-4

Электронно-гидравлическая система управления молотом построена на элементах и устройствах электронной автоматики, управляющей гидравлическими распределителями жидкости высокого давления. Доступны 3-и режима работы молота: наладочный режим обеспечивает медленное дискретное сведение и разведение ударных масс или их раздельное движение; режим работы импактора, реализующего одиночные удары по заготовке или по бойку; объемную штамповку в автоматическом режиме, когда система управления молотом обеспечивает синхронное смыкание полуштампов с одинаковой энергией ударов [75].

### 1.3 Процессы пластического течения в тонком слое металла

Кинематическая схема течения металла предопределяет формообразование поковок, а для постановки и решения задач течения металла была разработана соответствующая теория [143]. Пластическую деформацию Г. Треска развил С.И. Губкин [45], сформулировав принцип наименьшего сопротивления, чтобы им воспользоваться, нужно знать направление траектории с наименьшим сопротивлением течению металла. А.Ф. Головин [29] утверждал, что при наличии контактного трения движение всегда происходит по кратчайшей нормали. Позднее выявлено, что кратчайшая нормаль всегда будет направлением наименьшего сопротивления только при условии одинакового во всех направлениях контактного трения (значительного) заготовки с инструментом [144]. К. Зоббе [148] предложил принцип наименьшего периметра, когда в процессе деформирования периметры поперечных сечений стремятся сначала к эллипсам, а затем преобразуются в окружности.

Вышеназванные принципы справедливы для поковок с выраженным полотно. Следующие положения можно рассматривать как следствие этих принципов. Имеется линия раздела течения металла, по которой скорости движения металлических частиц равны нулю. Направления каждой линии тока перпендикулярны границе области течения. Условия трения зависят от величины давления на контакте и могут быть заданы фактором трения, близким к единице, что соответствует условиям трения Прандтля – Зибеля для процессов горячей объемной штамповки. Движение пластической среды по плоскостям контакта может происходить по одной из известных схем, в том числе и по промежуточной кинематической схеме течения металла. Сочетание линий раздела потока металла и линий тока является картиной течения металла. Обычно используют визуальные и физические аналогии, чтобы описать физические процессы течения.

По Ильюшину А.А. [61] течение в тонком слое пластического вещества происходит под действием движущихся навстречу друг другу жестких недеформируемых поверхностей рабочих инструментов. Этот класс задач предполагает возможность построить теорию и методы их решения. На рисунке 1.21 изображен бесконечно малый элемент пластического слоя в криволинейных координатах  $(\alpha, \beta)$ , где  $A$  и  $B$  - главные кривизны.

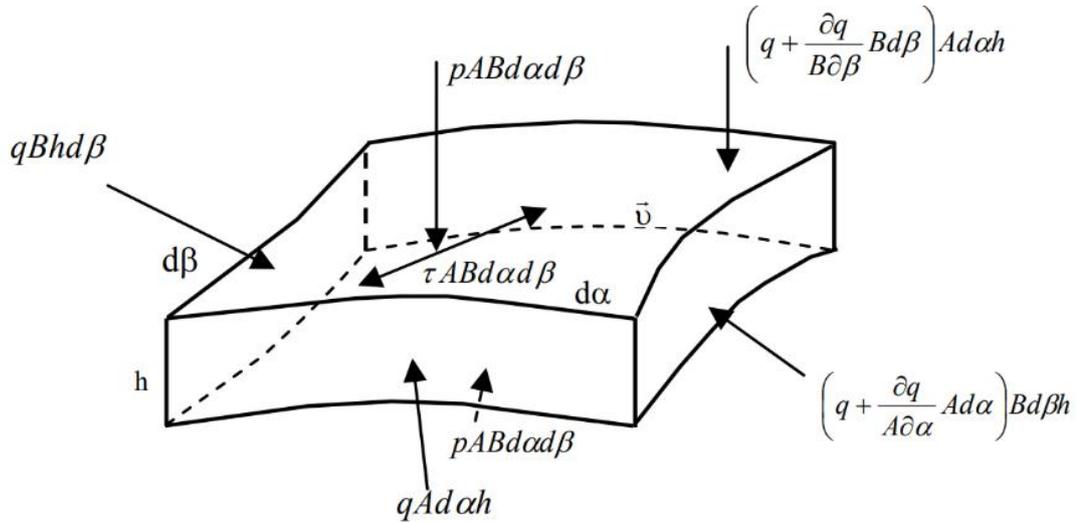


Рисунок 1.21 – Элемент слоя вещества

Следуя Эйлеру, движение пластического вещества в результате сжатия между двумя параллельными плитами происходит с перемещением бесконечно малых материальных частиц, проходящих через заданную точку пространства. Во время процесса деформирования вещество свободно растекается. В начальный момент времени поверхность вещества ограничена контуром  $\mathbf{r} = \mathbf{r}(\alpha, \beta)$ , а боковая нагрузка отсутствует.

Проекции скоростей течения физических частиц могут быть заменены средней скоростью скольжения вещества пластического слоя по контактной поверхности движущегося рабочего тела [21]:

$$\mathbf{v} = v_{\alpha}(\alpha, \beta, t) \frac{\partial \mathbf{r}}{A \partial \alpha} + v_{\beta}(\alpha, \beta, t) \frac{\partial \mathbf{r}}{B \partial \beta}, \quad (1.1)$$

где  $v_{\alpha}(\alpha, \beta, t), v_{\beta}(\alpha, \beta, t)$  – эйлеровы координаты вектора относительной скорости.

Скорости деформации волокон  $\dot{\epsilon}_{zz}$  равны средней скорости

относительного изменения толщины слоя [21]:

$$\dot{e}_{zz} = \frac{1}{h} \frac{dh}{dt}. \quad (1.2)$$

Поверхностные силы сопротивления, вызванные наличием трения, являются функциями давления, относительных скоростей скольжения и коэффициентов трения. В условиях сухого трения без нанесения на контактную поверхность технологической смазки и наличии относительного проскальзывания пластического слоя относительно деформирующихся поверхностей, касательное напряжение, вызванное трением и направленное противоположно направлению скорости скольжения слоя, пока оно меньше предела текучести материала на сдвиг  $\tau_s$  (зона скольжения), определяется законом Кулона  $\tau = \tau(v)$  [21].

При достижении напряжениями, вызванными трением, предела текучести материала на сдвиг  $\tau_s$  условия трения задают по закону Л. Прандтля (зона торможения). На участках линейного изменения напряжений от  $\tau_s$  до нуля образуется зона прилипания или застоя. Возникающие в слое касательные контактные напряжения трения  $T_1$  на плоскостях контакта (при координате  $z = 0$ ) и  $T_2$  (при координате  $z = h$ ) направлены в стороны, противоположные относительным скоростям скольжения, и по величине равны  $\tau_s$  [21].

Так как слой тонкий  $h/L < 1$ , значит  $\sigma_{\alpha\alpha} = \sigma_{\beta\beta} = q$ , а касательное напряжение  $\tau_{\alpha\beta}$  мало и им можно пренебречь. Касательными напряжениями  $\tau_{z\alpha}$  и  $\tau_{z\beta}$  можно также пренебречь, так как перпендикулярная до деформации плоскость остается перпендикулярной после деформации. Условие текучести материала принимается в форме Мизеса [60, 154]:

$$\sigma_i = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_{\alpha\alpha} - \sigma_{\beta\beta})^2 + (\sigma_{\beta\beta} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{\alpha\alpha} - \sigma_{zz})^2} = |q - \sigma_{zz}| = \sigma_s. \quad (1.3)$$

Уравнения сохранения импульса слоя  $ABh\partial\alpha\partial\beta$  в проекциях на  $\alpha$  и  $\beta$  (рисунок 1.21) имеют вид [21]:

$$\begin{cases} \rho g_{\alpha} ABh \partial \alpha \partial \beta + qhV \partial \beta - \left( q + \frac{\partial q A \partial \alpha}{A \partial \alpha} \right) Bh \partial \beta - \frac{2\tau_s AB \partial \alpha \partial \beta v_{\alpha}}{\sqrt{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2}} = 0, \\ \rho g_{\beta} ABh \partial \alpha \partial \beta + qhA \partial \alpha - \left( q + \frac{\partial q B \partial \beta}{B \partial \beta} \right) Ah \partial \alpha - \frac{2\tau_s AB \partial \alpha \partial \beta v_{\beta}}{\sqrt{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2}} = 0, \end{cases} \quad (1.4)$$

где  $\rho$  – плотность материала;

$g_{\alpha}$ ,  $g_{\beta}$  – проекции ускорения на линии скольжения  $\alpha$  и  $\beta$ .

Поскольку напряжения постоянны по толщине, то уравнение сохранения импульса в проекции на ось  $z$  даст равенство [61, 63]:

$$\sigma_{zz} = -p, \quad (1.5)$$

где  $p$  – внешнее среднее нормальное давление со стороны рабочей поверхности инструмента на слой вещества.

Так как рассматриваются процессы медленных течений, в уравнениях сохранения импульса инерционными членами можно пренебречь, и из (1.4) следует [21]:

$$\left( \frac{\partial q}{A \partial \alpha} \right)^2 + \left( \frac{\partial q}{B \partial \beta} \right)^2 = \frac{4\tau_s^2}{h^2} \quad (1.6)$$

или, используя условие Мизеса (1.3) с учетом (1.5) для неизвестной функции давления  $p$ , получим следующий результат [21]:

$$\left( \frac{\partial p}{A \partial \alpha} \right)^2 + \left( \frac{\partial p}{B \partial \beta} \right)^2 = \frac{4\tau_s^2}{h^2}. \quad (1.7)$$

Эти соотношения показывают, что модуль градиента давления  $p$  в каждый момент течения массы постоянен для всей области и изменяется лишь по  $t$  [21]:

$$|\mathbf{grad} p| = \frac{2\tau_s}{h}. \quad (1.8)$$

Из соотношения (1.2) получаем [21]:

$$\frac{v_{\alpha}}{v_{\beta}} = \frac{\partial p}{A \partial \alpha} : \frac{\partial p}{B \partial \beta}. \quad (1.9)$$

Если течение металла происходит под действием параллельно

сближающихся плоскостей штампа (большинство процессов технологии объемной штамповки реализуется по такой схеме), имеем:  $A\delta\alpha = dx$ ,  $B\delta\beta = dy$  и уравнение (1.7) преобразуется к виду [21]:

$$\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial y}\right)^2 = \frac{4\tau_s^2}{h^2}. \quad (1.10)$$

Краевая задача с затеканием материала пластического слоя в паз состоит из решения уравнения (1.7) с граничным условием на поверхности контакта стальной матрицы с системой пазов и деформируемой пластины. Тогда система для определения функции  $l$  будет составлена из уравнения относительно контактного давления и граничного условия, которые можно записать следующим образом [21]:

$$\begin{cases} \frac{\partial p}{\partial z} = -\frac{2\tau_s}{\delta}, \\ p|_{z=l} = \sigma_s, \end{cases} \quad (1.11)$$

здесь  $\sigma_s$  – предел текучести выбранного материала. Ось  $z$  направлена вниз,  $z=0$  – граница  $G$  (матрица – пластина);  $z=l$  – основание паза в матрице.

Решая (1.11), получим функцию давления [21]:

$$p = \sigma_s + \frac{2\tau_s}{\delta}(l - z). \quad (1.12)$$

Давление на границе  $G$  ( $z=0$ ) при  $\sigma_s = \sqrt{3}\tau_s$  определится следующим образом [21]:

$$p|_G = \sigma_s \left(1 + \frac{2l}{\sqrt{3}\delta}\right). \quad (1.13)$$

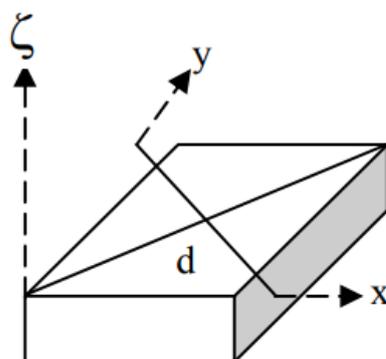


Рисунок 1.22 – Схема песчаной насыпи

В уравнение (1.10) с граничным условием (1.13) вместо функции давления  $p$  введена новая функция  $\xi$  [21]:

$$\xi = \frac{h}{2\tau_s} \left( p - \sigma_s - \frac{2l}{\sqrt{3}\delta} \sigma_s \right), \quad (1.14)$$

которая удовлетворяет уравнению (1.10) [21]:

$$\left( \frac{\partial \xi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \xi}{\partial y} \right)^2 = 1 \quad (1.15)$$

и согласно (1.13) принимает на границе  $G$  значение [21]:

$$\xi|_G = 0. \quad (1.16)$$

С помощью полученного уравнения (1.15) в сочетании с приведенным граничным условием (1.16) проводят аналогию между задачами течения тонкого пластического слоя и определения формы песчаной насыпи из сухого однородного песка с коэффициентом внутреннего трения  $\nu$ , при насыпании которого на горизонтально расположенную пластину, контур которой совпадает с границами области течения (рисунок 1.22), формируется предельная насыпь с углом естественного скоса  $\varphi$ , если  $\nu = \operatorname{tg} \varphi$ .

В этом случае предельная насыпь будет иметь строго определенную формы, ордината которой  $\zeta$  должна удовлетворять уравнению [21]:

$$|\mathbf{grad} \zeta|^2 = \left( \frac{\partial \zeta}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right)^2 = \nu^2 \quad (1.17)$$

и однородному граничному условию [21]:

$$\zeta|_G = 0. \quad (1.18)$$

Предельная насыпь характерна тем, что угол наклона ее образующей к горизонту есть величина постоянная и равная  $\varphi$ . Отсюда следует, что образуемая насыпью поверхность линейчатая, содержащая прямолинейные образующие.

Функция  $\zeta/\nu$  совпадает с  $\xi$ , поскольку тождественны уравнения (1.15) и (1.17), и граничные условия (1.14) и (1.18), которым эти функции удовлетворяют. Отсюда функция давления  $p$  [21]:

$$p = \sigma_s \left( 1 + \frac{2l}{\sqrt{3}\delta} \right) + \frac{\zeta}{v} \frac{2\tau_s}{h}. \quad (1.19)$$

Подобрав песок, чтобы величина его коэффициента  $v$  численно совпадала со значением отношения  $\frac{2\tau_s}{h}$ , из (1.19) получим [21]:

$$p = \sigma_s \left( 1 + \frac{2l}{\sqrt{3}\delta} \right) + \zeta. \quad (1.20)$$

Положив, что по контуру пластины сделан вертикальный борт высотой  $\sigma_s \left( 1 + \frac{2l}{\sqrt{3}\delta} \right)$ , ордината такой насыпи  $\zeta$  будет совпадать с функцией давления  $p$ , и для них справедливы одинаковые математические постановки задачи [63].

Аналогию между диаграммой обобщенного давления в области течения и диаграммой «песчаной насыпи» установил А.А. Ильюшин. В частности, общая сила  $Q$ , необходимая для осуществления процесса течения и являющаяся функцией толщины пластинки, будет численно равна объему песчаной насыпи: разделив основание на четыре подобласти диагоналями квадрата (рисунок 1.22) и выразив объем каждого участка, расположенного над соответствующей частью квадрата  $V_i$ , в виде интеграла [61]:

$$V_i = 2 \int_0^{d/2} dx \int_0^x tg\varphi y dy, \quad (1.21)$$

где  $d$  – сторона квадрата, представляющего область течения.

Отсюда, объем участка насыпи [61]:

$$V_i = 8 \int_0^{d/2} dx \int_0^x tg\varphi y dy. \quad (1.22)$$

Умножая  $V$  на число квадратов  $m$ , ограниченных пазами матрицы, для суммарной силы  $Q$ , необходимой для сжатия пластины, получаем выражение через объем песчаной насыпи  $V$  [61]:

$$Q = m \left( 8 \int_0^{d/2} dx \int_0^x tg\varphi y dy + \sigma_s \left( 1 + \frac{2l}{\sqrt{3}\delta} \right) d^2 \right). \quad (1.23)$$

Откуда после интегрирования и преобразований [61]:

$$Q = m\sigma_s d^2 \left( 1 + \frac{2l}{\sqrt{3}\delta} + \frac{d}{3\sqrt{3}h} \right), \quad (1.24)$$

где  $h$  – конечная толщина пластины.

При помощи аналогии с «песчаной насыпью» определяют линии тока и распределение скоростей течения; линии аналогичны линиям раздела течения, перпендикулярных поверхности поковки [143].

До сих пор остается дискуссионным вопрос о характере течения металла в процессах пластического деформирования для плоских заготовок [139]. Известны методы анализа пластических деформаций [152]. Тарновский И.Я. [145], Головин А.Ф. [29], Губкин С.И. [44] и др. получили закономерности изменения формы металла, в частности кинематические схемы течения металла (рисунок 1.23).

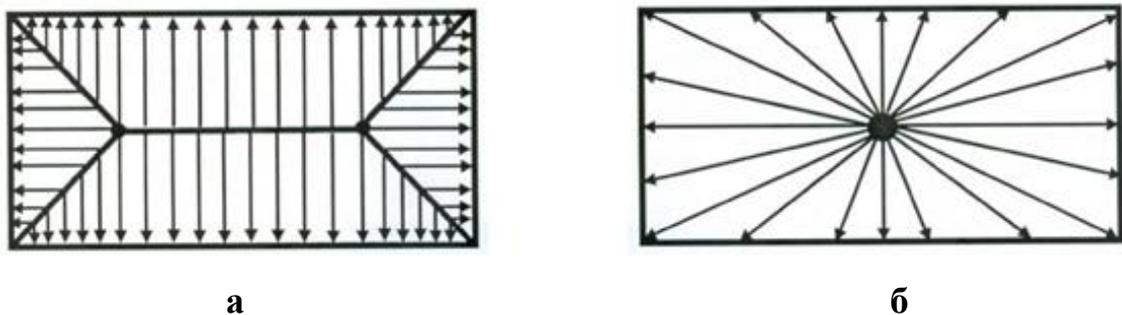


Рисунок 1.23 – Предельные кинематические схемы течения металла: а - схема кратчайшей нормали А.Ф. Головина; б - радиальная схема И.Я. Тарновского

Описанная схема А.Ф. Головина [29] не учитывает влияние различных условий трения и структуры металла (рисунок 1.23а). В радиальной схеме, описанной И.Я. Тарновским (рисунок 1.23б), при осадке прямоугольного параллелепипеда сечение деформируемого параллелепипеда в плоскости, в процессе деформации прямоугольник увеличивается только в размерах, сохраняя форму (рисунок 1.24а) [145].

Радиальная схема – для коэффициентов трения близких к нулю; «нормальная» – к единице. Авторы предполагали существование промежуточной схемы [145]. Как показал Шарапин Е.Ф. [158] анизотропия контактного трения существенно влияет на изменение формы

перпендикулярно действующей силы. С другой стороны, необходимо обосновать появление зон (рисунок 1.24б) в центральной части поковки со стороны свободного конца, в которой течение металла застаивается [149].

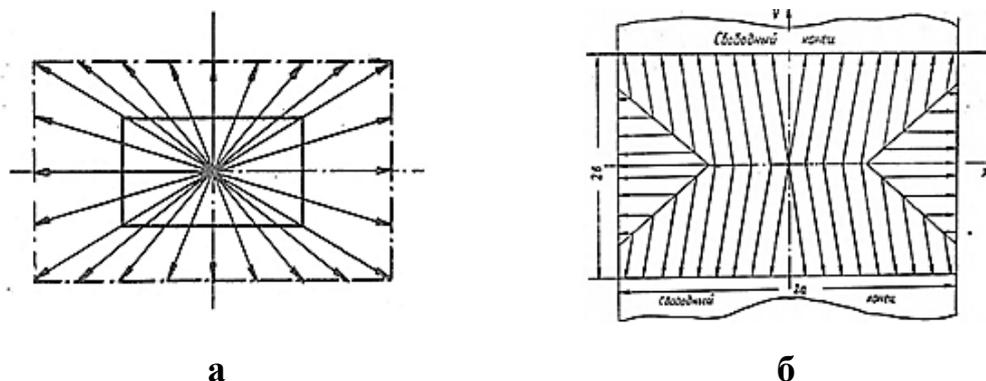


Рисунок 1.24 – Схемы формоизменения заготовок: а - сохранение формы радиальной схемы; б - застаивание металла в центральной части

Согласно теории тонкого слоя Ильюшина А.А. [61], применить схему течения по кратчайшей нормали к периметру возможно к тонким поковкам. Точность теории расчета изменения формы поковки определяется показателем относительной толщины заготовки, где тонким слоем считается отношение толщины к линейному размеру поковки в плане меньше 0,1.

Объединение «нормальной» и радиальной схем состоит в том, что сначала работает «нормальная» схема течения металла, а затем – псевдорadiaльная («нормальная» и радиальная одновременно): линии раздела течения металла расположены как в «нормальной», а линии тока имеют разрывы (рисунок 1.25). Это связано с наличием двух областей течения металла [118].

Теория течения тонкого слоя пластического материала по поверхностям, разработанная А.А. Ильюшиным, распространяется на случай анизотропного идеально пластического материала и анизотропного течения на поверхности. Особое внимание уделяется определению контактного давления. Два метода предложены для решения этой задачи: вариационный метод и приведение к задаче Коши.

Деформации, возникающие под действием высоких удельных давлений,

превышающих напряжения сдвига, могут достигать значений, соизмеримых с толщиной заготовки. И пренебрежение этими деформациями повлияет на точность получаемых деталей.

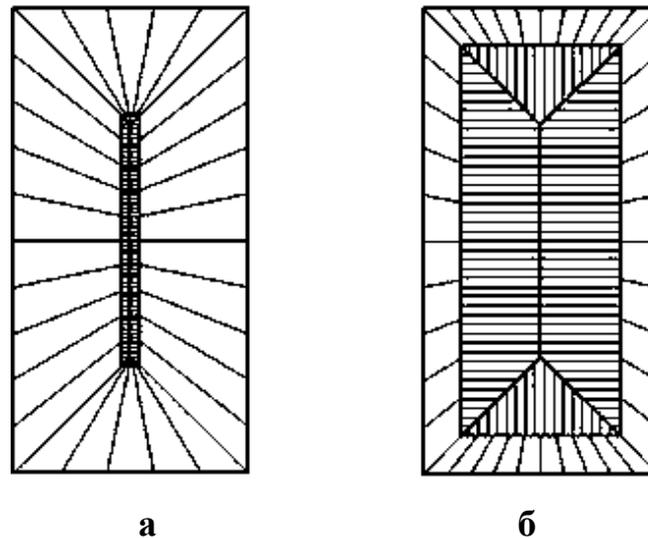


Рисунок 1.25 – Промежуточная кинематическая схема течения металла:

а - при  $k_f \rightarrow 0$ ; б - при  $k_f \rightarrow 1$  ( $k_f$  – фактор трения)

В работе [17] представлена постановка и решение задачи о течении тонкого слоя по грани упругого параллелепипеда, где полагается, что снизу ограничение упругим инструментом, а сверху – абсолютно твердым телом [59, 61] (рисунок 1.26).

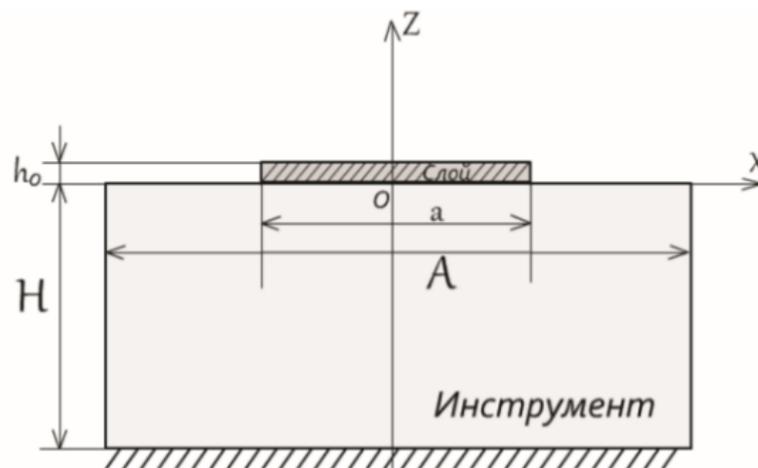


Рисунок 1.26 – Схема упругого параллелепипеда

На основании рассмотренной работы [17] анизотропия оказывает существенное влияние на распределение давления в слое. Проблема течения тонких пластических слоев в условиях анизотропии свойств материала и

контактного трения до сих пор практически не исследована [64].

Контур деформируемой плоской поковки в процессе формообразования зависит от положения границы раздела течения металла и направления линий тока. Как показали исследования [1, 79], наиболее приемлемой в этом случае является радиальная картина течения металла. В работе [125] рассмотрен аналитический подход к определению формы границы деформируемой плоской заготовки в процессах объемной штамповки. Из анализа можно сделать вывод, что контур поковки представляет собой дугу окружности.

Постоянно рассматривается необходимость совершенствования процессов штамповки для эффективного производства деталей более высокого качества. Пример этого можно увидеть в работе, выполненной Чжоу, Цзя, Лю и Ваном [182] по оптимизации штамповки. В своей работе Чжоу и его коллеги обсудили существующие конструкции облойной канавки, используемой в штампах, и предложили новую конструкцию, которая может помочь улучшить поток металла. Предложенная конструкция также поможет уменьшить ущерб, причиняемый штампам. Новая геометрия комбинированной канавки описана в работе [181].

Анализ предложенной геометрии был сделан с помощью моделирования конечными элементами (КЭ), а затем проверен в ходе экспериментальных испытаний. Из моделирования было установлено, что использование предложенной конструкции канавки для первого перехода процесса, вызвало более равномерное распределение материала в поперечном сечении. Также наблюдалось уменьшение напряжения и деформации в области контакта. Предлагаемая конструкция облойной канавки обеспечивала меньшее распределение глубины износа и в имитационных моделях. При сравнении экспериментальных результатов с моделями КЭ был сделан вывод об удовлетворительном совпадении.

Эрвасти и коллеги [174] выполнили анализ формы облойной канавки при формоизменении в штампах. Для улучшения заполнения облойной

канавки была предложена новая конструкция штампа. Отмечено, что во время чистовых операций только небольшая часть всей доступной энергии передается заготовке. Это означает, что во время первоначальных ударов происходит бóльшая пластическая деформация заготовки, чем при окончательных ударах. Изменением конструкции инструмента количество ударов молотом может быть уменьшено. В предложенной конструкции штампа Эрвасти использовал большие штамповочные уклоны и изменил форму знака, которая снизила нагрузку, уменьшив общее количество необходимых ударов молота.

Геометрия конической полости оптимизирована с точки зрения нагрузки, энергии и раннего заполнения матрицы. Анализируемые геометрические параметры (рисунок 1.27):  $\alpha$  — угол полуконуса,  $R$  — радиус основания конуса,  $r$  — радиус закругления знака,  $\beta$  — малый угол в основании знака, предназначенный для регулировки основного направления течения материала.

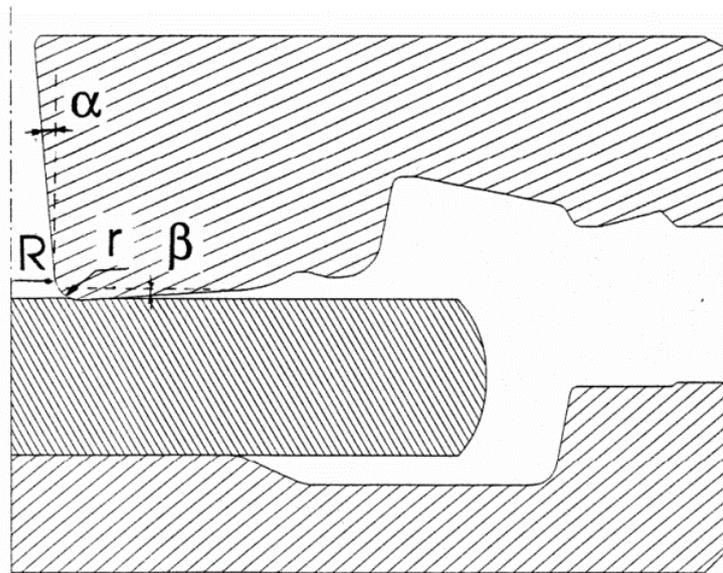


Рисунок 1.27 – Геометрия полости ручья и облойной канавки и параметры

Рисунок 1.28 представлен, чтобы показать сравнение между старой и первоначальной предложенной конструкцией штампа и продемонстрировать влияние, которое она оказывает на давление.

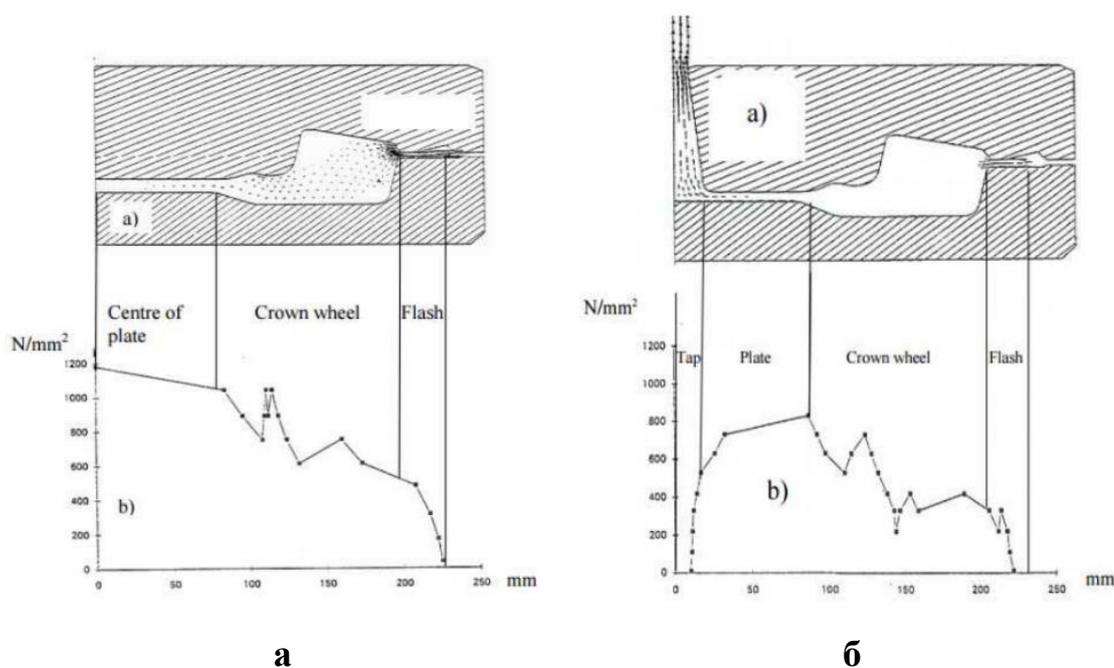


Рисунок 1.28 – Конструкция штампа и соответствующие давления: а - старый вариант, б - первая итерация предложенного проекта

В ходе экспериментальных испытаний было подтверждено, что предлагаемая конструкция действительно сократила число ударов примерно на 33%.

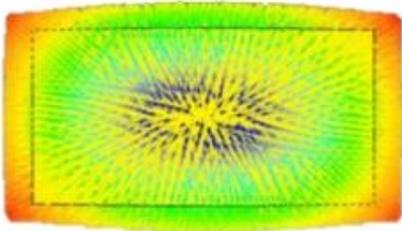
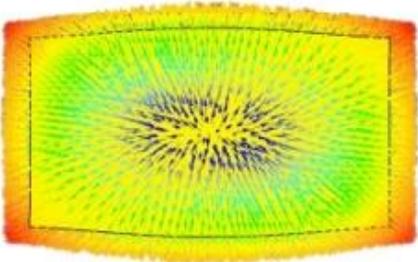
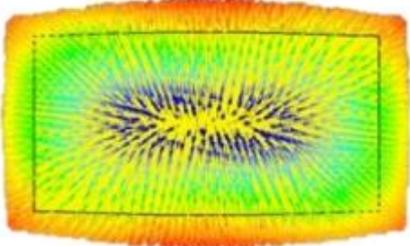
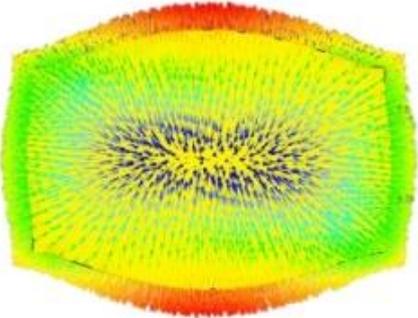
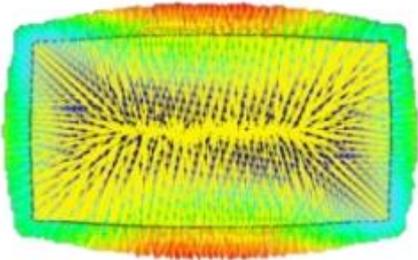
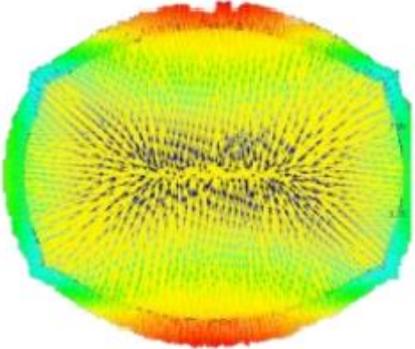
#### 1.4 Контактное трение

Промежуточная схема течения металла изучена в ходе виртуальных экспериментов с использованием ПО DEFORM [96], которое моделирует процессы обработки металлов давлением и дает возможность для исследования влияния различных факторов на схему течения металла. С использованием ПО DEFORM моделировался процесс свободной осадки образцов [148]. Использовались степени деформации  $\epsilon = 0,1$ ;  $\epsilon = 0,25$  и  $\epsilon = 0,75$ . Результаты моделирования представлены в таблице 1.1. Моделирование показало, что происходит переход от радиальной к «нормальной» схеме течения.

Так как сила трения определяется сложной функцией, учитывающей

температуру деформации, вид трения, физико-химическое состояние контактных поверхностей, наличие химических реакций в процессе трения, различают коэффициент трения и фактор трения [44, 149]. Существует четыре теории трения.

Таблица 1.1 – Результаты моделирования влияния трения на схему течения металла

Степень деформации, $\varepsilon$	Фактор трения, $k_f$	
	0,1 (радиальная схема)	0,9 («нормальная» схема)
0,1		
0,25		
0,75		

К первой относят механические или геометрические теории трения. Это трение с подъемом одного тела по неровностям другого. Француз Г. Амонтон описал силы трения, не зависящие от площади касания и изменяющиеся при

различном давлении [58].

Ко второй относят молекулярные или адгезионные теории трения. Рассматриваются условия равновесия атомов контактной поверхности под действием нагрузки и тангенциальной силы с учетом молекулярного взаимодействия.

Третья включает деформационные теории трения, зависящие от деформации микронеровностей на контактной поверхности.

В четвертой трение представлено двумя видами сопротивлений, сцепляемости и зацепления: закон Кулона [55], отражающий двойкость природы трения.

В настоящее время общепризнанной является адгезионно-деформационная теория трения по И.В. Крагельскому [80]: на контакте двух взаимодействующих тел под нагрузкой имеется механическое и молекулярные взаимодействия, вызывающие напряжения трения. В работах Г.И. Епифанова [53] сила трения рассчитана по формуле Бриджмена [19] по прочности материала на сдвиг.

В теории обработки давлением граничные условия задаются с помощью нескольких групп законов трения, как показано на диаграмме (рисунок 1.29).

В первой группе напряжения трения распределены по закону Амонтона-Кулона ( $\tau_k = \mu\sigma_n$ ) [58], во второй напряжения трения пропорциональны среднему значению сопротивления деформированию по Зибелю, ( $\tau_k = m\sigma_s$ ) [57], а третья группа представляет смешанный закон трения, предложенный Левановым, ( $\tau_k = mk \left(1 - e^{-\beta \frac{\sigma_n}{\sigma_s}}\right)$ ) [83].

Практика показывает, что решение задач обработки давлением с применением простых законов трения при условии правильного выбора коэффициента  $\mu$  обеспечивает удовлетворительные результаты при определении силы, мощности и формоизменения. При неправильном выборе коэффициентов трения наблюдается усложнение условий трения для вычисления этих параметров.

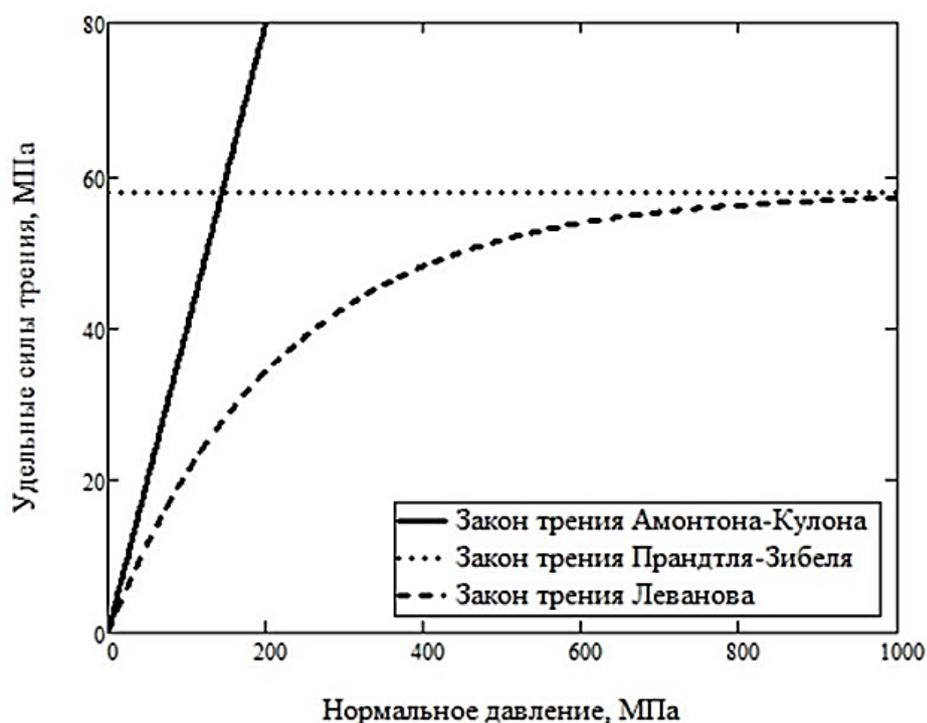


Рисунок 1.29 – Диаграмма сравнения законов трения

Процессы течения тонкого пластического слоя с анизотропным контактным трением рассмотрены в [68, 72]. При малой анизотропии эволюция контура области описывается уравнением того же типа, что и в изотропном случае [69, 70]; там же рассматривалась проблема неустойчивости растекания полосы.

При растекании тонкого пластического слоя материал считается пластически изотропным, а величина контактного напряжения трения - есть функция угла наклона касательной к линии тока и функция параметров: температуры и механических свойств материала слоя [70].

## 1.5 Методы расчета напряженно-деформированного состояния

Процессы обработки металлов давлением очень сложны для описания напряженно-деформированного состояния и создания на этой основе математической модели штамповки [129, 131-133]. Система дифференциальных уравнений, содержащая множество параметров, решается

различными методами, в частности, методом конечных элементов.

Существует подход, называемый теорией течения тонкого слоя [60], который заключается в построении пространственной диаграммы контактных давлений. Подход основан на упрощении исходной системы дифференциальных уравнений.

В работе [15] говорится о необходимости равномерного распределения термонапряжений по площади заготовки при нагреве для штамповки во избежание пружинения полуфабриката. Описано, что неравномерное нагревание заготовки способствует появлению напряжений без приложения внешних нагрузок. Расширение сплошной среды не происходит свободно, поэтому при нагревании возникают термонапряжения [147].

«Если при моделировании возможно будет доказать, что в результате нагрева определенным способом возникают небольшие температурные напряжения, то в таком случае можно будет отказаться при рассмотрении напряженно-деформированного состояния материала в каждой точке при пластическом деформировании от учета температурных напряжений, что существенно упростит расчетные формулы для инженерной методики определения критических напряжений при штамповке и упростит план экспериментов по проверке соотношения теоретических расчетных значений и опытных данных для всех возможных технологических ситуаций» [26].

В процессах обработки металлов давлением существуют плоские заготовки, у которых участком эпюры контактных давлений является поверхность с одинаковым уклоном. Такое описание процесса формообразования материала известно, как аналогия с песчаной насыпью [88]. Пространственный график контактных давлений представляет собой поверхность одного и того же наклона, где все образующие наклонены к плоскости контакта под одним и тем же углом [60].

Для исследования напряженно-деформированного состояния пластической области в работе [114] использован метод координатных

делительных сеток. В пластической области построены изолинии интенсивности деформаций (рисунок 1.30).

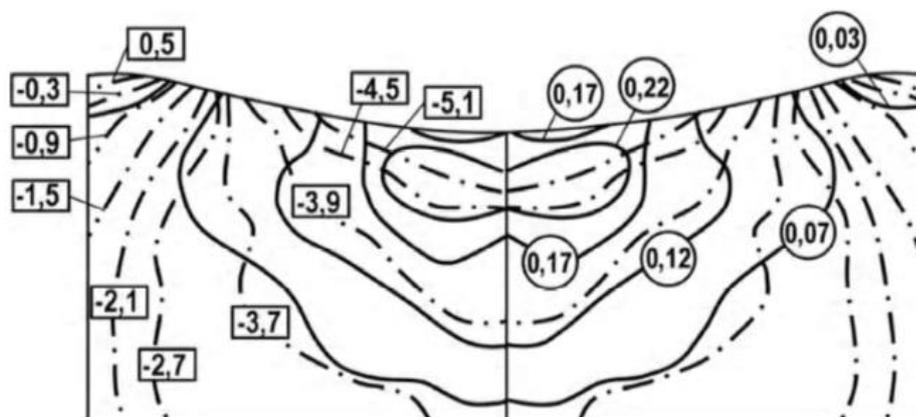


Рисунок 1.30 – Характер распределения в пластической области изолиний  $\eta = const, \varepsilon = const$  по результатам метода координатных делительных сеток

Анализ полученных результатов показал, что интенсивность деформаций на поверхности составляет более 50% от максимальной, наблюдаемая вблизи оси симметрии на глубине  $0,1d$ . Это объясняет характер разрушения металлов при поверхностном пластическом деформировании в виде шелушения и отслоения частиц поверхностного слоя [87].

В работе [17] изучается процесс деформации инструмента как упругого параллелепипеда. Соотношения, которыми определяется напряженно-деформированное состояние можно записать следующими способами.

Уравнения Коши для деформаций [17]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u_x}{\partial x}; \quad \varepsilon_{xz} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} \right); \\ \varepsilon_{yy} &= \frac{\partial u_y}{\partial y}; \quad \varepsilon_{yz} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_z}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial z} \right); \\ \varepsilon_{zz} &= \frac{\partial u_z}{\partial z}; \quad \varepsilon_{xy} = 0. \end{aligned} \quad (1.25)$$

Соотношения Ламе [17]:

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= \lambda\theta + 2\mu\varepsilon_{xx}; \quad \sigma_{xz} = 2\mu\varepsilon_{xz}; \\ \sigma_{yy} &= \lambda\theta + 2\mu\varepsilon_{yy}; \quad \sigma_{yz} = 2\mu\varepsilon_{yz}; \\ \sigma_{zz} &= \lambda\theta + 2\mu\varepsilon_{zz}; \quad \sigma_{xy} = 0. \end{aligned} \quad (1.26)$$

Уравнения равновесия в форме Ламе [17]:

$$\begin{cases} (\lambda + \mu) \frac{\partial \theta}{\partial x} + \mu \Delta u_x = 0; \\ (\lambda + \mu) \frac{\partial \theta}{\partial y} + \mu \Delta u_y = 0; \\ (\lambda + \mu) \frac{\partial \theta}{\partial z} + \mu \Delta u_z = 0; \end{cases} \quad (1.27)$$

где  $\Delta$  – оператор Лапласа;  $\theta = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}$ .

В области слоя касательные напряжения равны нулю и ими можно пренебречь. С помощью уравнений равновесия в форме Ламе (1.27) граничные условия записываются в перемещениях в виде [17]:

$$\begin{cases} z = -H: u_z = 0; \frac{\partial u_x}{\partial z} = 0; \frac{\partial u_y}{\partial z} = 0 \\ z = 0: (2\mu + \lambda) \frac{\partial u_z}{\partial z} + \lambda \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} \right) = -p(x, y); \\ \frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} = 0; \frac{\partial u_z}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial z} = 0 \\ \text{Боковая поверхность } \Gamma_2: \sigma_{ij} n_j = 0 \end{cases} \quad (1.28)$$

## 1.6 Компьютерное моделирование технологических процессов обработки металлов давлением

Разработана специальная методика для аналитического расчета контактных напряжений и на ее основе были определены зависимости для определения сил [14], что было использовано при прокатке полосы из идеально жесткопластического материала [12] и при ее продавливании через клиновую матрицу [13]. Вызывает трудности аналитический расчет процессов осесимметричного пластического деформирования [3], однако были получены формулы при упрощении расчетов. Для решения задачи пластического течения построена модель деформирования на прессе с комбинированными бойками для получения круглых поковок [11]. В порошковой металлургии для моделирования процесса горячей штамповки пористых заготовок используется метод координатной сетки [10, 115].

Физическое моделирование, как метод экспериментального изучения объектов, позволяет оценить особенности течения металла при горячей штамповке, формообразование поковки и правильность выбора заготовки, а также проверить результаты компьютерного моделирования. В статье [91] приводятся результаты физического моделирования процесса штамповки эндопротеза с помощью слоистой заготовки. Образование и форма облоя хорошо сопоставимы по результатам компьютерного моделирования с реальным экспериментом.

Ученые из зарубежных стран активно разрабатывают новые методы и расчетные схемы. В Европе интерес вызвали технологии в области горячей штамповки и изучение возможностей пластической деформации с использованием метода конечных элементов [56, 119, 168, 170, 173, 180].

Американские ученые уделяют внимание аналитическому моделированию [166] пластического формообразования [169] и влиянию трения [179] в процессе штамповки.

Японские ученые и инженеры особенно заинтересованы в применении методов и приемов моделирования обработки металлов давлением в различных отраслях машиностроения. Они используют осесимметричные задачи [167] и МКЭ в качестве инструмента при прогнозировании изменения формы поковки [172].

В отечественной литературе [128, 136] рассмотрены характеристики деформированного состояния, возникающего при выполнении различных операций обработки металлов давлением.

Важно отметить, что в последние несколько лет использование компьютерного программного обеспечения, такого как автоматизированное проектирование (САПР) или программное обеспечение на основе конечных элементов (КЭ), сыграло важную роль в повышении качества и производительности труда во многих кузнечных компаниях.

Аналоговое моделирование реализуется на компьютере благодаря

возможности построения 3D-моделей геометрических объектов с использованием различных графических программных пакетов.

В связи с расширением компьютерных приложений появился так называемый виртуальный эксперимент, позволяющий с высокой точностью моделировать пластическое изменение формы. Так с помощью ПО DEFORM был проведен виртуальный эксперимент по штамповке гаечного ключа из плоской заготовки [126], а также эндопротеза из различных заготовок [91].

Для оценки неравномерности формообразования можно использовать программный комплекс EQUI, разработанный на основе эквидистантной теории [127], позволяющий получить качественную картину течения металла. На основе совместного использования программного комплекса EQUI с компьютерной системой DEFORM можно получить результаты с высокой степенью достоверности.

### **1.6.1 Влияние температуры нагрева заготовки на технологические параметры штамповки**

По результатам компьютерного моделирования упругопластического формоизменения заготовок [108] из сталей установлено, что при понижении температуры заготовки до 800 °С наблюдается рост силы штамповки на 25 %, а контактного давления на 14 %.

Выбор температурного диапазона штамповки подтверждается графическими зависимостями [112] напряжения течения, допустимой пластической деформации и интенсивности образования окалины от температуры деформации для сталей основных конструкционных групп.

Авторами [9] проведено экспериментальное исследование штамповки на кривошипно-шатунном прессе силой 25 МН при изготовлении машиностроительных поковок горячей объемной штамповкой с высокой и низкой термомеханической обработкой в зависимости от температуры

формообразования и степени деформации для сталей 12Х2Н4А, 18Х, 40ХНМА. Штамповая оснастка не нагревалась. Непонятно, как измерялась температура заготовки. Поскольку износ штампа определяется работой истирания полости штампа, снижение температуры заготовки до 800 °С увеличит износ ручья штампа на 30 %.

При штамповке сплавов особенно важно предотвратить возникновение дефектов, связанных с перегревом в результате теплового эффекта деформации [76]. Уменьшить износ штампа можно подготовкой штампа с помощью смазки, рационально использовать теплую смазку, например, Берулит 935. Также в качестве смазки используют отработанное моторное либо трансмиссионное масло [91]. Причем смазывать нужно как штамп, так и заготовку.

### **1.6.2 Обзор возможностей программных комплексов, основанных на методе конечных элементов**

Развитие вычислительной техники и программного обеспечения для компьютерного моделирования дает возможность использования специальных программ: ANSYS, Abaqus, Mars, DEFORM, QForm-3D [27]. Они позволяют выбирать материал из стандартных библиотек, имеют возможности постановки и решения краевых задач пластического деформирования.

С помощью программы ANSYS решают задачи для конструкционных материалов в состоянии сверхпластичности и задачи расчета параметров очагов деформаций при прокатке [8]. Там же был произведен автоматизированный расчет [22] и проектирование шаровых пальцев для различных шарнирных соединений. Результаты моделирования в программных комплексах в SolidWorks [4] хорошо согласуются с данными реальных процессов.

Предложен алгоритм штамповки изделий без штамповочных уклонов,

реализуемый компьютерной программой [108]. Напряженно-деформированное состояние может быть исследовано с помощью численного моделирования: программой MSC SuperForge получили и определили основные закономерности распределения напряженно-деформированного состояния и температуры для моделирования с различными штамповочными уклонами.

### **1.6.3 Компьютерное моделирование картины течения металла**

Компьютерное моделирование картины течения металла позволяет получить схему формообразования поковок. Штамповка происходит при силах трения, поэтому «нормальная» схема течения предпочтительнее радиальной.

При осаживании необходимо знать углы поворота основных направлений относительно координатных осей. Использование программ QForm-3D и DEFORM связано со сложностью постановки граничных условий. Была создана программа на основе метода главных траекторий, проводящая экспресс-анализ влияния технологических факторов на течение [85, 86].

На этапе постановки задачи необходимо вводить значения параметров, определяемых экспериментально, что не всегда осуществимо [153], поэтому разрабатываются программные продукты для моделирования процесса штамповки без штамповочных уклонов [108], а также системы формирования инструмента в виде модуля, позволяющего взаимодействовать с другими системами [123].

Для процессов ОМД, в которых характерно растяжение полотна (волочение) с ярко выраженными плоскими участками, основную проблему при проектировании картины течения металла можно рассматривать на плоскости контакта инструмента с пластичной заготовкой.

Виртуальные эксперименты для моделирования технологических

процессов на металлургических и машиностроительных предприятиях с использованием современных CAD/CAE систем, прогнозирующих формообразование, позволяют точно моделировать процессы и устройства на всех этапах производства, что значительно повышает качество продукта и его технологичность.

## 1.7 Выводы по главе 1

1. Несмотря на большое разнообразие технологий горячей объемной штамповки тонкопалотных поковок на молотах и другом кузнечно-штамповочном оборудовании, общим недостатком является большое количество переходов от 3 до 6.

2. Снижение количества ударов до одного существенно повышает производительность и снижает энергозатраты при эксплуатации оборудования.

3. Для сокращения времени контакта нагретой заготовки со штампом целесообразно использовать молот с 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.

4. Необходимо снизить температурный интервал горячей штамповки для снижения влияния температурного эффекта деформации, который резко повышает температуру металла заготовки, что может привести к браку по температурным показателям.

5. Аналитические зависимости для определения давления на поверхностях контакта деформируемого металла и штампового инструмента, а также интегральные уравнения для оценки сил деформирования могут быть получены с использованием теории нестационарного течения в тонком слое.

## **Глава 2. Проектирование новых вариантов технологических процессов горячей объемной штамповки тонкопалотных поковок на примере гаечных ключей с учетом специфики их реализации на импакторе**

### **2.1 Выбор детали представителя**

Повышение рентабельности технологии горячей объемной штамповки связано с уменьшением нормы расхода металла при штамповке поковок и достижением наивысших показателей производительности процессов формоизменения при минимизации последующей механической обработки. Большую номенклатуру деталей, удлиненных в плане и имеющих элементы в виде тонких палотен, можно объединить в отдельный класс по конструктивно-технологическим признакам, что обеспечит единство подходов технологической подготовки заготовительного производства способами обработки давлением. Точность и качество получаемых поковок зависит не только от правильного выбора исходной заготовки для конкретной штамповочной операции, но и от точности применяемого оборудования и инструмента.

Анализируя потребность в тех или иных деталях из обсуждаемого класса, приходим к выводу, что без слесарного инструмента, к которому, в частности, относятся гаечные ключи с открытым зевом, не обходится ни одна сфера человеческой деятельности. Как было отмечено в разделе 1.2 размерный ряд этих представителей, включающий диапазон зевов от 2,5 до 80 мм и более, является внушительным. С учетом разнообразия исполнения [40, 41, 150] эта продукция является массовой.

Технологии горячей объемной штамповки ключей гаечных являются типовыми и реализуются на штамповочных шаботных молотах вертикальной компоновки или на бесшаботных молотах с встречным движением подвижных масс вертикальной компоновки [75]. Однако самой производительной

является технология с использованием как минимум трех ударов молотом, что в свою очередь может приводить к перекоосу заготовки, заштамповке облоя и прочим дефектам изготовления. Коэффициент использования материала (КИМ) при штамповке заготовок круглого сечения по таким технологиям является низким, и существует ряд проблем, связанных с незаполнением полости ручья и вызванных рядом факторов, в числе которых находятся форма и размеры заготовки, а также условия теплообмена заготовки со штампом. Влияние названных факторов можно минимизировать, используя молота горизонтальной компоновки (импакторов) с встречным движением ударных масс в составе автоматизированных комплексов с гарантированной загрузкой этого вида оборудования.

## **2.2 Проектирование чертежа поковки**

В качестве детали представителя был выбран гаечный ключ 7811-0001 по ГОСТ 2839-80 [36]. Один из первых этапов проектирования технологии горячей штамповки предполагает разработку чертежа поковки в соответствии с ГОСТ 7505-89 [39]. Используя методику, изложенную в справочной литературе [143], необходимо произвести предварительные расчеты для определения исходного индекса поковки. Используя индекс поковки, номинальные размеры детали, их точность и шероховатость поверхностей, назначают припуски, допуски и напуски.

Обозначение детали в соответствии со стандартом – Ключ 7811-0001 D1 X9 ГОСТ 2839-80.

В части используемого оборудования учитывалась специфика работы горизонтального молота (импактора) ГШМ-4 с электронно-гидравлической системой управления [74].

Нагрев заготовки – индукционный.

Материал заготовки – сталь 40Х ГОСТ 4543-2016 [36] имеет следующий

химический состав: 0,36-0,44 % С; 0,17-0,37 % Si; 0,50-0,80 % Mn; 0,80-1,10 % Cr.

Масса детали  $M_d = 0,006681$  кг. Расчетная масса поковки:  $M_{п} = K_p \times M_d$ . Расчетный коэффициент, согласно ГОСТ 7505-89 [38], выбран  $K_p = 1,4$ .

Тогда расчетная масса поковки  $M_{п} = 1,4 \times 0,006681 = 0,0093534$  кг.

При штамповке на молотах выбираем из таблицы ГОСТ 7505-89 класс точности поковки – Т4.

В соответствии с содержанием углерода и легирующих элементов в используемой стали, группа стали – М2.

Степень сложности, являющаяся отношением массы поковки к массе простой описанной фигуры ( $M = 0,3$ ) – С3.

По таблице ГОСТ 7505-89 определяем исходный индекс поковки – 9.

Будем использовать плоскую конфигурацию поверхности разъема штампа.

Согласно ГОСТ 2838-80 Шероховатости поверхностей (Исполнение 1) [35]: опорные поверхности ключей с открытым зевом имеют шероховатость  $Ra < 1,25$ ; наружный контур -  $Ra < 2,5$ ; рабочая поверхность зевов ключей -  $Ra < 5$ ; остальные поверхности -  $Ra < 10$ .

Основной припуск на размер - 1,4 мм. Припуски, учитывающие смещение по поверхности разъема штампа - 0,1 мм. Припуски, учитывающие отклонение от плоскостности и прямолинейности - 0,3 мм.

Определяем размеры поковки с учетом назначаемых припусков.

Длина  $80 + (1,5 + 0,1) \times 2 = 83,2$  мм, принимаем 80 мм (припуски на длину не учитываем); Ширина  $4 - (0,3 + 1,4) \times 2 = 0,6$  мм, принимаем 0 мм (зев ключа в поковке будет сплошным); Ширина  $5 - (0,3 + 1,4) \times 2 = 1,6$  мм, принимаем 2 мм; Глубина опорной поверхности  $5 + (0,1 - 1,4) = 3,7$  мм, принимаем 4 мм; Глубина опорной поверхности  $6 + (0,1 - 1,4) = 4,7$  мм, принимаем 5 мм; Толщина  $3 + (0,3 + 1,4) \times 2 = 6,4$  мм, принимаем 6,5 мм. Минимальный радиус закругления наружных углов 1,0 мм. Допускаемые отклонения размеров длины 80 (+0,9; -

0,5). Неуказанные предельные отклонения размеров (+0,8; -0,4). Допускаемая величина заусенца 2,0 мм. Допускаемая величина остаточного облоя 0,5 мм. Неуказанные допуски радиусов закругления 1,0 для R=3...4 мм; 2,0 для R=4...6 мм; 3,0 для R=6...10 мм; 5,0 для R=10...16 мм; 8,0 для R=16...25 мм; 12,0 для R=25...40 мм.

Используя расчетные размеры поковки с учетом припусков, составлен чертеж поковки (рисунок 2.1), который является прототипом для создания 3D-моделей самой поковки и штамповой оснастки.

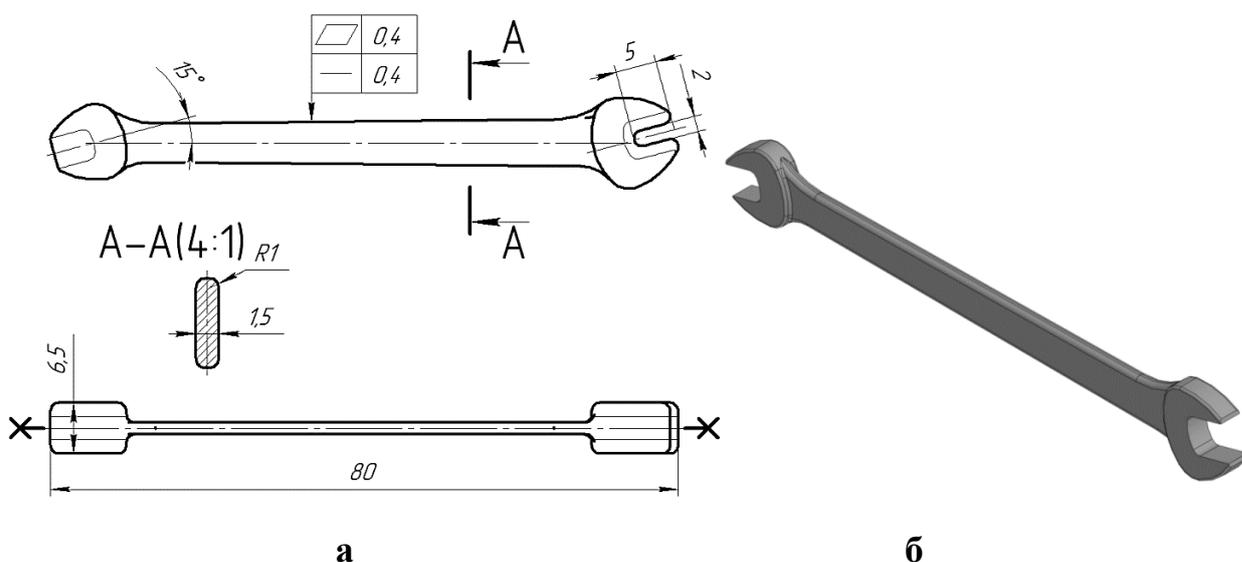


Рисунок 2.1 – Ключ гаечный 4×5: а – чертеж поковки; б - 3D-модель ключа

### 2.3 Определение параметров заготовки для ГОШ

В соответствии с классификационными признаками поковок, штампуемых на молотах, имеем [142]: Группа I. Поковки, штампуемые перпендикулярно оси заготовки. Виды штампов и ручьев: 1. Поковки с прямой линией разреза. А. Поковки с простыми поперечными сечениями, получаемые при незначительном выдавливании металла. Облойную канавку типа I используют в большинстве случаев (рисунок 2.2) [74, 142]. Она обеспечивает большую стойкость мостика, так как верхний штамп обычно прогревается меньше.

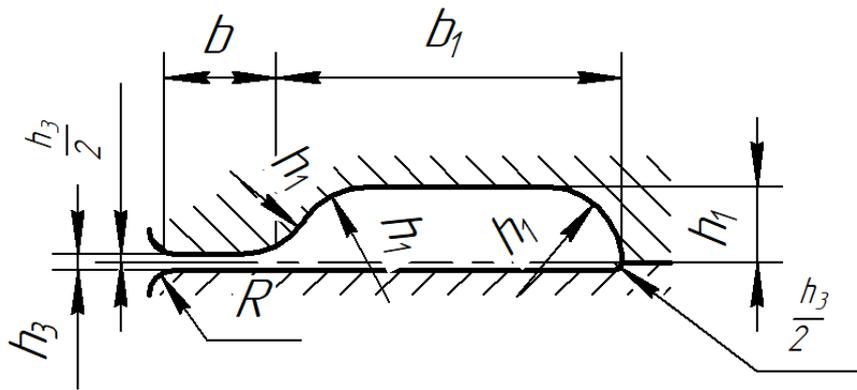


Рисунок 2.2 – Параметры облойной канавки

Толщина облоя в мостике [142]:

$$h_3 = 0,015 \cdot \sqrt{F_{\Pi}}. \quad (2.1)$$

$F_{\Pi} = 77 \text{ мм}^2$ , тогда  $h_3 = 0,131$ . Результат сравниваем с ближайшим размером и принимаем  $h_3 = 0,6$  и определяем номер облойной канавки №1. Другие размеры канавки:  $h_1 = 3 \text{ мм}$ ;  $R = 1 \text{ мм}$ .

Значения ширины мостика и магазина при штамповке выдавливанием в случае несложной формы поковки (№2):  $b = 6 \text{ мм}$ ;  $b_1 = 20 \text{ мм}$ ; а также площадь поперечного сечения канавки для облоя  $S_{зк} = 0,61 \text{ см}^2$ .

Объем  $V_3$  [142]:

$$V_3 = S_3 \cdot p_{\Pi}. \quad (2.2)$$

где  $p_{\Pi}$  – периметр поковки по центру тяжести облоя, находящийся на расстоянии  $\frac{b+b_1}{2}$  от  $p_{\Pi}$ .

Средняя площадь поперечного сечения облоя [142]:

$$S_3 = \zeta \cdot S_{зк}. \quad (2.3)$$

где  $\zeta = 0,5$  – коэффициент, учитывающий степень заполнения облойной канавки.

Периметр поковки на расстоянии 13 мм:  $p_{\Pi} = 256 \text{ мм}$ .

$$V_3 = 0,5 \cdot 0,61 \text{ см}^2 \cdot 25,6 \text{ см} = 7,808 \text{ см}^3$$

Построение расчетной заготовки и эпюры сечений [142]:

$$S_9 = S_{\Pi} + 2S_3 = S_{\Pi} + 2 \cdot \zeta \cdot S_{зк}, \quad (2.4)$$

где  $S_9$  – площадь поперечного сечения расчетной заготовки;  $S_{\Pi}$  – площадь

поперечного сечения поковки с добавлением к вертикальным размерам половины положительного отклонения;  $S_{зк}$  – площадь сечения облойной канавки.

Диаметр расчетной заготовки [142]:

$$d_3 = 1,13\sqrt{S_3} \quad (2.5)$$

Рассчитав  $d_3$ , получают чертеж расчетной заготовки или эпюру приведенных диаметров [47]. Все расчетные данные заносят в таблицу (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Параметры эпюр сечений и диаметров

Номер сечения	Площадь сечения поковки, мм <sup>2</sup>	Площадь сечения расчетной заготовки, мм <sup>2</sup>	Расчетный диаметр, мм
1	22,3	83,3	10,31
2	53,3	114,3	12,08
3	64,4	125,4	12,65
4	65,65	126,65	12,72
5	49,37	110,37	11,87
6	10,56	71,56	9,56
7	9,27	70,27	9,47
8	9,25	70,25	9,47
9	9,32	70,32	9,48
10	9,39	70,39	9,48
11	10,07	71,07	9,53
12	10,96	71,96	9,59
13	11	72	9,59
14	11,47	72,47	9,62
15	12,93	73,93	9,72
16	56,6	117,6	12,25
17	77,14	138,14	13,28
18	78,22	139,22	13,33
19	55,33	116,33	12,19
20	38	99	11,24
21	10,6	71,6	9,56

Чтобы получить эпюру поперечных сечений расчетной заготовки,

необходимо в масштабе  $M$  отложить по ординатам величины площадей характерных сечений  $S_3$  в виде отрезков,  $M = 10$  [142]:

$$h_3 = \frac{S_3}{M}, \quad (2.6)$$

и соединить концы этих отрезков.

Площади отдельных элементов представляют собой величину объемов соответствующих элементов расчетной заготовки в масштабе  $M$  [142]:

$$V_x = F_{эx} \cdot M, \quad (2.7)$$

где  $V_x$  – объем элемента расчетной заготовки;  $F_{эx}$  – площадь соответствующего элемента эпюры сечений.

Полный объем заготовки равен:

$$V_3 = 7808 + 1528 = 9336 \text{ мм}^3.$$

Средней расчетной заготовкой называют цилиндр диаметром  $d_{cp}$ , длиной  $l_3 = l_n$ , и объемом  $V_{пз}$ , равным сумме объемов поковки  $V_{п}$  и облоя  $V_o$ :

Площадь сечения средней расчетной заготовки [142]:

$$S_{cp} = \frac{V_{пз}}{l_{п}} = \frac{V_3}{l_3} \quad (2.8)$$

$$S_{cp} = 9336 / 80 = 116,7 \text{ мм}^2.$$

Диаметр средней расчетной заготовки [142]:

$$d_{cp} = 1,13 \sqrt{S_{cp}} \quad (2.9)$$

$$d_{cp} = 12,2 \text{ мм}.$$

Расчетной заготовке будет соответствовать элементарная эпюра сечений (рисунок 2.3).

В соответствии с полученными размерами расчетной заготовки определяют общий коэффициент подкатки  $K_{по}$  по формуле [142]:

$$K_{по} = \frac{S_{max}}{S_{cp}} = \frac{d_{max}^2}{d_{cp}^2} \quad (2.10)$$

$$K_{по} = 146,7 / 116,7 = 1,26.$$

При штамповке поковок 1-й подгруппы применяют ручей 3-I-1.

$$\alpha = \frac{d_{max}}{d_{cp}} = \frac{13,7}{12,2} = 1,12. \beta = \frac{l_3}{d_{cp}} = \frac{84}{12,2} = 6,88. G_{п} = 0,00668 \text{ кг.}$$

В качестве заготовительных переходов следует применить пережимной ручей (по А.В. Ребельскому [114], рисунок 2.4).

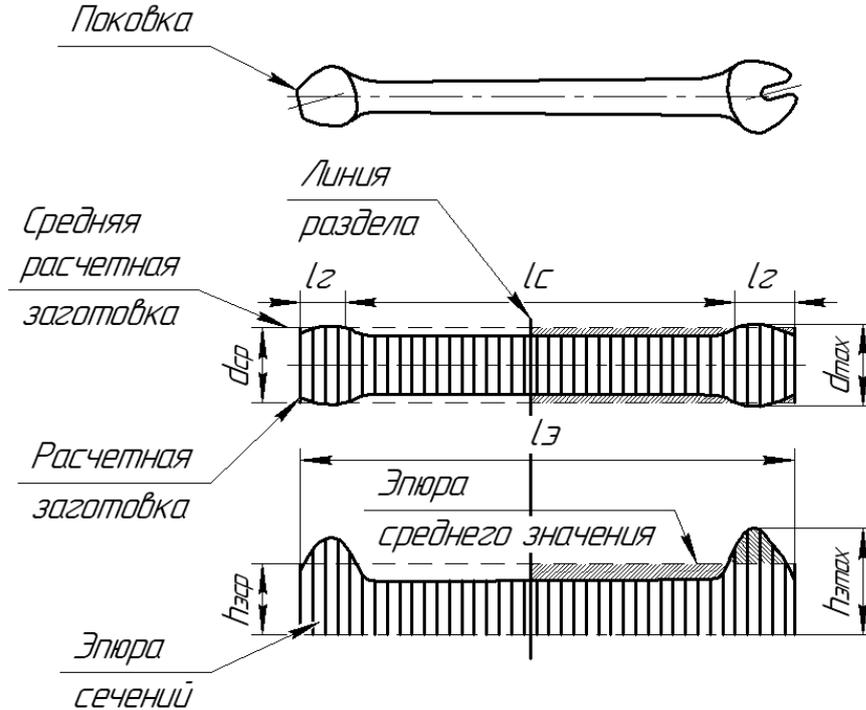


Рисунок 2.3 – Элементарная расчетная заготовка и ее этюра сечений (по А.В. Ребельскому [114])

Для поковок 1-й подгруппы типа А применяют окончательный ручей. Для поковки I-1-А пережимной ручей не применяется. Следовательно, заготовительный ручей – формовочный, штамповочный ручей – окончательный.  $K_{пр} = 1,2 \cdot 1,05 = 1,26$ ;  $K_{по} = 1,26$ .

Размеры исходной заготовки определяют исходя из расчетной заготовки и принятой комбинации переходов штамповки. Объем заготовки на одну поковку  $V_{зг}$  [142]:

$$V_{зг} = S_{зг} \cdot l_{зг} \quad (2.11)$$

Объем заготовки  $V'_{зг}$  с учетом потерь (без клещевины) определяют по формуле [142]:

$$V'_{зг} = V_{пз} \frac{100 + \delta}{100} \quad (2.12)$$

где  $V_{пз} = V_{п} + V_{з}$  – суммарный объем поковки и облоя;  $\delta$  – угар металла в %.  $\delta = 0,65\%$  при двустороннем нагреве.

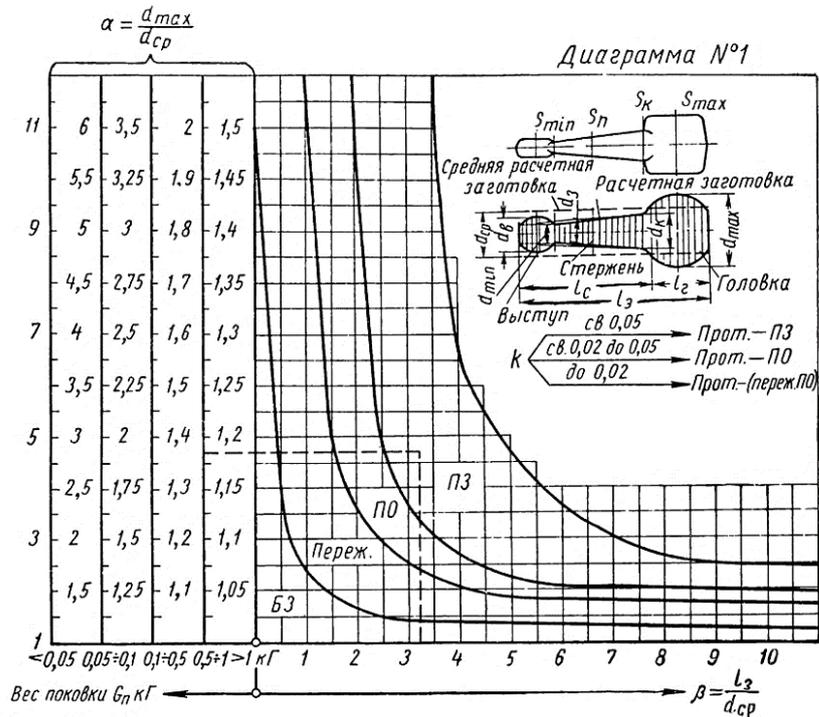


Рисунок 2.4 – Диаграмма пределов применения заготовительных ручьев по А.В. Ребельскому

Объем поковки  $V_{п} = 9,4 \text{ см}^3$ .  $V'_{зг} = 9,4 \cdot (100 + 0,65) \cdot 0,01 = 9,5 \text{ см}^3$ .

Для формовочного перехода площадь поперечного сечения [142]:

$$S'_{зг} = (1,05 - 1,3)S_{ср} \quad (2.13)$$

Принимаем  $S'_{зг} = 1,05 \cdot 1,167 = 1,22 \text{ см}^2$ . Определив  $S'_{зг}$  подбирают квадратный или круглый сортовой прокат с ближайшей большей к ней площадью поперечного сечения, найдя таким образом  $A_{зг}$  или  $D_{зг}$ . Согласно ГОСТ 2591-2006 [34]:  $A_{зг} = 13,0 \pm 0,4 \text{ мм}$ . Согласно ГОСТ 2590-2006 [33]:  $D_{зг} = 13,0 \pm 0,4 \text{ мм}$ .

Традиционной технологией изготовления удлиненных в плане поковок, в том числе гаечных ключей является горячая объемная штамповка на молотах вертикальной компоновки. К недостаткам известной технологии относится необходимость штамповки в нескольких ручьях: протяжном, формовочном, предварительном, окончательном и отрубном, что снижает

производительность, т.к. число ударов, наносимых по заготовке равно или больше количества ручьев молотового штампа.

При использовании импакторов рациональнее применять заготовки, максимально приближенные к форме готовых поковок, полученные вальцовкой на ковочных вальцах, профилированные поперечно-винтовой, радиально-сдвиговой или поперечно-клиновой прокаткой. Это дает возможность свести число ударов подвижных частей до одного и частично снимает проблему позиционирования заготовки в рабочей зоне импактора перед соударением подвижных масс.

## **2.4 Новые способы штамповки тонкополотных поковок на примере гаечного ключа на горизонтальном молоте**

Рассмотрим возможные способы горячей объемной штамповки поковки гаечного ключа на молоте горизонтальной компоновки – импакторе.

Специфика способа изготовления гаечных ключей пластическим деформированием на импакторе заключается в необходимости использования устройств подачи заготовок в рабочую зону машины, точного позиционирования и удержания их в месте соударения ударных масс до нанесения удара. 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.

### **2.4.1 Использование предварительного профилирования длинномерных непрерывных заготовок перед окончательной штамповкой**

**Вариант 1.** В качестве исходного материала используют сортовой

прокат круглого сечения диаметром  $D_3$ , равным среднему диаметру расчетной заготовки (рисунок 2.3). Длинномерную заготовку с помощью приводного рольганга подают в проходной индуктор, где [99] нагревают до температуры  $T_1$ , удовлетворяющей неравенству  $(G + \Delta T_1)^\circ C \leq T_1 \leq (N - \Delta T_1)^\circ C$ , и затем подают на стан поперечно-винтовой прокатки, где получают профильный прокат из стыкующихся заготовок в форме двух недеформированных участков под головки зевов гаечного ключа (рисунок 2.5), соединенных прокатанным участком меньшего диаметра  $d$  общей длиной заготовки равной длине поковки ключа  $L_n$ .

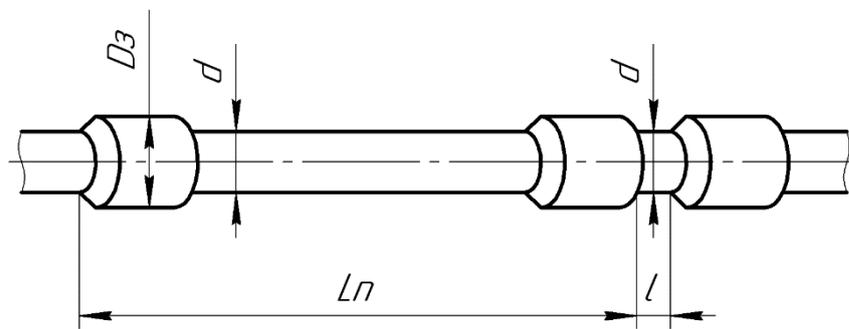


Рисунок 2.5 – Заготовка, профилированная поперечно-винтовой прокаткой

При этом смежные заготовки соединяют между собой прокатанным участком длиной  $l$ . Затем полученный профильный прокат с остаточной температурой  $T_2$ , удовлетворяющей неравенству  $(G)^\circ C < T_2 \leq (G + \Delta T_2)^\circ C$ , подвергают подогреву в проходном индукторе до восстановления температуры  $T_1$  и осуществляют продольную прокатку разгонкой с получением плоскостной заготовки толщиной на 2 мм больше толщины поковки гаечного ключа (рисунок 2.6а).

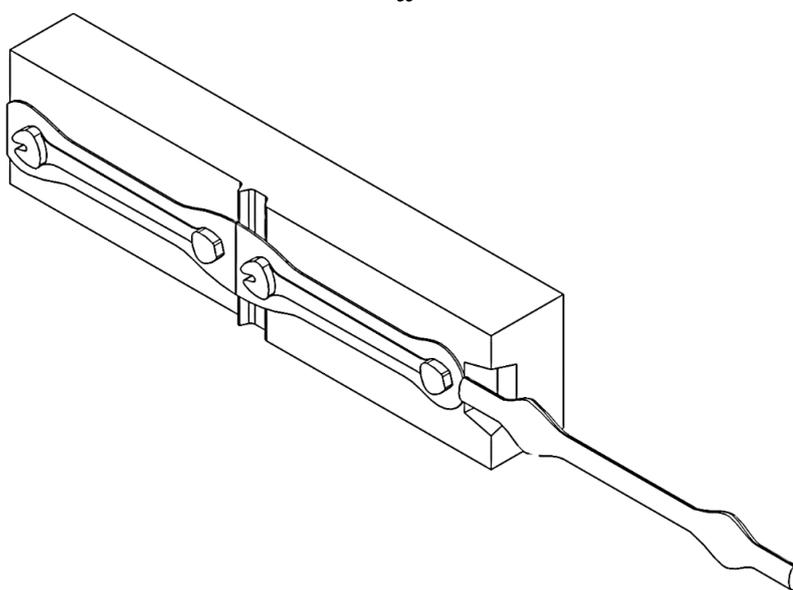
Затем плоскую заготовку, имеющую остаточную температуру  $T_2$ , дополнительно нагревают в проходном индукторе до восстановления температуры  $T_1$  и подают с шагом  $h = L_n + l/2$  на молот с горизонтальным расположением ударных масс, на котором с помощью штампа деформируют за один удар часть длиномерной заготовки, приходящуюся на одну поковку. Одновременно с этим отштампованную поковку гаечного ключа при смыкании половин штампа отделяют от длиномерной заготовки в отрубном

ручье. На заключительном этапе обработки в обрезающем штампе поштучно обрезают облой при остаточной температуре поковки  $T_2$  с получением готовой поковки.

В приведенных неравенствах  $\Delta T_1=142^\circ\text{C}$ ;  $\Delta T_2=60^\circ\text{C}$ ; температуры точек  $G$  и  $N$  диаграммы «железо-углерод», соответствующие полиморфному превращению  $\alpha\leftrightarrow\gamma$   $G=910^\circ\text{C}$ ,  $N=1392^\circ\text{C}$ .



**а**



**б**

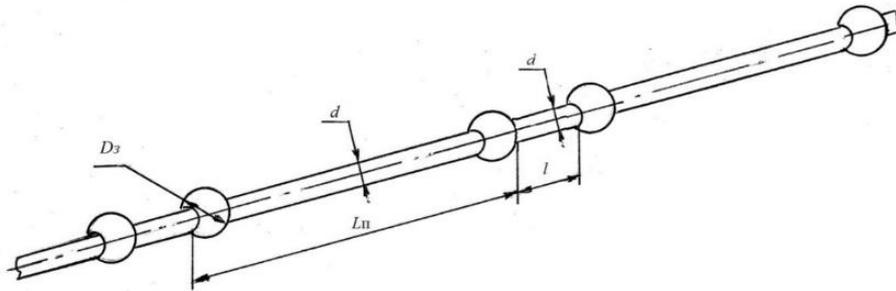
Рисунок 2.6 – Заготовки: а - после продольной прокатки на плоскость; б - после окончательной штамповки на импакторе и отделения от непрерывной заготовки

Предварительное формоизменение заготовки позволяет проводить окончательную штамповку на импакторе за один удар подвижных масс.

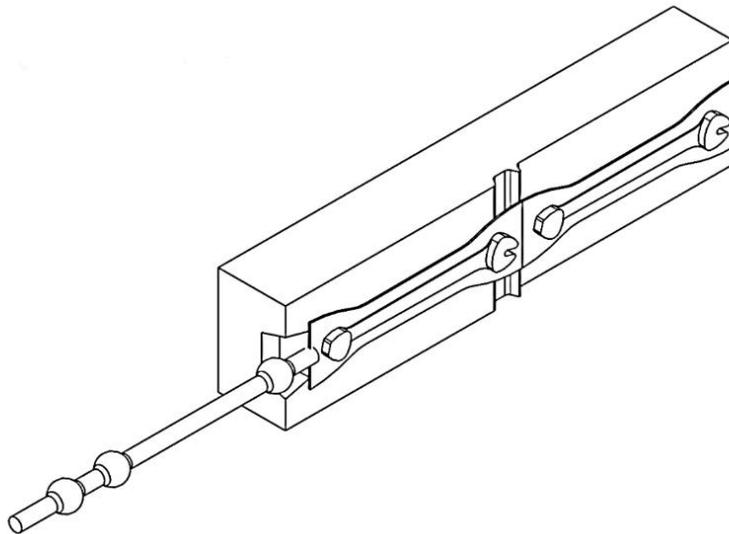
**Вариант 2.** Способ предварительного профилирования длинномерных заготовок заключается в применении в качестве заготовительной операции радиально-сдвиговой прокатки [101].

В этом случае из предварительно нагретой до температуры  $T_1$  заготовки круглого сечения диаметром  $D_3$  образуют периодический прокат из

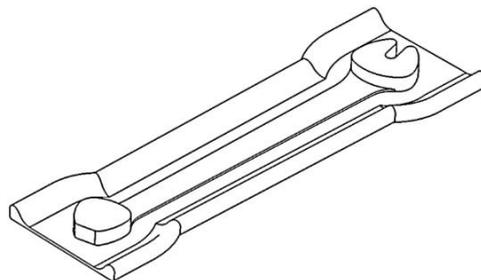
стыкующихся заготовок в форме двух шарообразных участков диаметром  $D_3$  под головки будущих зевов гаечного ключа, соединенных между собой прокатанным на диаметр  $d$  участком, общей длиной заготовки под гаечный ключ, равной длине поковки  $L_{п}$ , при этом смежные заготовки соединяют между собой участком диаметром  $d$  и длиной  $l$  (рисунок 2.7а).



**а**



**б**



**в**

Рисунок 2.7 – Варианты заготовки: а - профилированная радиально-сдвиговой прокаткой; б - поковки, штампованные из непрерывной заготовки на импакторе за один удар; в - поковка с обломом, отделенная от непрерывной заготовки

Затем полученный периодический прокат с остаточной температурой  $T_2$ , подают с шагом  $h = L_n + \frac{l}{2}$  на молот с горизонтальным расположением ударных масс, на котором с помощью штампа деформируют за один удар часть длинномерной заготовки, приходящуюся на одну поковку, одновременно с этим ранее отштампованную поковку гаечного ключа при смыкании половин штампа отделяют от длинномерной заготовки (рисунок 2.7б), а обрезку облоя производят поштучно с помощью обрезного штампа, установленного на обрезном прессе, с получением готовой поковки.

Вариант технологического процесса ГОШ, реализуемой на импакторе из непрерывной длинномерной предварительно профилированной заготовки, показан на рисунке 2.8.

Пруток круглого сечения проходит правку в валковом правильном агрегате, затем подвергается радиально-сдвиговой прокатке для получения заготовки периодического проката. Предварительный нагрев до температуры горячей штамповки производится в проходном индукторе.

Нагретая заготовка поступает в рабочую зону импактора с заданным шагом, чтобы часть непрерывной заготовки, приходящаяся на одну поковку, позиционировалась в месте соударения подвижных масс. Далее процесс может быть организован по-разному.

При открытой штамповке с обломом либо каждая поковка отделяется от длинномерной заготовки, как было показано ранее (рисунок 2.7), либо отрезаются мерные части, содержащие несколько поволоков с обломом, поступающие на обрезку, ограничением на длину является удобство при манипулировании такими заготовками при обрезке облоя.

В случае штамповки в закрытом штампе отштампованная поковка одновременно отделяется от непрерывной заготовки и транспортером или по желобу удаляется из рабочей зоны оборудования.

**Вариант 3.** Из нагретой до температуры  $T_1$  в проходном индукторе полосы получают непрерывную плоскую заготовку поэлементной отрезкой

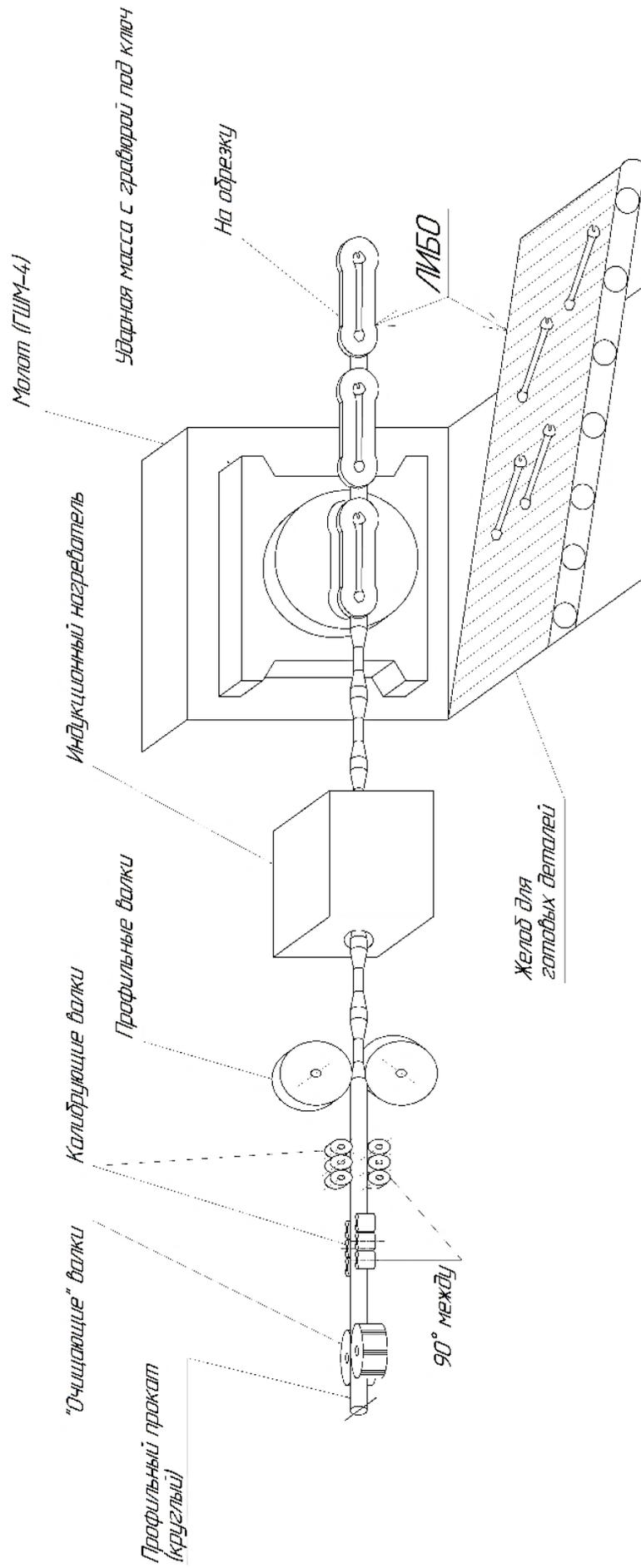
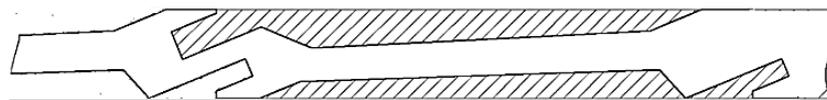
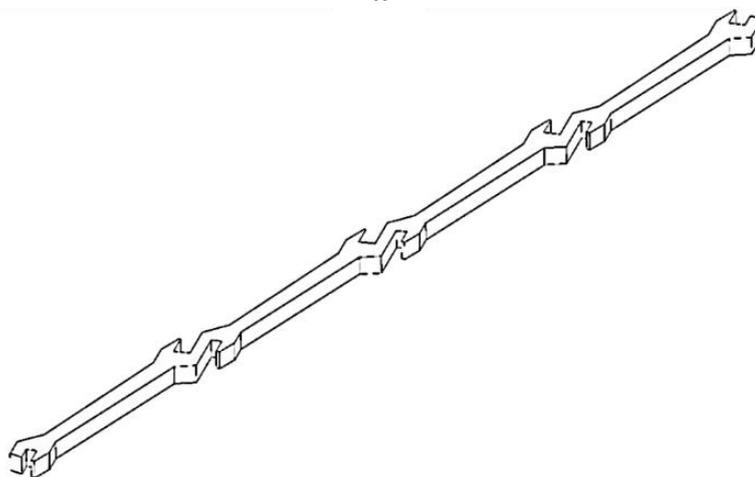


Рисунок 2.8 – Схема технологического процесса ГОШ поковок гачных ключей на импакторе

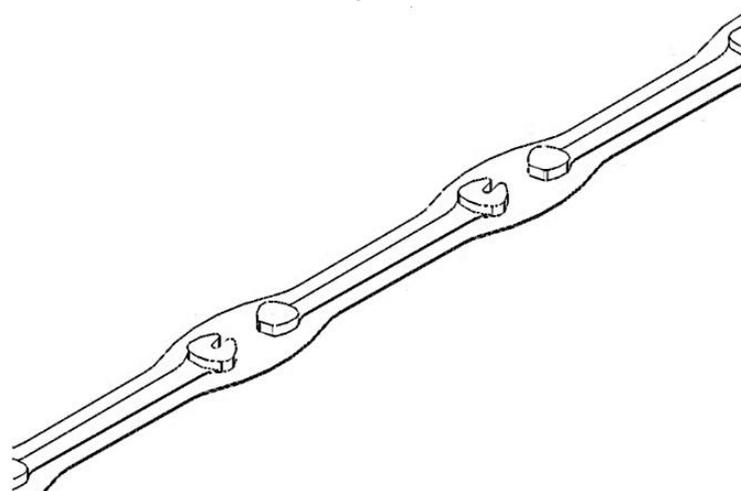
противоположных удаляемых участков с образованием участков под рукоятку гаечного ключа (рисунок 2.9а) [100].



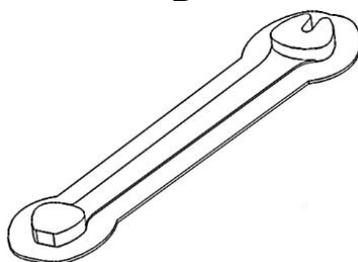
**а**



**б**



**в**



**г**

Рисунок 2.9 – Получение длинномерной заготовки и поковки гаечного ключа с облоем: а - раскрой полосы; б – длинномерная плоскостная заготовка; в, г – поковки с облоем

Одновременно производят оформление пазов в местах расположения зевов гаечных ключей. Смежные заготовки соединяют головками и получают на стыке S-образный участок (рисунок 2.9б).

Затем при остаточной температуре  $T_2$  заготовку ориентируют поворотом на  $90^\circ$  и подают на позицию соударения ударных масс молота. За один удар деформируют участок плоской заготовки, приходящийся на одну поковку гаечного ключа. Одновременно отделяют в отрубном ручье отштампованную поковку. В результате обеспечивается уменьшение количества штамповочных операций и транспортировка заготовки на этапах обработки и позиционирование в месте соударения подвижных масс молота.

**Вариант 4.** Вырубкой получают заготовку с утолщениями на концах под головки ключа [102]. Смежные заготовки соединяют утолщениями с получением общего участка, в середине которого пробивают отверстие удлиненной формы под зевы смежных ключей (рисунок 2.10а).

Полученную заготовку сначала нагревают в проходном индукторе до температуры горячей штамповки, а затем подают с необходимым шагом на молот с горизонтальным расположением ударных масс. С помощью штампа деформируют за один удар участок периодического профиля, приходящийся на одну поковку (рисунок 2.10б). Отштампованную поковку гаечного ключа при соударении половин штампа отделяют от профильной заготовки в отрубном ручье, расположенном соосно со штамповочным ручьем (рисунок 2.10в).

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 плоскостной заготовки в штампе за один удар.

**Вариант 5** предусматривает использование многошпунтовой штамповки поволоков [91, 114] из одной заготовки круглого сечения, примером может служить технологический процесс горячей штамповки одновременно 2-х

поковки, как показано на рисунке 2.11.

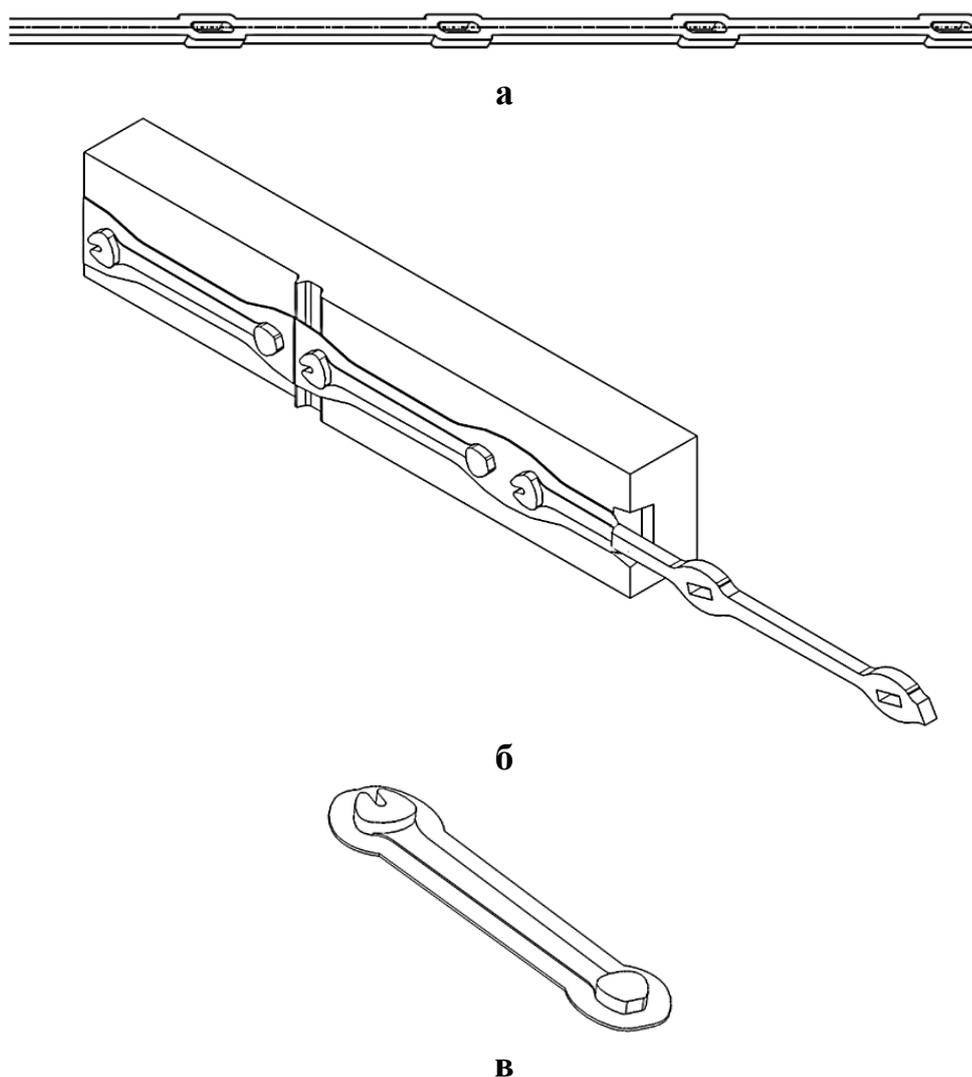


Рисунок 2.10 – Схема штамповки поковки гаечного ключа: а - плоская заготовка, полученная из полосы операциями вырубki и пробивки; б – поэтапная штамповка длинномерной заготовки; в – поковка с облоем

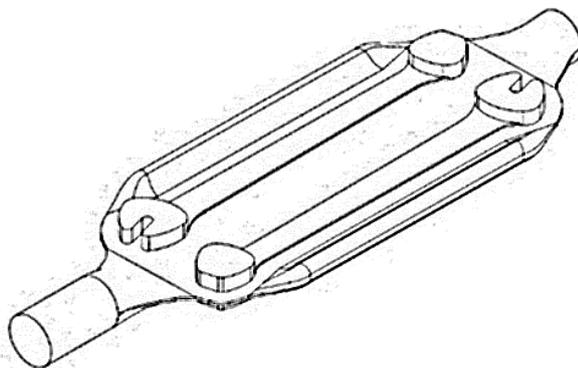


Рисунок 2.11 – Многоштучная штамповка участка, рассчитанного на две поковки с облоем, длинномерной непрерывной заготовки

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  $L_{\text{п}}$  объем соответствовал сумме удвоенного объема поковки и удвоенного объема облоя с необходимым коэффициентом заполнения облойной канавки.

**Вариант 6** исполнения заготовки предусматривает возможность использования штучной, так называемой Z-образной заготовки (рисунок 2.12а), которая отделяется от полосового проката (ГОСТ 103 – 2006 [30]) либо от цельного листового проката (ГОСТ 19903 – 2015 [32]), изначально отрезав полосы нужной ширины, или лист раскраивается с помощью автоматизированного комплекса лазерной отрезки.

Поясним обозначения рисунка 2.12а:

$A_1$  – длина прямолинейного участка верхней части контура заготовки;

$A_2$  – длина прямолинейного участка, соединяющего дуги окружностей радиусами  $R_1$  и  $R_2$  (верхняя часть заготовки);

$A_3$  – длина прямолинейного участка нижней части контура заготовки;

$A$  – длина прямолинейного участка средней части контура заготовки;

$R_1$  – радиус дуги окружности, пересекающей верхний прямолинейный участок контура заготовки;

$R_2$  – радиус дуг окружностей, образующих сопряжением верхний и нижний криволинейный участок контура левого утолщения заготовки;

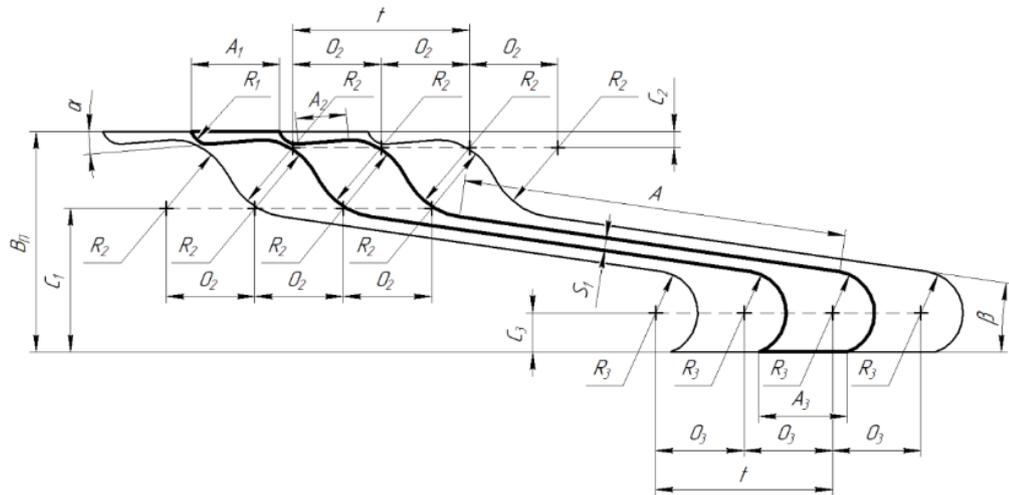
$R_3$  – радиус дуг окружностей, образующих криволинейные участки контура нижней части заготовки, пересекающих нижний прямолинейный участок  $A_3$  контура заготовки;

$B_{\text{п}}$  – ширина рулона ленты или полосы;

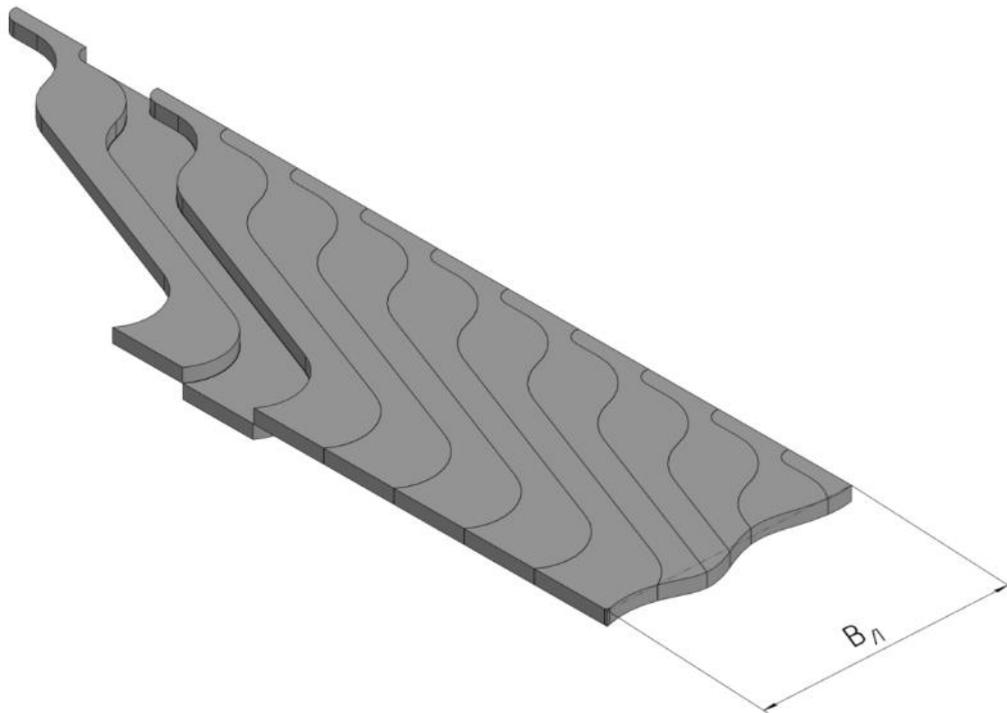
$C_1$  – расстояние до линии расположения центров кривизны дуг окружностей радиусом  $R_2$  верхней части фигурного контура левого утолщения заготовки;

$C_2$  – расстояние до линии расположения центров кривизны дуг окружностей

радиусом  $R_2$  нижней части фигурного контура левого утолщения заготовки;  
 $C_3$  - расстояние до линии расположения центров кривизны дуг окружностей радиусом  $R_3$ , образующих криволинейные участки контура нижней части заготовки;



**а**



**б**

Рисунок 2.12 – Раскрой полосы: а - параметрический чертеж раскроя для полосового, либо листового проката; б - размещение плоских штучных заготовок в полосе и позиция двухсторонней отрезки

$S_1$  – ширина среднего прямолинейного участка контура, соединяющего

верхнее и нижнее утолщения заготовки;

$\alpha$  – угол между прямолинейными участками  $A_1$  и  $A_2$ , профилирующих отросток специальной формы;

$\beta$  – угол наклона контура среднего участка заготовки к краям рулона ленты или полосы;

$O_2$  – межосевое расстояние между центрами кривизны дуг окружностей, образующих утолщение (левое) заготовки;

$O_3$  – межосевое расстояние между центрами кривизны дуг окружностей, образующих утолщение (правое) заготовки;

$t$  – шаг штамповки.

Рассмотрим вариант получения штучной заготовки со сложным контуром с помощью двухсторонней отрезки в штампе. Размещение плоских штучных заготовок в полосе показано на рисунке 2.12б. Предложенный способ раскроя листового металла в виде рулона ленты или полосы пригоден для одновременного получения нескольких заготовок со сложным контуром, не имеющих ни одной оси симметрии, на одной позиции штамповки за один ход прессового оборудования. Этапы профилирования плоской заготовки реализуются в соответствии со следующим алгоритмом (рисунок 2.12а).

Каждая заготовка со сложным асимметричным контуром, имеет средний верхний и средний нижний участки и сами заготовки располагают в рулоне ленты или полосе так, чтобы контуры смежных заготовок касались друг друга по всем точкам боковых контуров, кроме прямолинейных верхнего и нижнего участков, которые совмещают с краями рулона ленты или полосы.

На всех участках сложного контура заготовки перемычки не назначают, при этом для однорядного наклонного раскроя контуры заготовки оформляют так, что верхнюю часть фигурного контура заготовки на участке отростка ограничивают прямолинейным участком заданной длины, левый и правый концы которого пересекают дугами, являющимися  $\frac{1}{4}$  частями окружностей заданного радиуса.

Верхнюю границу выпуклого контура левого утолщения образуют на заданной длине касательной к одной из упомянутых дуг, находящейся слева, при этом отрезками прямых, заданных длин и расположенных под заданным углом, образуют отросток специальной формы, а правый конец касательной сопрягают с дугой окружности заданного радиуса, образуя выпуклую часть контура верхней правой части заготовки, центр кривизны которой располагают на линии, отстоящей на заданное расстояние от нижнего прямолинейного участка заготовки, совпадающего с нижним краем рулона ленты или полосы, и параллельной ему.

Затем сопряжением с дугой окружности заданного радиуса, но обратной кривизны оформляют вогнутую часть криволинейного участка верхнего утолщения, центр которого располагают на прямой, отстоящей на заданное расстояние от верхнего прямолинейного участка заготовки, совпадающего с верхним краем рулона ленты или полосы, и параллельной ему, переходящую по касательной к этой дуге в отрезок прямой, с образованием линии контура среднего верхнего участка заготовки, противоположный правый конец этого прямолинейного контура сопрягают с дугой окружности заданного радиуса, центр которой располагают на прямой, отстоящей на заданное расстояние от нижнего прямолинейного участка заготовки, совпадающего с нижним краем рулона ленты или полосы, и параллельной ему, при этом образуют правый участок выпуклого контура нижнего утолщения заготовки, которым пересекают нижний прямолинейный участок заготовки.

Для образования левого вогнутого контура нижнего утолщения заготовки отступают по прямолинейному участку нижнего утолщения заготовки влево на заданное расстояние, соответствующее точке пересечения прямолинейного участка нижнего утолщения с дугой окружности заданного радиуса, центр которой располагают на прямой, отстоящей на заданное расстояние от нижнего прямолинейного участка утолщения, совпадающего с нижним краем рулона ленты или полосы, и параллельной ему, далее по

касательной к верхнему концу этой дуги сопрягают прямолинейный участок, соединяя оба утолщения заготовки по нижней части среднего контура заготовки, отстоящего от прямолинейного участка противоположного верхнего контура заготовки на заданное расстояние и сопрягают его левый конец с дугой окружности заданного радиуса, центр которой располагают на прямой, отстоящей на заданное расстояние от верхнего прямолинейного участка заготовки, совпадающего с верхним краем рулона ленты или полосы, и параллельной ему.

Далее сопрягают левый конец упомянутой дуги, с помощью которой образуют выпуклый левый участок контура верхнего утолщения заготовки, с дугой того же радиуса, но обратной кривизны, тем самым образуют вогнутый левый участок контура верхней части заготовки, затем сопрягают дуги окружностей заданных радиусов прямолинейным участком, с образованием нижней границы отрезка специальной формы, замыкают контур заготовки, не выходя за пределы ширины рулона ленты или полосы, при этом смежные заготовки ориентируют относительно друг друга таким образом, чтобы их контуры полностью вкладывались один в другой, верхние и нижние прямолинейные участки смежных заготовок также совмещают с краями рулона ленты или полосы, а межосевые расстояния центров кривизны дуг окружностей, образующих контуры утолщений, назначают равными, а сами центры располагают на соответствующих прямых, упомянутых ранее, кроме того, при данном расположении заготовок в рулоне ленты или полосе среднюю прямолинейную часть контура всех заготовок наклоняют к краям рулона ленты под постоянным углом.

Технологический процесс получения плоской заготовки со сложным контуром реализуется по следующей схеме. В качестве разделительной операции используют двухстороннюю отрезку по фигурным контурам противоположащих сторон заготовки, причем длины прямолинейных участков и, совпадающих соответственно с верхним и нижним краями ленты, равны и

задают шаг штамповки своим удвоенным значением, в связи с этим ленту позиционируют в рабочей зоне разделительного штампа так, чтобы напротив рабочего окна матрицы, устанавливалась вторая заготовка по счету от образованного на предыдущем переходе двухсторонней отрезкой фигурного края ленты.

Для обеспечения повторяемости положения фигурного контура на позиции штамповки, плоскостные заготовки в ленте располагают наклонно под заданным углом (рисунок 2.12б), образованным между прямолинейным участком средней части заготовки и нижним краем ленты, причем до внедрения фигурного пуансона в ленту на нее опускают прижим, в котором выполняют фигурное отверстие, повторяющее контур пуансона по посадке с заданным зазором, чем обеспечивают направление пуансона относительно матрицы, и на прижиме развивают заданную силу, величина которой исключает проскальзывание и смещение ленты в рабочей зоне разделительного штампа во время рабочего хода оборудования.

С помощью прижима компенсируют изгибающие моменты, возникающие при двухсторонней отрезке, далее с помощью фигурного пуансона, повторяющего криволинейную конфигурацию противоположных сторон отрезаемой заготовки, с учетом технологического зазора между отрезными инструментами, равномерность которого обеспечивают при сборке штампа, осуществляют двухстороннюю отрезку по фигурным контурам второй от края ленты заготовки одновременно по двум криволинейным линиям отрезки, в результате за один ход используемого оборудования изготавливают две фигурные заготовки.

Нагрев штучной заготовки ведут в проходном индукторе до температуры горячей штамповки  $T=1250^{\circ}\text{C}$ , затем после достижения заданной температуры нагретую плоскостную заготовку 1 (рисунок 2.13) 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 концевого 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, который устанавливают на молот с горизонтальным движением ударных масс – импактор 5.

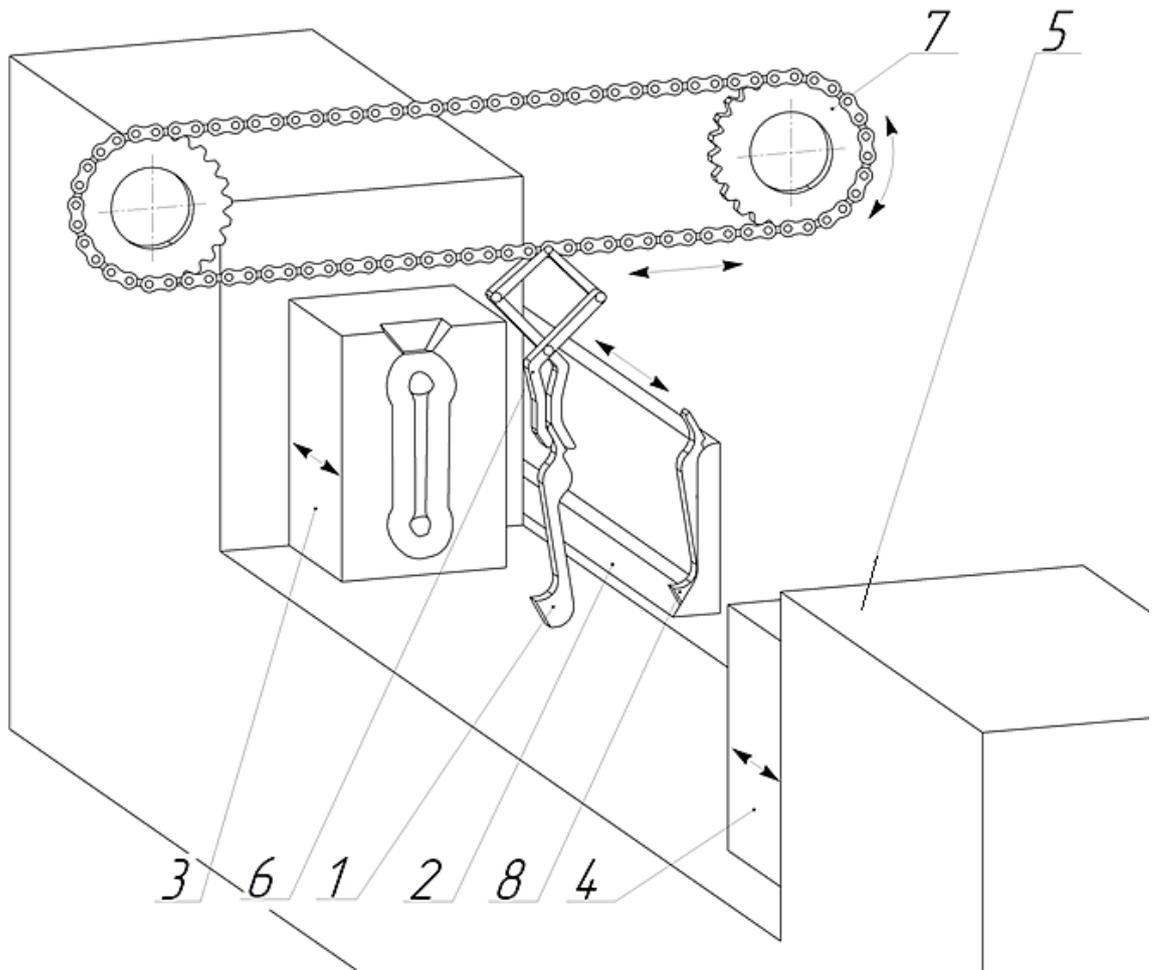


Рисунок 2.13 – Вариант штамповки Z-образной заготовки на горизонтальном молоте

Затем плоскостную заготовку 1, удерживая 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. За время манипулирования заготовкой ее температура опускается до 950 °С.

После нанесения одного удара половинами 3 и 4 штампа по предварительно нагретой плоскостной заготовке 1, грейферный захват 6 отводят цепным механизмом 7 из рабочей зоны импактора 5 на исходную позицию вне рабочей зоны импактора 5, разжимают захват 6, освобождая его от поковки 1 (рисунок 2.13), которая попадает на траковый конвейер для транспортировки на обрезной пресс для обрезки облоя, в то же время грейферный захват 6 готов к подаче следующей штучной плоскостной заготовки 1 в рабочую зону импактора 5 для штамповки очередной поковки гаечного ключа.

Результат имитационного моделирования горячей объемной штамповки на импакторе фигурной штучной заготовки показан на рисунке 2.14 3D моделью поковки с обломом. Ручей штампа заполняется за один удар. Выход облоя прогнозируется на всех участках облойной канавки.

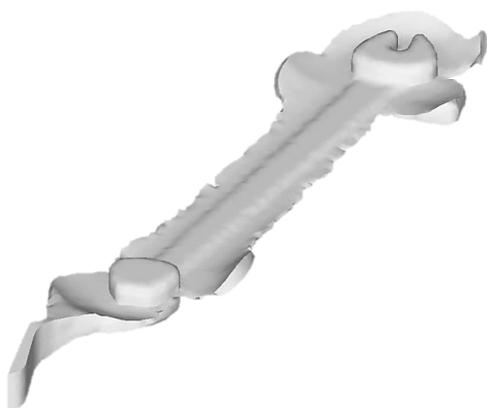


Рисунок 2.14 – 3D-модель поковки с обломом, формоизменение проводилось с использованием штучной фигурной заготовки

#### **2.4.2 Особенности технологии изготовления гаечного ключа 4×5 на вертикальном молоте**

В настоящее время импакторы на российских предприятиях, специализирующихся на изготовлении кузнечно-прессового оборудования, серийно не выпускаются. Для проведения физических экспериментов по ГОШ

поковок гаечного ключа доступным кузнечно-штамповочным оборудованием ударного действия является ковочный молот МА4129 (рисунок 2.15). 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.

Логично предположить, что, если нам удастся реализовать ГОШ за один удар на пневматическом молоте с меньшей энергией удара, то не будет сомнений, что те же технологические процессы могут быть реализованы также за один удар на оборудовании с заведомо большей энергией удара.



Рисунок 2.15 – Вертикальный ковочный пневматический молот МА4129

Поэтому, согласно технической характеристике вертикального молота, представленной таблицей 2.2, и присоединительным размерам, проведем расчет ручьев и сконструируем молотовой штамп.

Окончательный (чистовой) штамповочный ручей изготавливают по чертежу поковки с размерами в горячем состоянии с учетом усадки 1%. Горячая штамповка будет проводиться без предварительного ручья, поэтому ось окончательного ручья во избежание сдвига должна совпадать с осью симметрии штампа, сам штамп устанавливается по оси машины, во избежание

перекосов бабы в направляющих.

Таблица 2.2 – Техническая характеристика молота [146]

Параметр	Единица изм.	Значение
Номинальная масса падающих частей	кг	80
Число ударов	м <sup>-1</sup>	210
Энергия удара	Дж	1500
Скорость падающих частей в момент удара	м/сек	5,8
Расстояние от оси бабы до станины (вылет)	мм	300
Длина зеркала бойков	мм	130
Ширина зеркала бойков	мм	63
Ход поршня компрессора	мм	210
Ход бабы (наибольший)	мм	385
Мощность электродвигателя	кВт	7,5
Габариты:		
длина	мм	1650
ширина	мм	850
высота	мм	1950
Масса	кг	3100

Высота половины штампа должна быть не менее величины  $H_{min}$ , определяемой по графику, приведенному на рисунке 2.16, исходя из максимальной глубины  $h_{max}$  ручья штампа [142].

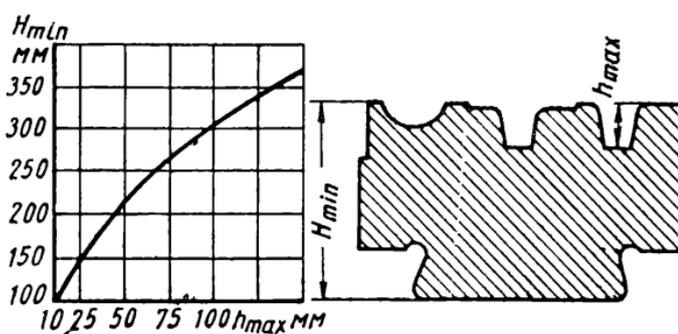


Рисунок 2.16 – К выбору габаритов половин штампа по высоте

Назначая высоту штампа, следует обеспечить возможность его возобновления с учетом минимально допускаемой высоты комплекта

штампов по характеристике молота. Принимаем  $H_{min} = 100$  мм. Масса ударной части молота 80 кг.

На основании расчетных данных раздела 2.2 была выбрана геометрия заготовки под штамповку поковки гаечного ключа как средняя расчетная заготовка с размерами  $\text{Ø}13 \times 84$  мм. Предварительным имитационным моделированием установлена необходимость корректировки размеров исходной заготовки, т.к. коэффициент заполнения облойной канавки принят в диапазоне 0,3-0,5 и размеры самой облойной канавки также уменьшены (рисунок 2.17).

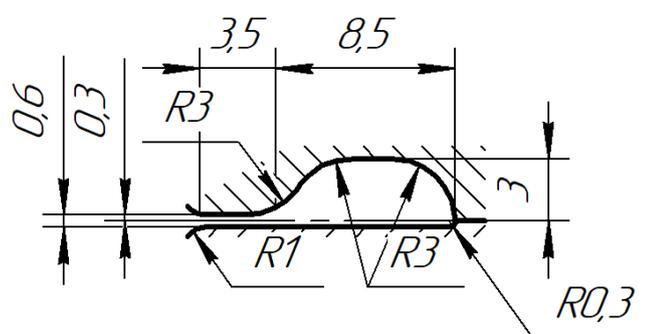


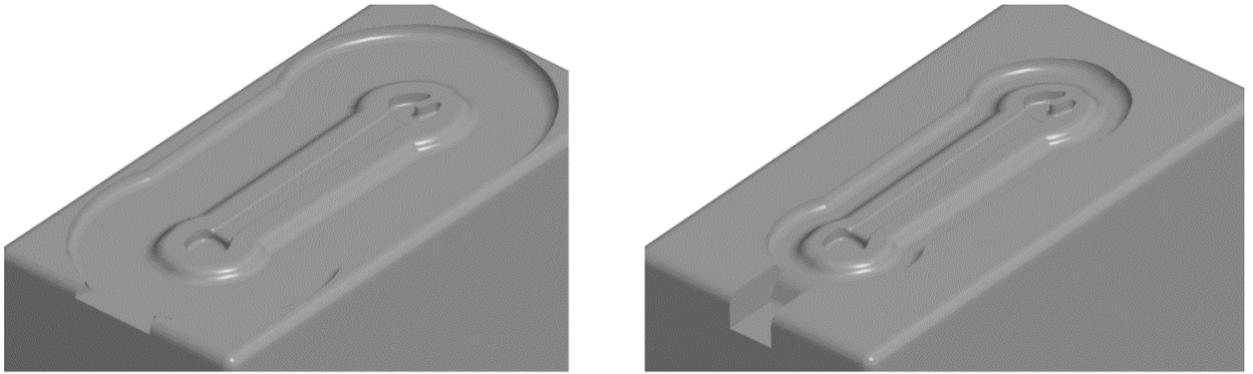
Рисунок 2.17 – Облойная канавка с измененными размерами сечения

Это связано с тем, что габариты половин штампа в плане ограничены и площади соударения, свободной от ручьев, недостаточно из соображений прочности половин штампа (рисунок 2.18).

Заготовку отправляют на операцию поперечно-винтовой прокатки, где круглый прокат  $\text{Ø}10_{-0,5}^{+0,3}$  мм ГОСТ 2590-2006 приобретает промежуточную форму для дальнейшей штамповки (рисунок 2.19б).

Операцией получения штучной заготовки будет разрезка профильного проката на части, соответствующие штучной заготовке (рисунок 2.19а).

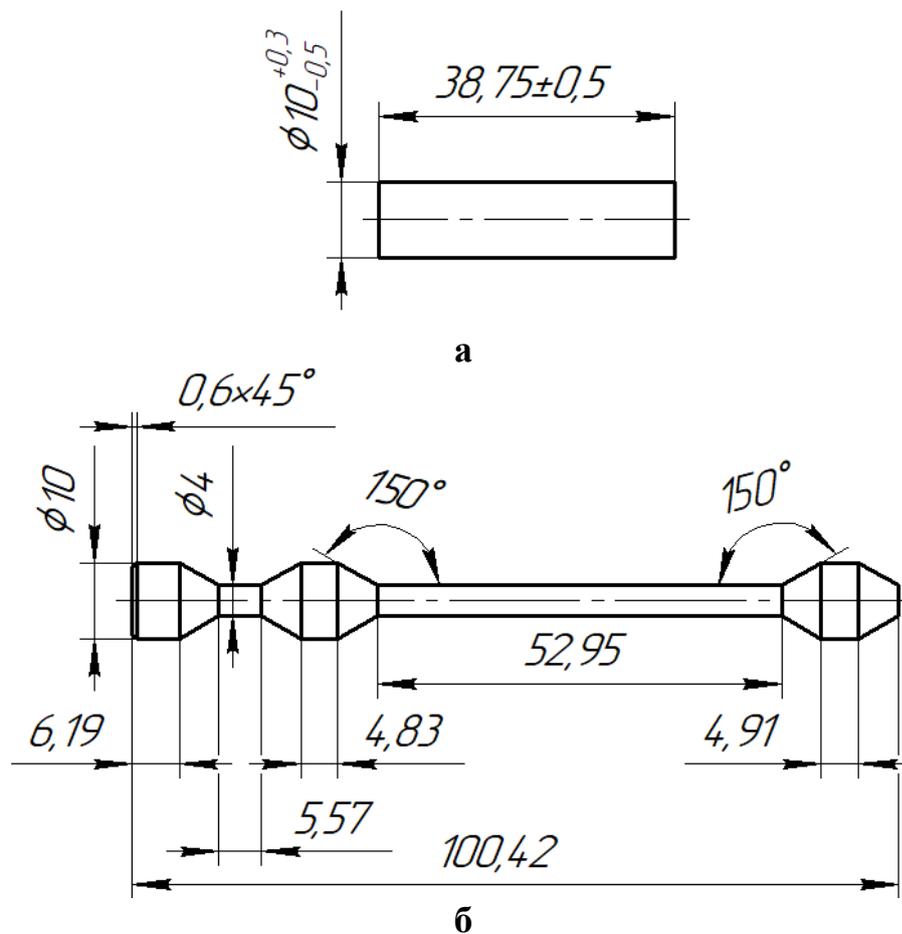
Исходя из вышеописанного, для вертикального ковочного пневматического молота МА4129 были разработаны чертежи верхней и нижней половин штампа (Приложение А).



**а**

**б**

Рисунок 2.18 – Увеличение площади соударения половин штампа за счет обоснованного изменения размеров облойной канавки (показана 3D модель верхней половины штампа): а - вариант с нормализованной облойной канавкой; б - вариант облойной канавки с пропорционально уменьшенными размерами



**а**

**б**

Рисунок 2.19 – Параметры заготовки: а - из круглого проката; б - полуфабрикат после предварительного профилирования

## 2.5 Выводы по главе 2

1. По стандартной методике разработан чертеж поковки, которая включает построение эпюры средних диаметров и эпюры сечений, необходимых для расчетов средних размеров исходной заготовки.

2. Научно обоснованы и разработаны 6 новых вариантов технологических процессов ГОШ поковок гаечного ключа с учетом специфики конструктивного исполнения импактора. Техническая новизна 4-х из них защищена патентами РФ на изобретения.

3. Дополнительно обоснован и разработан один вариант технологии штамповки штучной заготовки на ковочном молоте с пневматическим приводом вертикальной компоновки с целью проведения экспериментальных исследований.

4. С применением комплекса графического проектирования разработаны 3D модели и чертежи половин штампа для молота МА4129.

5. Обосновано изменение размеров облойной канавки, конструкция которой вошла в проект штампа.

6. Необходимы дальнейшие исследования и оптимизация новых технологических процессов средствами компьютерного моделирования и теоретического анализа.

### **Глава 3. Компьютерное моделирование предложенных технологии горячей объемной штамповки тонкополотных поковок**

#### **3.1 Программное обеспечение и входные параметры для численного моделирования**

Перед выполнением моделирования методом конечных элементов были разработаны твердотельные 3D модели инструмента, используемого в процессе штамповки на молоте. Программное обеспечение для трехмерного моделирования твердого тела со сложными поверхностями отечественной разработки КОМПАС-3D [117] использовалось для создания моделей верхнего и нижнего штампов. После завершения трехмерного геометрического редактирования инструментов файлы деталей были преобразованы в форматы файлов STereoLithography (STL). Форматы файлов \*.stl совместимы с различными программами моделирования, в том числе с DEFORM-3D [78], и также используются для быстрого прототипирования, 3D-печати и автоматизированного производства. Затем преобразованные файлы STL были импортированы в программу моделирования DEFORM для анализа процессов ГОШ гаечных ключей.

При численном моделировании ГОШ, выполненном в DEFORM, использовался 3D-модуль программного обеспечения для большей точности асимметричной геометрии деталей. 3D-модуль DEFORM для операций штамповки представляет собой открытую систему, которая содержит и поддерживает определяемые пользователем процедуры и переменные для сложных задач моделирования. Кроме того, программный модуль обеспечил возможность неизотермического моделирования операций ГОШ при ударном нагружении.

Использование 3D-модуля DEFORM помогло оценить изменение конструкции инструмента. В процессе различных итераций были выбраны

параметры штамповки, позволяющие уменьшить сопротивление течению металла при заполнении штампа, уменьшить облой и минимизировать количество ударов молотом до одного, с учетом сохранения необходимой энергии для качественной штамповки поковки.

### 3.1.1 Условия теплопередачи и граничные условия

Выполнение неизоотермического моделирования в DEFORM включает использование условий теплопередачи для получения результатов, максимально приближенных к реальному процессу ГОШ [67].

Два типа коэффициентов теплопередачи присутствует в DEFORM при моделировании процесса штамповки, который включает в себя условия покоя и штамповки. Условия покоя относятся к ситуациям, когда нагретая заготовка находится на поверхности нижней половины штампа, центрированной по ручью, до соударения штампов. Теплопередача на этой стадии происходит в основном конвекцией и излучением, т.к. контакт заготовки со штампом точечный. Однако в условиях нагружения условия теплообмена изменяются, площадь контакта металла со штампом становится максимально возможной, и тепловой поток будет зависеть от коэффициента контактного теплообмена между заготовкой и штампами [164].

Использование фактора трения с учетом высоких давлений при штамповке также важно для получения достоверных результатов моделирования течения металла при заполнении ручья штампа [83]. Модели трения можно разделить на две категории, известные как трение сдвига и кулоновское трение, в которых касательные напряжения вычисляются по-разному:

в модели трения сдвига [83]:

$$f_s = mk \quad (3.1)$$

при кулоновском трении [83]:

$$f_s = \mu p \quad (3.2)$$

где  $f_s$  - напряжение трения;

$m$  и  $\mu$  - фактор трения и коэффициент трения соответственно;

$k$  - предел текучести материала на сдвиг;

$p$  - контактное давление между двумя взаимодействующими телами.

Постоянное трение сдвига используется в основном для моделирования объемной штамповки, в то время как кулоновское трение в основном используется в моделировании, где происходит контакт между двумя упруго деформируемыми телами или между упругим и жесткопластичным телом, например, при штамповке листовых заготовок. Следует отметить, что входная переменная, необходимая для моделирования, - это либо фактор трения, либо коэффициент трения, в зависимости от типа выполняемого моделирования. Для ГОШ гаечного ключа рекомендуется использовать постоянный коэффициент трения сдвига по Зибелю. Предшествующие исследователи рекомендовали использовать значения фактора трения 0,7 и 1,0 для процессов, включающих условия штамповки без смазки. Такой диапазон значений был проверен, просмотрев руководство пользователя DEFORM, в котором предлагалось использовать значения фактора трения в пределах 0,7–0,9 для условий штамповки без смазки. Для условий горячей штамповки ключа гаечного со смазкой предпочтительно значение фактора трения – 0,35.

Другой набор параметров, которые важно определить для моделирования – это граничные условия. В зависимости от выполняемого моделирования тип используемых граничных условий может меняться. Используются два типа граничных условий: тепловые и скоростные граничные условия. Термические граничные условия включают теплообмен с окружающей средой [175], которая установлена приблизительно на уровне 70 °F (20 °C). Также используется постоянный коэффициент конвекции 0,02 (N/sec/mm/C), предложенный DEFORM и подтвержденный разработчиками. Для получения достоверных результатов ко всем элементам сетки объекта

применяются тепловые граничные условия.

Кинематические граничные условия используют как для моделирования теплопередачи, так и для моделирования течения металла при штамповке. В симуляциях теплопередачи, которые включают теплообмен с окружающей средой, программа требует выбора граничного условия, когда деформирования металла не происходит.

Следует учесть, что при слишком большом количестве узлов модель становится громоздкой, что негативно сказывается на производительности счета, а при слишком маленьком количестве узлов достоверность получаемых результатов снижается.

### 3.1.2 Энергетические параметры оборудования

При выполнении моделирования штамповки с использованием молотового оборудования важно определить общую кинетическую энергию, доступную в точке удара. Молот выбирается горизонтальный с встречным движением масс. Масса движущихся частей молота в DEFORM задается суммой масс поршня, штока, ударной массы и штампа. Значения энергии необходимо оценить и преобразовать в системные единицы для совместимости с программным обеспечением DEFORM. На основании руководства пользователя DEFORM для расчета общей доступной энергии системы использование уравнения:  $E = mgh$  нецелесообразно ввиду специфики компоновки молота. Для импактора использовалось предлагаемое заводом-изготовителем [73] значение энергии 4 кДж.

Следует обратить внимание, что DEFORM использует единицы  $N \cdot mm$  для энергии и  $N \cdot s^2/mm$  для массы, поэтому использовались следующие преобразования: энергия удара  $4000000 N \cdot mm$ ; масса перемещаемых частей молота  $0,254 N \cdot s^2/mm$ .

Эффективность удара молотом влияет на количество энергии,

передаваемой от молотового оборудования на пластическую деформацию заготовки, и поэтому является важным параметром, который следует учитывать при выполнении моделирования штамповки.

Для ясности, термин «эффективность удара» относится к соотношению между энергией, необходимой для пластической деформации детали, и полной энергией, доступной на оборудовании, как показано в уравнении (3.3) [120]:

$$\eta = \frac{E_R}{E_T} \quad (3.3)$$

где:  $\eta$  - эффективность удара молота;

$E_R$  - энергия, необходимая для пластической деформации;

$E_T$  - общая доступная энергия.

Основываясь на данных независимых исследователей и практического опыта штамповки, заметим, что эффективность удара молотом обычно делится на три категории, которые называются мягкими, средними и жесткими ударами.

Во время мягких ударов большее количество энергии подводится к заготовке, а не к окружающей среде, что приводит к большим пластическим деформациям и перемещению штампа. При средних и сильных ударах меньше энергии передается на заготовку и больше рассеивается в окружающую среду в виде вибрации оборудования.

Основываясь на производственном опыте, описанном Алтаном [165], рекомендуемые значения для мягких, средних и жестких ударов составляют соответственно 0,8 - 0,9; 0,5 - 0,8 и 0,2 - 0,5. В работе принимается эффективность удара 0,85.

Поскольку интенсивность ударов молота варьируется на протяжении фактического процесса штамповки, была выдвинута гипотеза, что эффективность удара молота во время каждого удара в моделировании также будет изменяться.

Масса падающих частей молотов вертикальной компоновки задается

согласно технической характеристики используемого молота.

### **3.2 Результаты моделирования НДС и силовых параметров за один цикл штамповки**

Компьютерное моделирование проводилось с использованием программного обеспечения DEFORM-3D V6.1 [78], реализующего один из энергетических методов - метод конечных элементов. Нагрев заготовки индукционный, диапазон изменения температуры 1250 °С - 950 °С. Диапазон температур нагрева штампов от 150 °С до 300 °С.

Материал заготовки DIN-41Cr4 (соответствует стали 40X ГОСТ 4543-2016). Материал штампов AISI-H-26 (близкая сталь 5ХНМ).

Оборудование – горизонтальный молот (импактор) с энергией соударения подвижных масс 4000000 Нс<sup>2</sup>/м; масса ударной части 0,245 т; коэффициент эффективности 0,85.

#### **3.2.1 Влияние размера ячеек сетки КЭ и числа узлов на точность представляемых результатов**

Размер сетки КЭ, выбираемый для моделирования, играет ключевую роль в получении достоверных результатов моделирования [23]. В 2D-моделировании обычно используется меньший размер сетки из-за простоты моделей и меньших затрат времени на вычисления. Однако при использовании сложной трехмерной геометрии важно использовать большее количество элементов и узлов, чтобы получить достаточную точность и разрешение [48, 175].

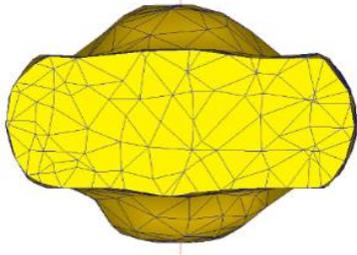
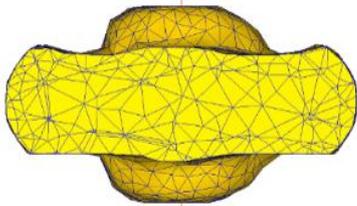
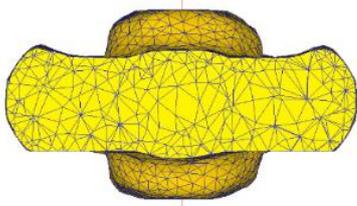
Размер ячейки, в которой используется небольшое количество элементов и узлов, называется грубой ячейкой, а размер ячейки, включающий

большее количество элементов и узлов, называется мелкой ячейкой.

Некоторые проблемы, которые могут возникнуть при использовании грубой сетки для 3D-моделирования, включают деградацию сетки, чрезмерную потерю объема и проблемы ремешинга (генерирования повторной сетки). Хотя более мелкая сетка помогает решить упомянутые проблемы, но при этом время, необходимое для выполнения моделирования, значительно увеличивается [175].

Для заготовки  $\varnothing 13 \text{ мм} \times 84 \text{ мм}$  исследовалось следующее количество ячеек: 6727, 21581, 60189. Из таблицы 3.1 видно, что число элементов на поперечной оси близко для 21 тыс. и 60 тыс.

Таблица 3.1 – Число ячеек в плоскости перпендикулярной плоскости разъема штампа по одной линии в зависимости от числа ячеек на заготовке (в разрезе)

Число ячеек	Рисунок	Число тетраэдров на оси
6727		6
21581		12
60189		15

Это сильно влияет на время (36 минут для 6 тысяч элементов; – 1 час 48 минут для 20 тысяч; – 15 часов 36 минут для 60 тысяч) обработки ЭВМ вариантов моделирования штамповки. Повторяемость заполнения ручья штампа практически отсутствует («размывание» границ) для заготовки с малым числом крупных ячеек, что не даст нам полной картины при моделировании ГОШ.

Если рассматривать зависимость теплоэффективности от числа тетраэдров, то здесь не все так однозначно. На рисунке 3.1 показана диаграмма зависимости температуры от времени с учетом числа КЭ модели.

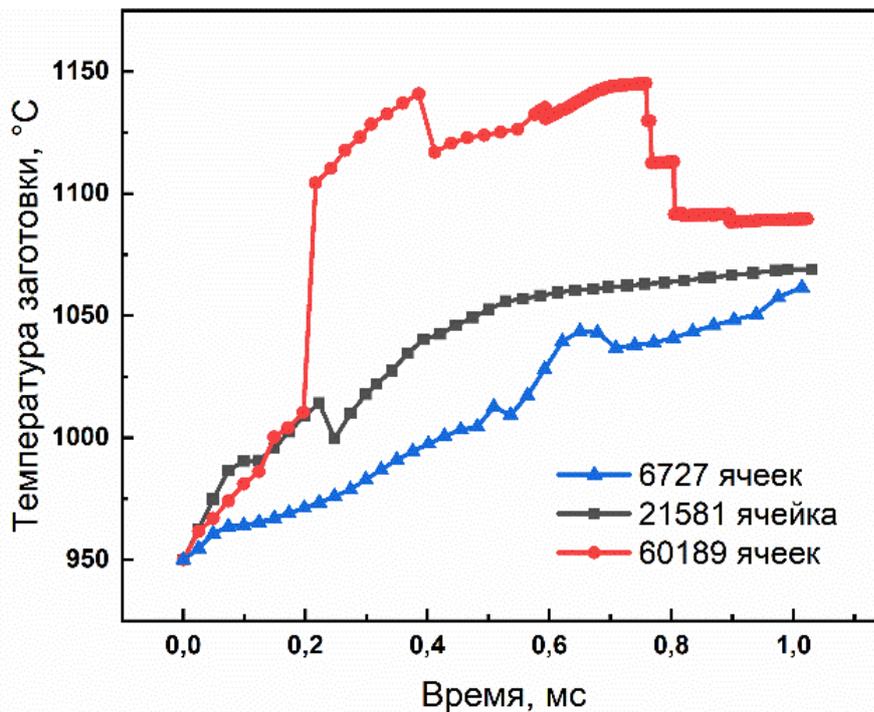


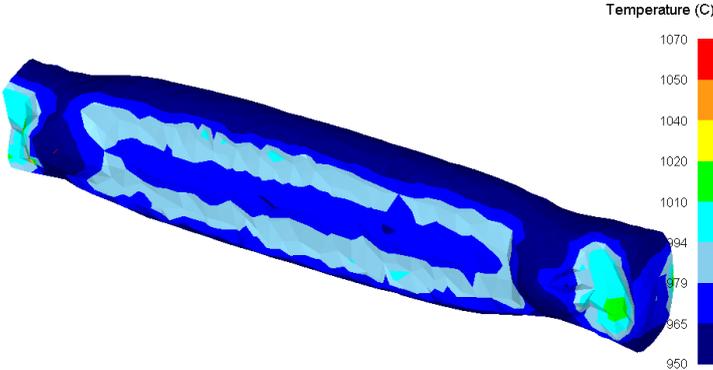
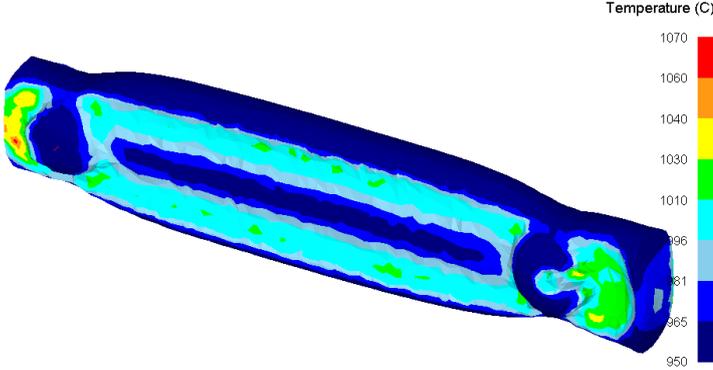
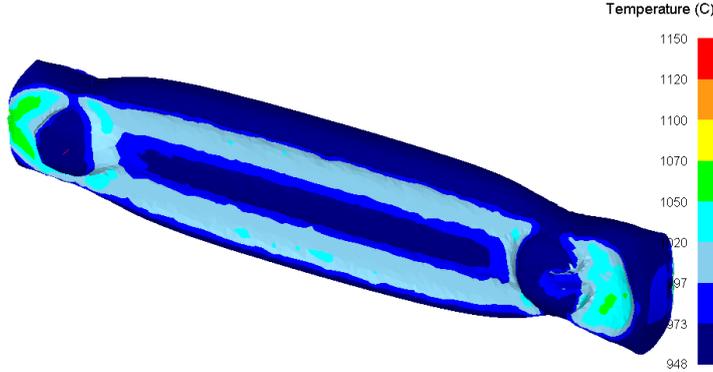
Рисунок 3.1 – Диаграмма зависимости температуры заготовки от времени соударения с учетом числа конечных элементов

При малых (6727) и средних (21581) количествах элементов зависимость температуры от времени отображается, можно сказать, квазигладкими кривыми. Для большого числа (60189) элементов зависимость носит более сложный характер – немонотонный с пиковыми значениями. По-видимому, это связано с постоянным перестроением сетки КЭ модели.

Для наглядности температурная зависимость показана в таблице 3.2 куда также занесены данные по количеству образующихся так называемых

заковок, или складок в процессе штамповки.

Таблица 3.2 – Диаграммы температур при моделировании формоизменения заготовки ГОШ

Число ячеек	Диаграмма температуры	Заковы-ячейки
6727		0
21581		9
60189		66

Чаще всего дефекты образуются при недостаточном приближении формы исходной заготовки к форме ручья штампа, и этот дефект не может быть устранен. В нашем же случае число элементов штампов везде одинаково (274380 тетраэдров) и потому присутствует несоответствие формы заготовки, близкой к цилиндру (6 тыс. элементов), форме окончательной поковки гаечного ключа. Число складок будет велико при более мелкой разбивке заготовки (60 тыс. элементов) однако все они будут находиться в области

облоя, что не является дефектом.

Характер изменения эффективного напряжения за время удара с учетом числа конечных элементов, показанный на рисунке 3.2, дает понять, что на установившейся стадии число элементов влияет на точность моделирования эффективных напряжений.

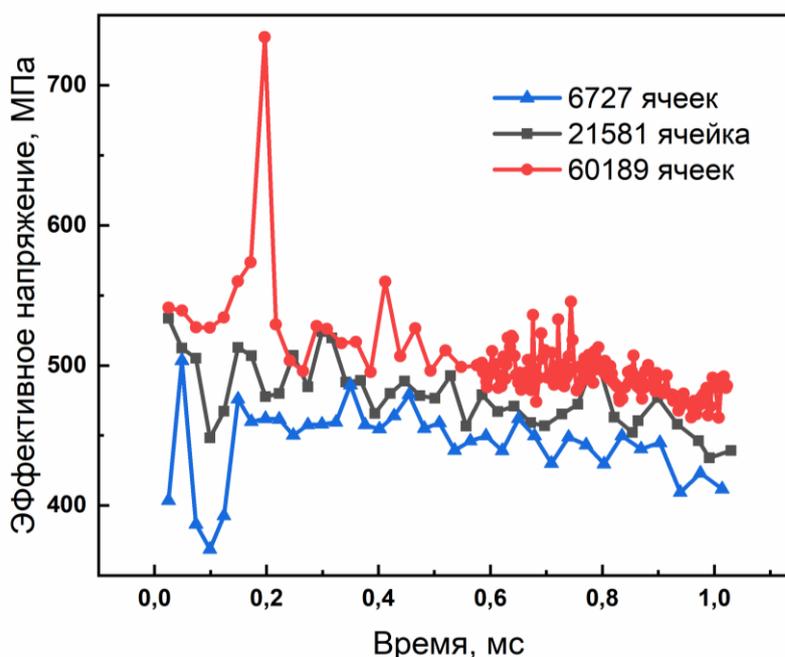


Рисунок 3.2 – Диаграмма зависимости эффективного напряжения от времени удара с учетом числа конечных элементов

Необходимо выбрать такое количество ячеек-тетраэдров, которое обеспечило бы достаточную точность результатов, но и не заняло бы много времени на обработку, что оказывает влияние на эффективность моделирования.

### 3.2.2 Влияние температуры заготовки и штампа на технологические параметры процесса и заполняемость ручья штампа

В DEFORM можно выполнять изотермическое и неизотермическое моделирование. При изотермическом моделировании температура заготовки

остаётся неизменной на протяжении всего процесса моделирования, что далеко от реальности.

При неизотермическом моделировании температура поковки постоянно меняется из-за теплообмена со штампом и окружающей средой. Время вычислений и результаты сильно зависят от типа выполняемого моделирования.

Чтобы получить точные результаты, в имитационной модели необходимо учесть теплопередачу между заготовкой, штампами и окружающей средой, т.е. провести моделирование в неизотермических условиях.

В работе [175] в ходе обсуждения с персоналом GBDF было установлено, что заготовки при температуре окружающей среды помещаются в газовую печь с температурой приблизительно 2300°F (1260°C) и нагреваются в течение 10 минут. Также поверхности штампов обычно предварительно нагревают перед началом процесса штамповки.

Для штампов, как и для заготовки, ожидается изменение температуры из-за теплопередачи и тепла, выделяемого в результате теплового эффекта деформации.

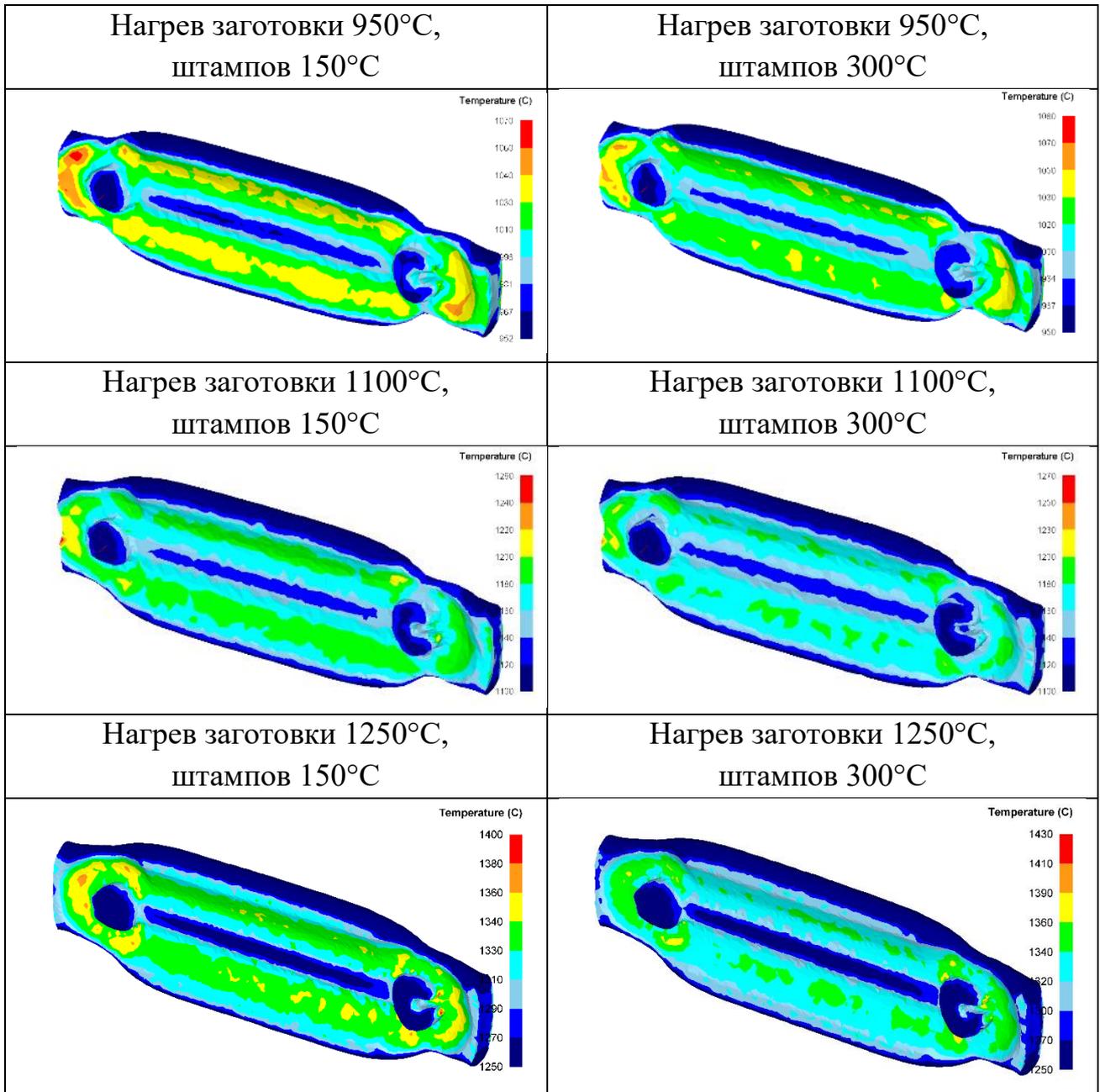
Для первого примера используем заготовку Ø13×84 с различными начальными температурными значениями. Нагрев штампа от 150°C до 300°C. Нагрев заготовки от 950°C до 1250°C. Моделировалась температурная зависимость штампов и заготовки, а также среднее напряжение в заготовке [47].

Как видно из таблицы 3.3 течение металла проходит интенсивнее при верхних значениях температур заготовки и штампов.

Однако максимальная температура заготовки превышает критическую температуру, что является неприемлемым из-за опасности перегрева. Поэтому рациональным будет нижнее значение температуры для заготовки (950°C) и верхнее значение для штампа (300°C), тем самым снижается температурный

напор при передаче тепла от заготовки к штампу.

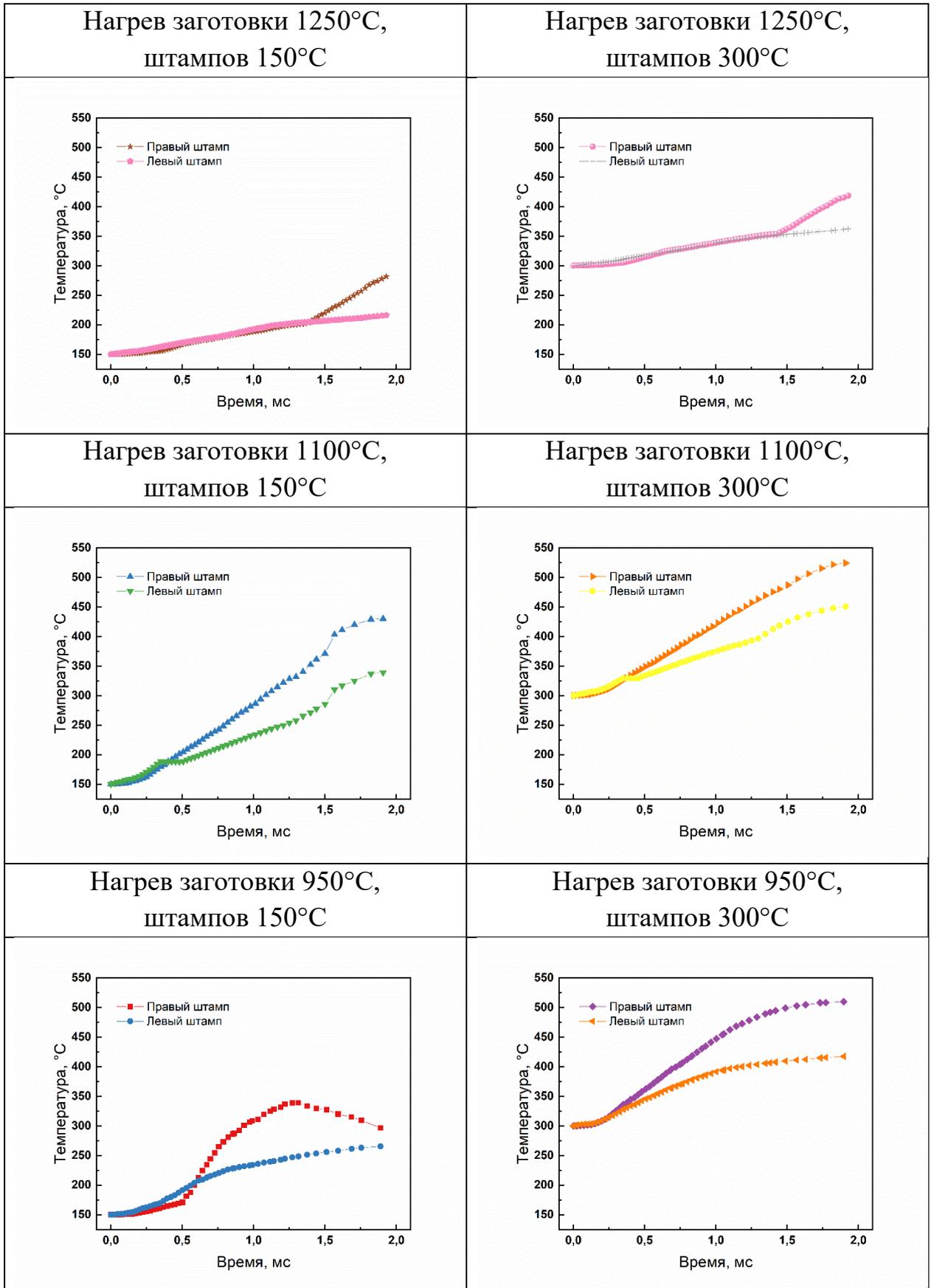
Таблица 3.3 – Результаты моделирования изменения температуры при штамповке заготовки с размерами  $\text{Ø}13 \times 84$



Графики, характеризующие изменение температуры от времени соударения приведены в таблице 3.4 и на рисунке 3.3.

Из рисунка 3.3 можно сделать вывод, что температуры нагрева заготовки и штампа оказывают существенное влияние на температурный режим штамповки.

Таблица 3.4 – Влияние температуры нагрева заготовки и начальной температуры штампа на температурный режим штампа во время ГОШ



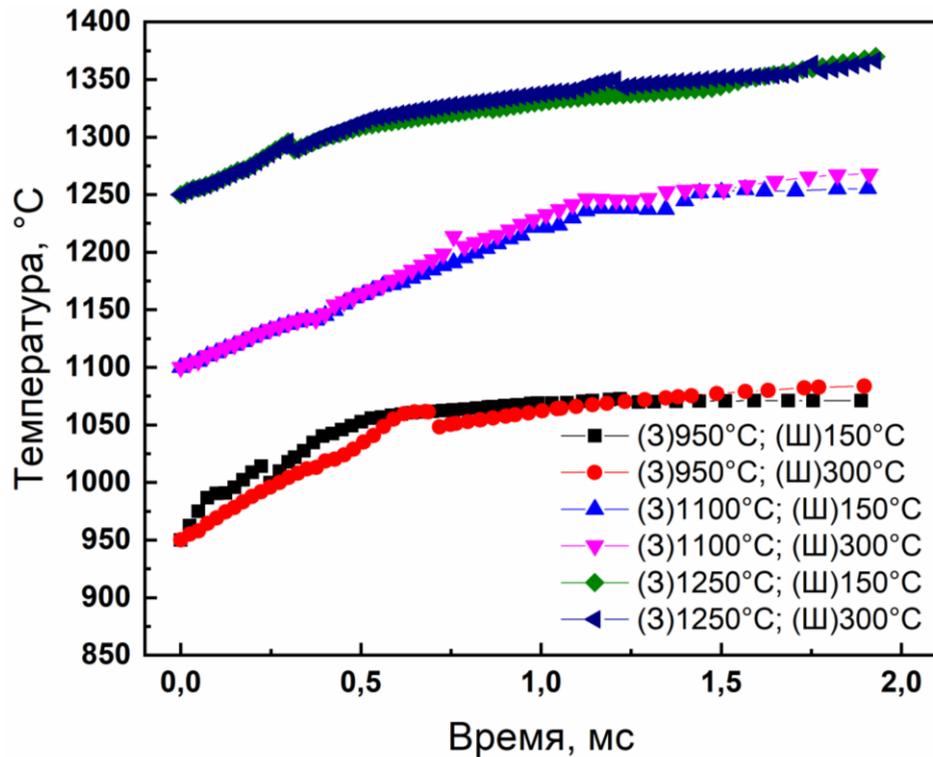


Рисунок 3.3 – Изменение температуры заготовки в процессе штамповки с учетом разных начальных температур нагрева самой заготовки и штампов

В процессе деформации температура заготовки экспоненциально увеличивается, что объясняется дополнительным выделением тепла за счет теплового эффекта деформации и несущественной отдачей тепла заготовкой в окружающую среду из-за кратковременности самого процесса деформации.

Таблица 3.5 показывает, что напряжения, возникающие в заготовке во время операции штамповки, не превышали порога в 2200 МПа.

Таблица 3.5 – Интенсивность напряжений в заготовке при различных температурах заготовки (З) и штампа (Ш)

Значения температур	З 950°С, Ш 150°С	З 1100°С, Ш 150°С	З 1250°С, Ш 150°С	З 950°С, Ш 300°С	З 1100°С, Ш 300°С	З 1250°С, Ш 300°С
Максимальное эквивалентное напряжение, МПа	1218	1893	2019	1406	1514	2188

### 3.2.3 Выбор формы и размеров заготовки и температурных параметров штамповки

Моделированием показано, что при известной энергии молота одного удара по заготовке  $\text{Ø}13 \times 84$  не хватает для качественного заполнения штампа. Ход подвижных частей штампа составил в зависимости от температуры нагрева заготовки и штампов (нагрев штампа не повлиял на это расстояние):  $950^\circ\text{C}$  – 4,86 мм;  $1100^\circ\text{C}$  – 5,17 мм. Также было выявлено, что при использовании заготовки  $\text{Ø}13 \times 84$  образуется большое количество облоя, частично выходящего на поверхность разъема штампа, что влияет на высотные размеры поковки и неблагоприятно скажется на экономической эффективности исследуемой технологии.

Было принято решение уменьшить размеры заготовки до значений  $\text{Ø}9 \times 70$ . Моделированием ГОШ с температурой нагрева заготовки  $950^\circ\text{C}$  и штампов  $300^\circ\text{C}$ , заполнение гравюры прошло не полностью (рисунок 3.4).

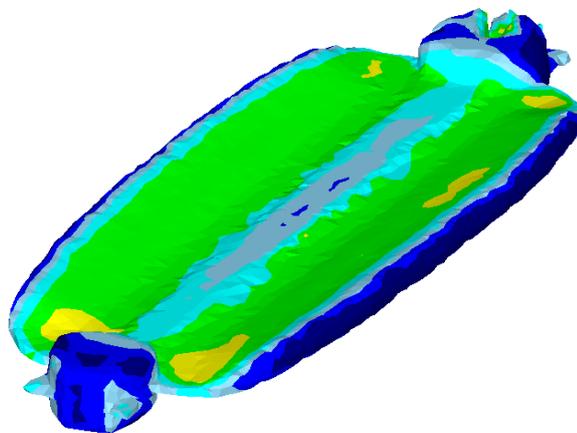


Рисунок 3.4 – Отрицательный результат моделирования по заготовке  $\text{Ø}9 \times 70$  из-за неравномерности выхода облоя

Облой в зонах головок отсутствует, в зоне рукоятки наблюдается повышенный выход металла в облой. Максимальная температура заготовки достигла  $1077^\circ\text{C}$ , а максимальное значение напряжений – 527 МПа. Однако незаполненность гравюры штампа является отрицательным фактором, поэтому необходимо изменить форму заготовки: добавить металл в зоны

головок и уменьшить сечение заготовки в зоне рукоятки.

Воспользуемся заготовкой, составленной по вышеописанным эпюрам (таблица 2.1, рисунок 2.3) с выбором тела вращения переменного сечения (рисунок 3.5а).

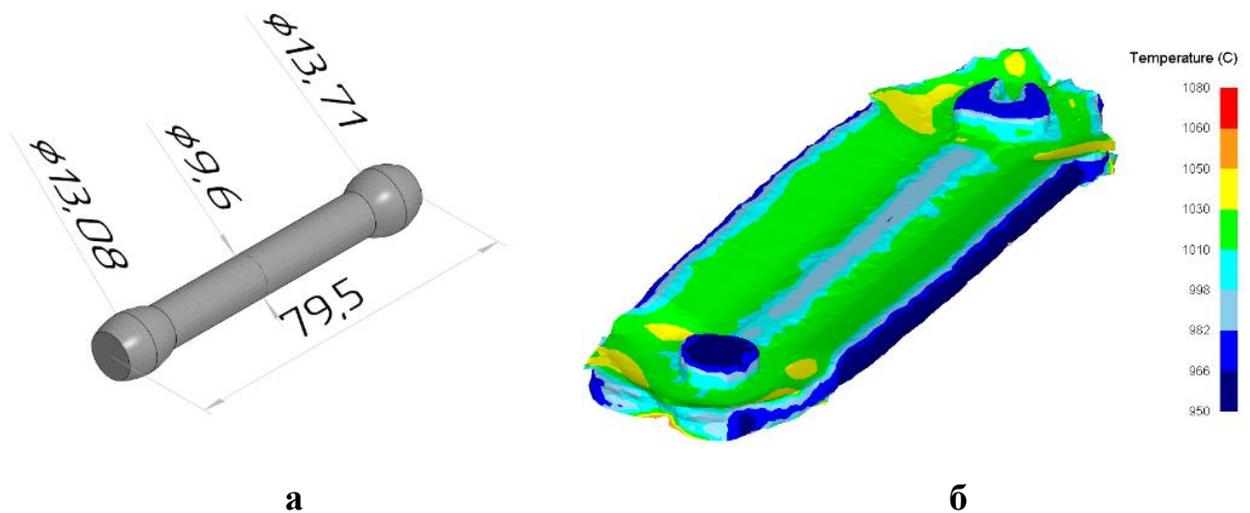


Рисунок 3.5 – Модель: а - заготовки по эпюре диаметров с выбором тела вращения переменного сечения; б - поковка, отштампованная за один удар

Как можно видеть из результатов моделирования (рисунок 3.5б) недоштамповка отсутствует, т.е. гравюра штампа полностью заполнена и получена поковка нужной толщины.

Значение максимальной температуры достигло  $1077^{\circ}\text{C}$ , как и в предыдущем случае, а значение напряжений –  $573\text{ МПа}$ . Однако количество облоя в области рукоятки необходимо уменьшить, изменением диаметра средней части заготовки.

По полученным результатам геометрия заготовки была подвергнута корректировке (рисунок 3.6а), в которой учтены все предыдущие недостатки [135]. Моделирование варианта было проведено при начальной температуре заготовки  $950^{\circ}\text{C}$ , штампов -  $300^{\circ}\text{C}$ .

При данном количестве облоя, соответствующим коэффициенту заполнения облойной канавки  $0,4$ , обеспечивается полное заполнение ручья штампа (рисунок 3.6).

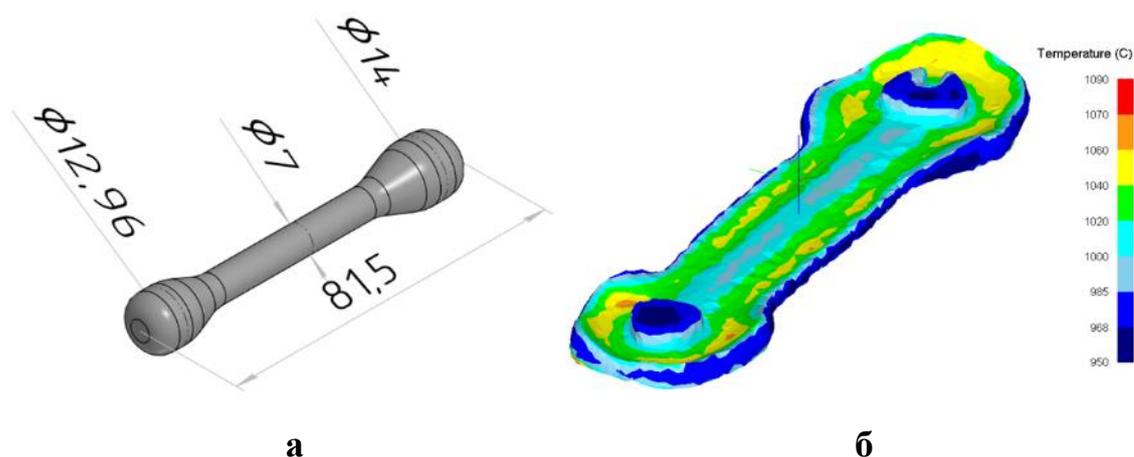


Рисунок 3.6 – Измененная геометрия заготовки: а - модель заготовки; б - результаты моделирования заполнения штампа и распределения температур

В результате моделирования получены зависимости эффективных напряжений и температуры заготовки за время удара (рисунок 3.7). Напряжения не превысили 550 МПа, что является удовлетворительным результатом. А температура заготовки не превышала 1080 °С, что меньше температуры перегрева.

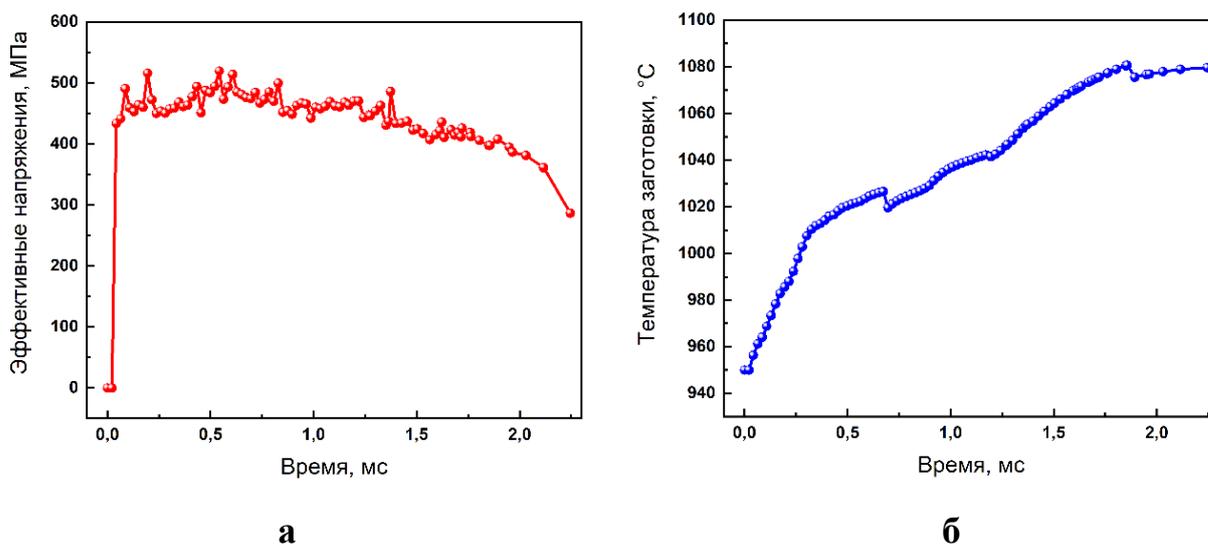


Рисунок 3.7 – Изменение за время удара: а - эффективных напряжений; б - температуры заготовки

Таким образом, компьютерное моделирование позволило выбрать рациональную форму заготовки и нужные размеры и установить рациональные температурные параметры для обеспечения эффективной штамповки гаечного ключа с наибольшим КИМ.

### 3.3 Оценка возможности использования вертикального молота с пневматическим приводом

Для обоснования условий проведения физических экспериментов проведем имитационное моделирование ГОШ на пневматическом молоте с измененной геометрией облойной канавки, т.е. обоснуем гипотезу, выдвинутую ранее. Для этого введем новые параметры моделирования, соответствующие штамповке на вертикальном ковочном пневматическом молоте МА4129, так как предыдущая глава посвящена моделированию штамповки на горизонтальном молоте с энергией удара 4 кДж.

С использованием программного обеспечения DEFORM-3D V6.1 проводилось компьютерное моделирование, где были использованы следующие параметры. Нагрев заготовки индукционный до температуры начала штамповки 950 °С. Температура нагрева штампов 300 °С. Материал заготовки DIN-41Cr4 (соответствует стали 40Х ГОСТ 4543-2016). Материал штампов AISI-H-26 (сталь 5ХНМ). Оборудование – молот с энергией удара 1,5 кДж (1500000 Н×мм); масса падающих частей молота 0,08 т; коэффициент эффективности 0,85. На рисунке 3.8 представлен результат штамповки с заготовкой-полуфабрикатом после поперечно-винтовой прокатки (рисунок 2.18).

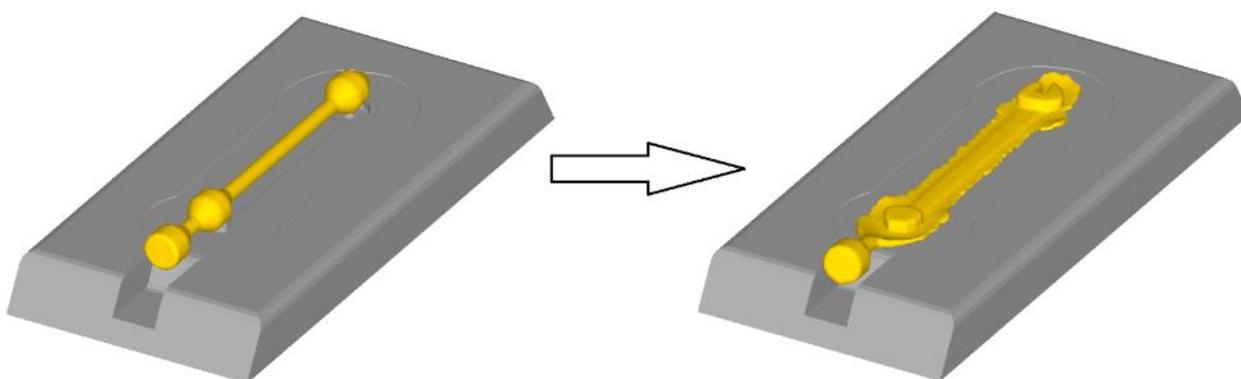
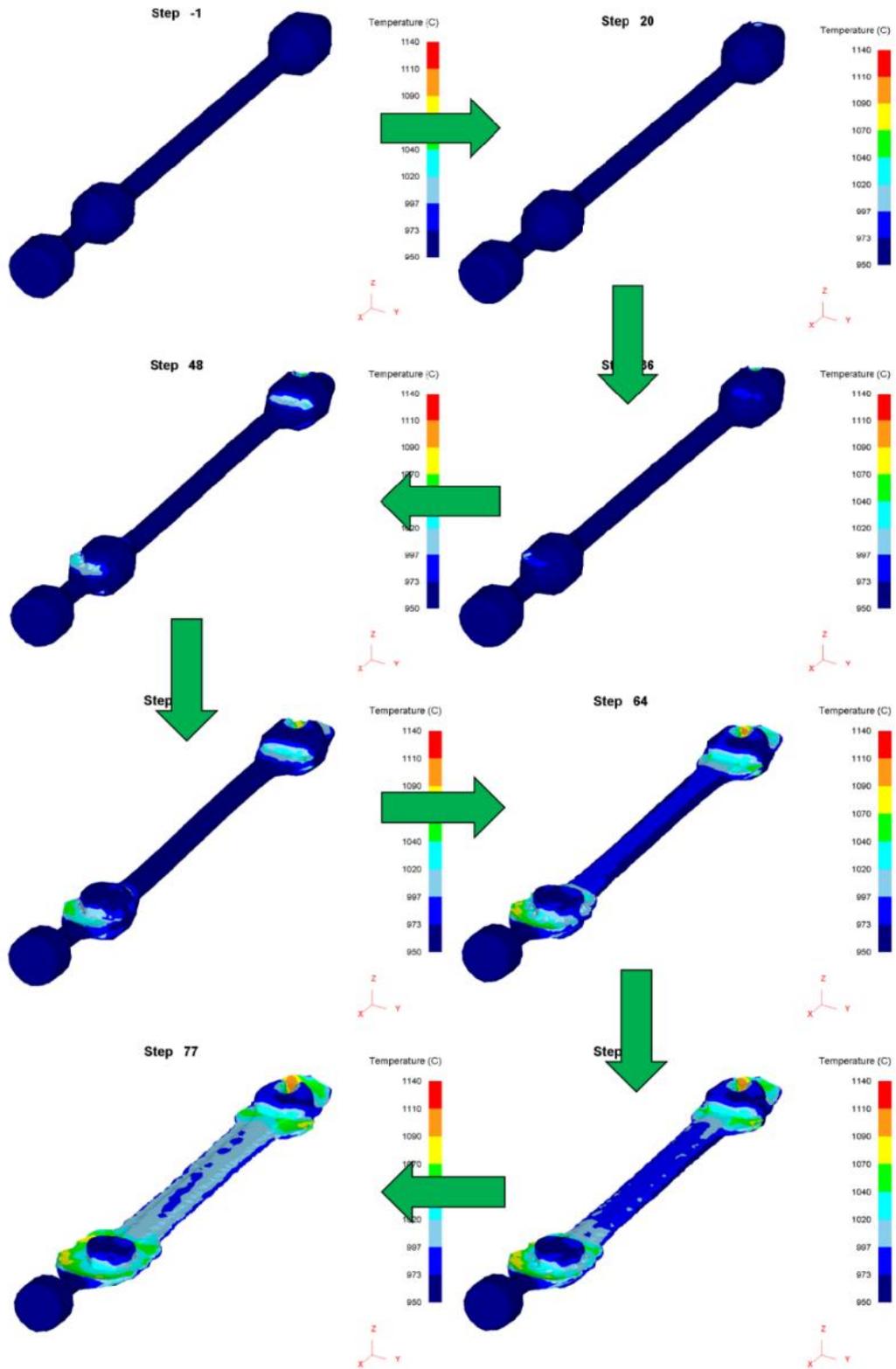


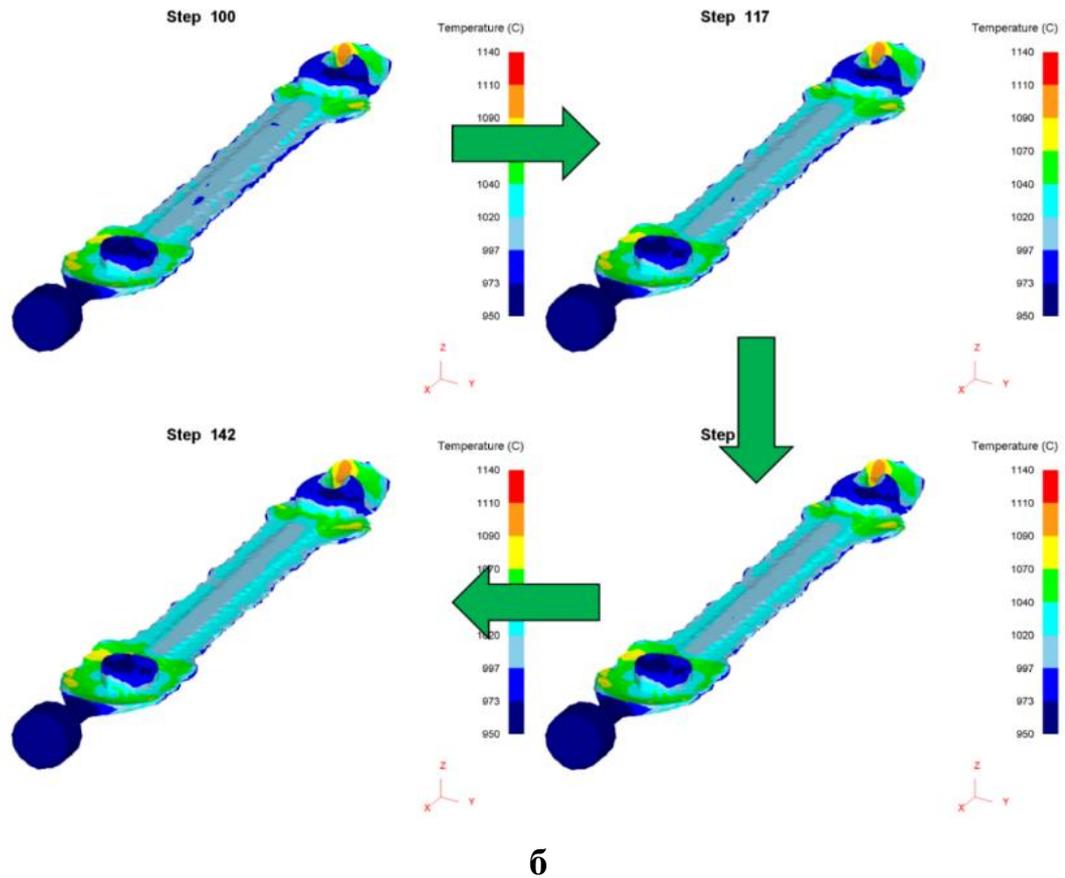
Рисунок 3.8 – Результат моделирования заполнения ручья за один удар при штамповке на молоте МА4129

В процессе моделирования были получены следующие результаты.

Изменение формы полуфабриката и температурные поля на последовательных этапах ГОШ иллюстрирует рисунок 3.9.



**a**



б

Рисунок 3.9 – Этапы изменения формы полуфабриката и температурные поля в металле заготовки: а – шаги моделирования с 1 по 77; б – шаги моделирования с 100 по 142

Особенностью течения металла в процессе ГОШ предварительно профилированного полуфабриката является качественное заполнение полости ручья и равномерное распределение обля по периметру поковки, кроме мостика облойной канавки в средней части головки большего зева ключа (рисунок 3.9). Это связано с тем, что был выбран одинаковый диаметр ( $\varnothing 10$  мм) полуфабриката в области обеих головок ключа. Однако это не является дефектом, т.к. сама головка полностью оформлена и использование данного полуфабриката является возможным в производственных условиях.

График изменения эффективных напряжений от времени рабочего хода, которые возникают в заготовке в процессе штамповки с максимумом значения этих напряжений 556 МПа показан на рисунке 3.10а.

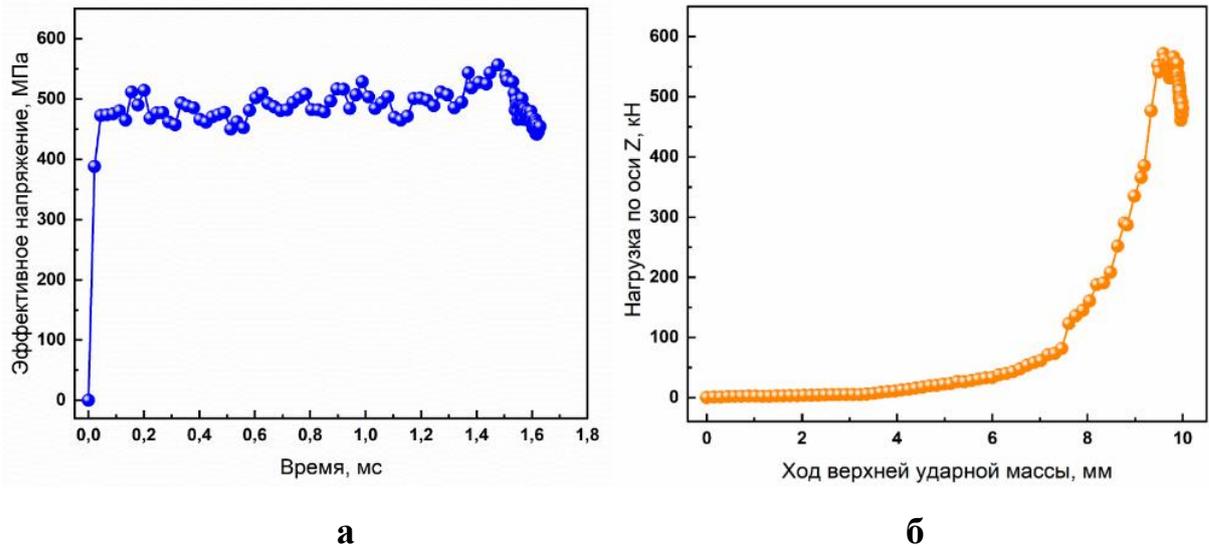


Рисунок 3.10 – Изменения, возникающие в заготовке в процессе штамповки, в горячем состоянии: а - эффективных напряжений; б - нагрузки

Нагрузки, возникающие во время горячей штамповки, возрастают постепенно и достигают максимальных значений 572 кН в конце рабочего хода, соответствующего 9,6 мм, а затем убывают до 481 кН (рисунок 3.10б) в конце операции, что вероятно связано с отскоком ударной массы.

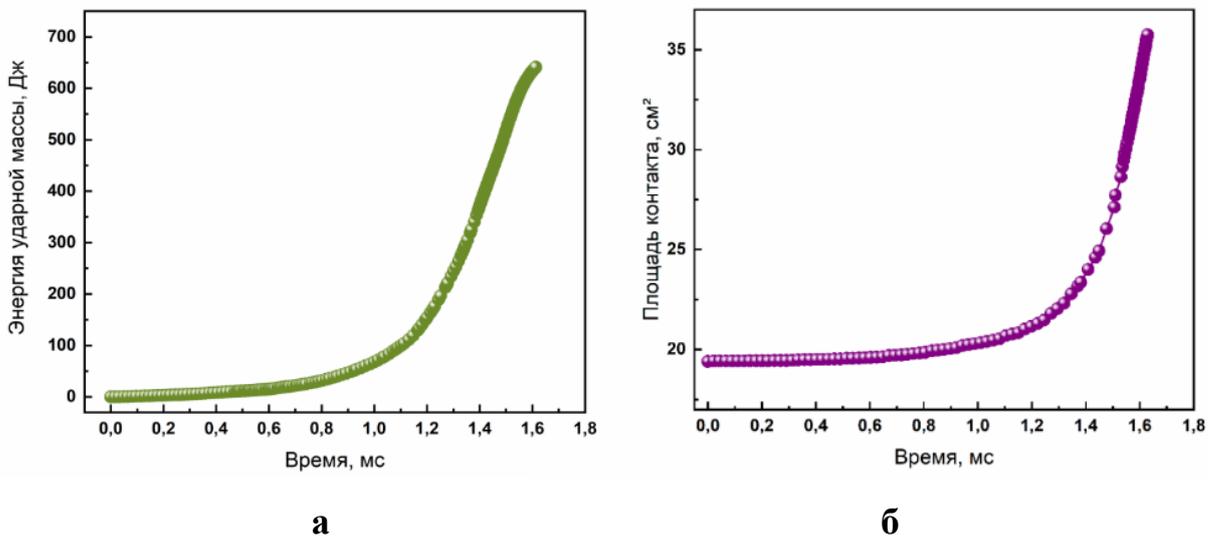


Рисунок 3.11 – Зависимость от времени рабочего хода: а - энергии ударной массы; б - площади контакта

В начале движения на протяжении 1,3 мс энергия ударной массы не изменяется до касания штампа с металлом. На завершающей стадии штамповки на молоте энергия верхней ударной массы достигает максимума в

641 кДж за короткое время удара в течение 0,2 мс (рисунок 3.11а). Изменение площади контакта штампа с заготовкой за время рабочего хода ударной массы показано на рисунке 3.11б. Площадь контакта по сравнению с начальным значением увеличивается на 46% до 35,75 см<sup>2</sup>, что соответствует полному заполнению гравюры штампа.

Что касается характера изменения температуры заготовки (рисунок 3.12), то температура за время удара повышалась постепенно в процессе штамповки и достигла максимума в 1137 °С.

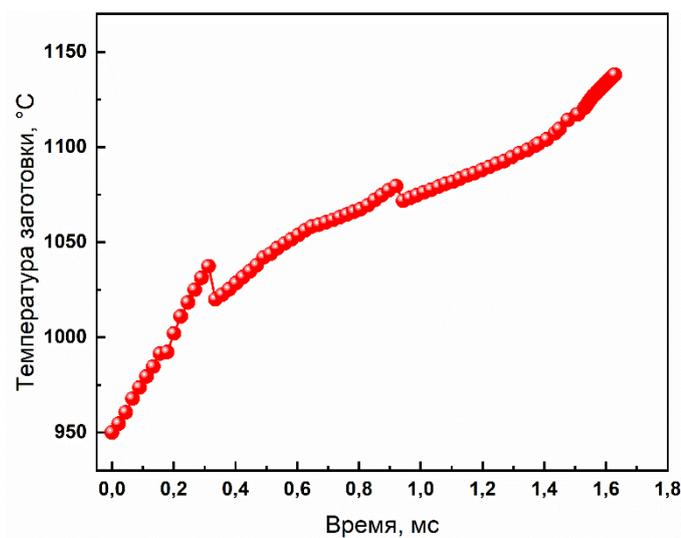


Рисунок 3.12 – Зависимость изменения температуры заготовки от продолжительности процесса штамповки

Такое повышение связано с тепловым эффектом деформации, когда за короткое время удара накапливаемое тепло не успевает рассеяться в окружающую среду, т.е. не успевает перейти в штамп. Тем не менее, температура металла не достигает температуры перегрева. Закон изменения температуры на этапах деформирования близок к линейному, а скачки объясняются тем, что при изменении формы заготовки от этапа к этапу происходит автоматическая генерация сетки конечных элементов, при которой может происходить вырождение некоторого количества КЭ, что сказывается на гладкости графика. Общий характер изменения температуры (линия тренда) близки к экспоненциальному.

После операции горячей объемной штамповки на молоте можно отправлять полученную заготовку на дальнейшую операцию обрезки облоя, а затем и на операцию протяжки зевов ключа.

### **3.3.1 Горячая штамповка Z-образной заготовки**

Исследования показали, что форма и размеры полуфабриката влияют на качество и равномерность заполнения полости штампа. Известно, что чем ближе форма заготовки к окончательной форме поковки, тем меньше степень деформации при формоизменении и меньше силы деформирования. Однако существует условие, что при любой форме заготовки следует обеспечить заданный расчетом объем металла, включающий все необходимые технологические составляющие – облой и угар.

Вариант исполнения заготовки может предусматривать не только цилиндрическую форму, но и другую геометрию с заданным объемом. Так, например, в разделе 2.4.1 подробно описаны способ профилирования сложной формы заготовки, способ расположения таких заготовок в полосе (раскрой), а так же способ ее изготовления из листового металла.

Рисунок 3.13 иллюстрирует, так называемую Z-образную заготовку, специально сконструированную с заданными размерами и объемом для штамповки на импакторе поковки гаечного ключа с размерами зевов 4×5. Отросток необходим для транспортировки и удержания заготовки в месте соударения движущихся навстречу друг другу ударных масс, т.е. выполняет роль клещевины.

Проведем моделирование процесса ГОШ данной заготовки на вертикальном ковочном пневматическом молоте МА4129. Облойная канавка, верхний и нижний штампы, конфигурация и размеры ручья, описанные выше, подходят и для данного случая.

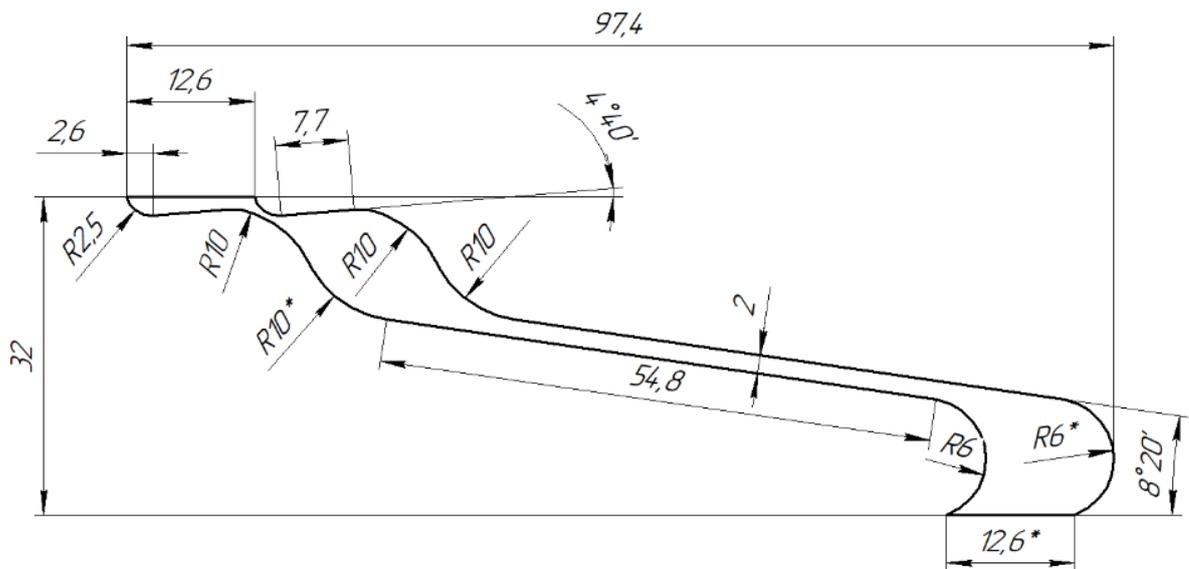


Рисунок 3.13 – Чертеж Z-образной заготовки для штамповки одного из типоразмеров гаечного ключа

Кроме того, повторяются и исходные данные: температура нагрева заготовки - 950 °С, температура нагрева штампов 300 °С; материал заготовки - DIN-41Cr4, материал штампов - AISI-H-26; оборудование – вертикальный молот модели МА4129 с энергией удара 1519000 Нс<sup>2</sup>/м.

В результате моделирования штамповки гаечного ключа с использованием Z-образной заготовки на вертикальном ковочном пневматическом молоте были получены следующие результаты.

Рисунок 3.14 иллюстрирует этапы постепенного изменения формы заготовки, а также распределение температурных полей на различных участках поковки.

На конечной стадии штамповки температура по участкам поковки распределена довольно равномерно. Что касается характера изменения температуры заготовки от времени рабочего хода (рисунок 3.15), то температура повышалась постепенно в процессе штамповки и достигла максимума в 1318 °С в конце цикла штамповки, что выше рекомендуемого верхнего предела диапазона температур горячей штамповки в 1250 °С.

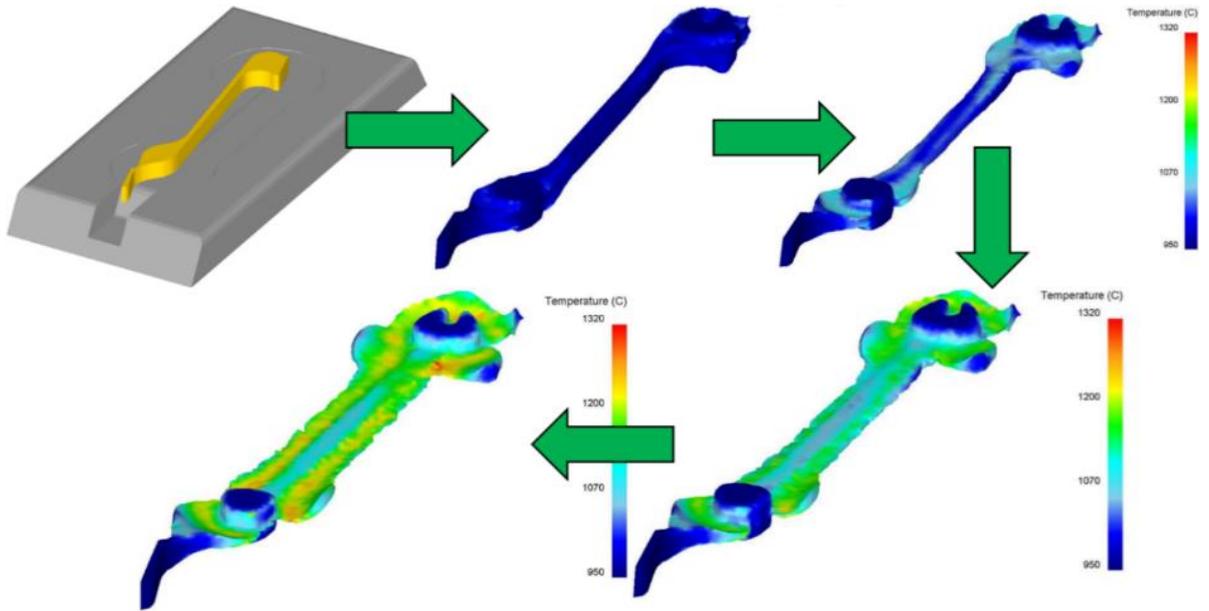


Рисунок 3.14 – Поэтапное формообразование поковки из Z-образной заготовки, показаны поля температуры

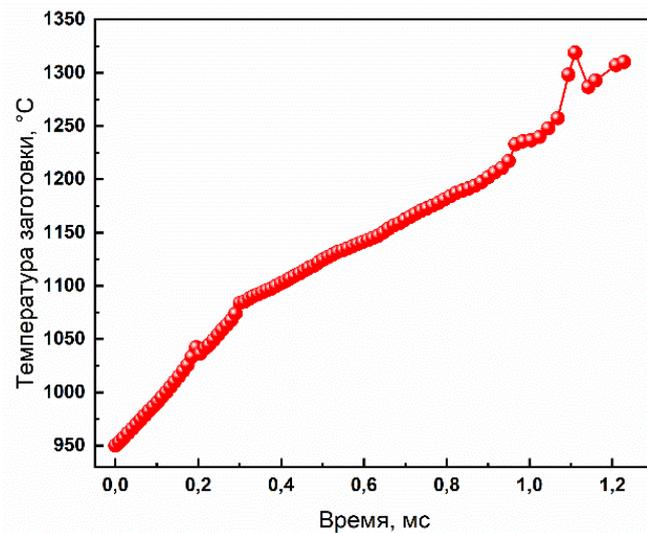


Рисунок 3.15 – Изменение температуры заготовки от времени цикла штамповки

Однако на рисунке 3.14 видно, что данная температура возникла лишь в очень малом объеме заготовки (менее 2% от общего объема) и этими участками является облой, который в дальнейшем будет обрезан. Другими словами реальная угроза перегрева металла в теле поковки отсутствует. Закон изменения температуры от времени цикла ГОШ в данном случае близок к линейному.

Изменение эффективных напряжений, возникающих в заготовке в

процессе штамповки составили +74 %. Колебание численных значений эффективного напряжения происходит в диапазоне от 400 МПа на начальном этапе формоизменения до 698 МПа в конце штамповки (рисунок 3.16).

Во время штамповки на молоте энергия верхней ударной массы достигает максимума в 689 Дж (рисунок 3.17а), а площадь контакта штампа с заготовкой увеличивается на 80% до 38,4 см<sup>2</sup> (рисунок 3.17б). Характер изменения приведенных параметров близок к параболическому.

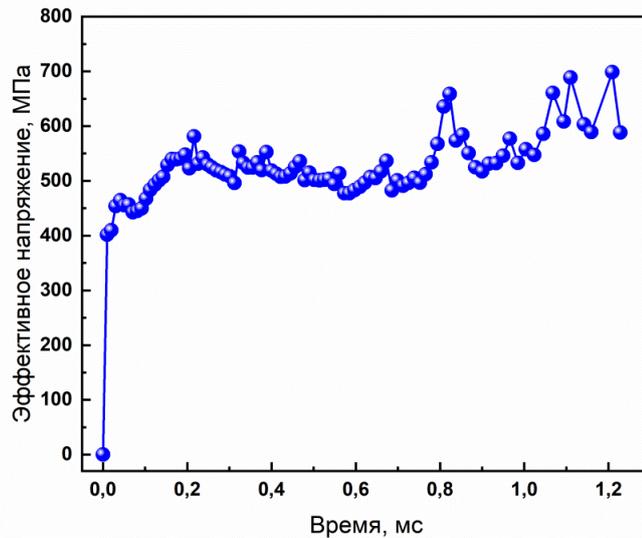


Рисунок 3.16 – Изменения эффективных напряжений, возникающих в заготовке в процессе штамповки

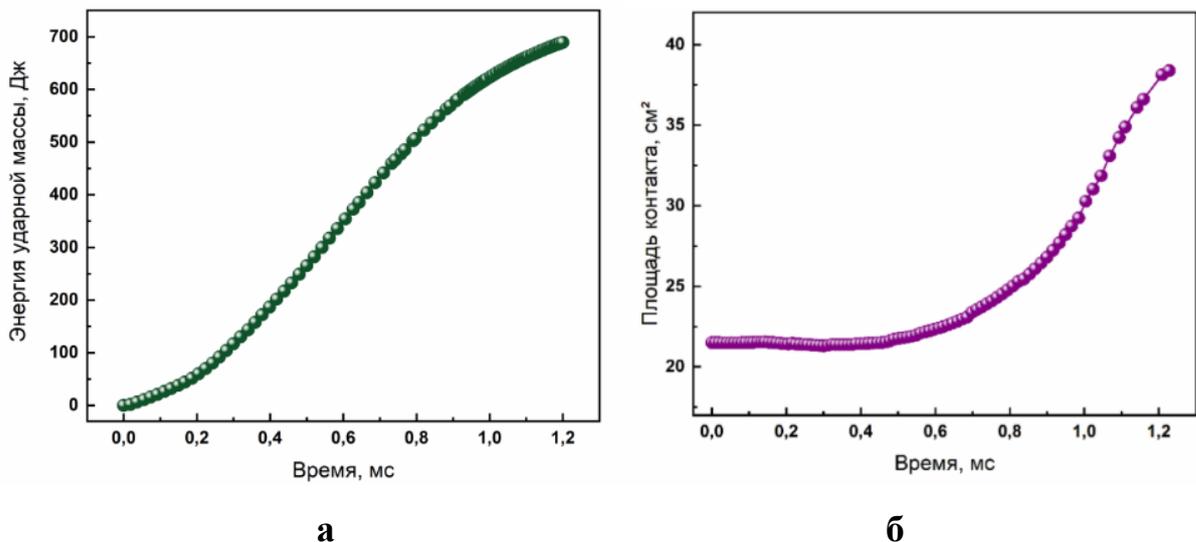


Рисунок 3.17 – Зависимость от времени: а - энергии ударной массы; б - площади контакта

График силы, сопровождающей ГОШ, указывает на постепенное возрастание силы в направлении оси  $Z$  до максимального значения 1014 кН. Резкое падение значения нагрузки в конце хода ударной массы до 637 кН, что видно из рисунка 3.18, можно объяснить возможным отскоком штампа при соударении.

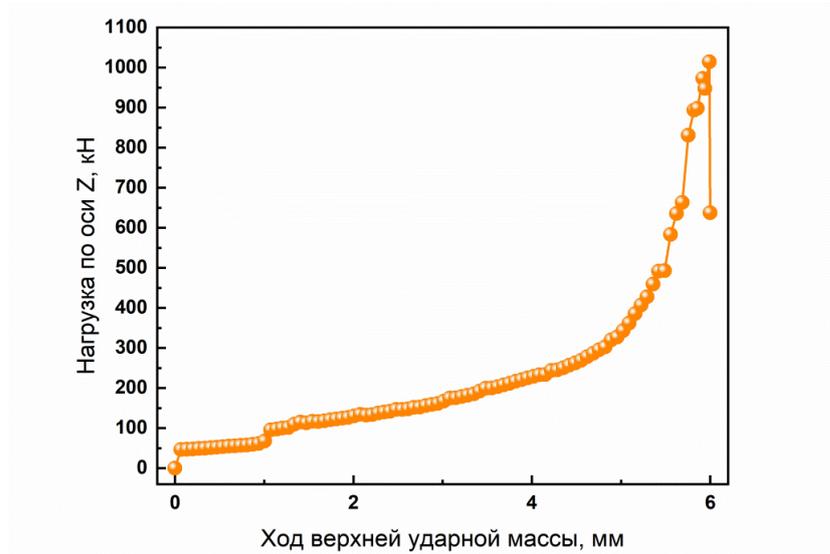


Рисунок 3.18 – Характеристика изменения нагрузки ударной массы в зависимости от ее хода

### 3.3.2 Сравнение эффективности предлагаемых технологий

Сравнительная характеристика процессов ГОШ с использованием двух различных заготовок для штамповки гаечного ключа 4×5 по основным параметрам приведена в таблице 3.6.

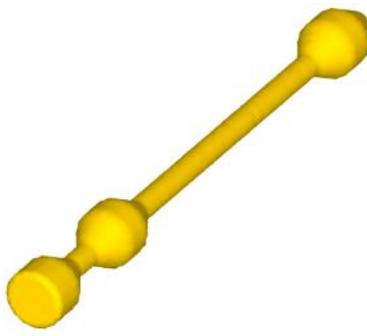
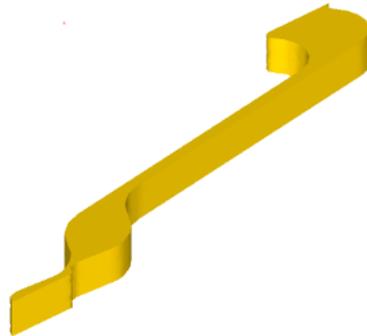
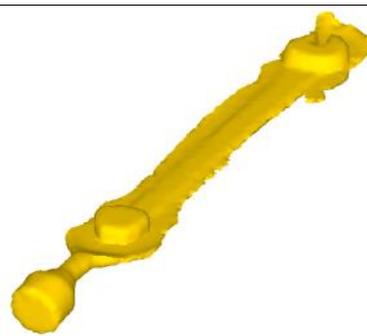
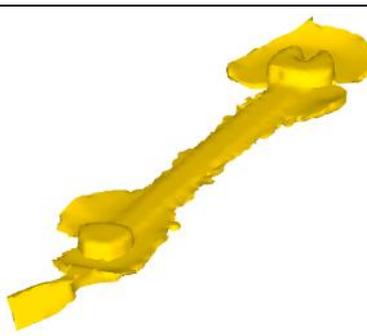
Процесс штамповки на вертикальном ковочном пневматическом молоте МА4129 для заготовки-полуфабриката занял 1,2 мс, а для  $Z$ -образной заготовки 1,6 мс, что в масштабах даже крупной серии незначительно повлияет на производительность молотового оборудования.

Изменение эффективных напряжений для заготовки-полуфабриката, возникающих в заготовке в процессе штамповки составили +20 %, для  $Z$ -образной заготовки +74 %; максимум этих напряжений составил 556 МПа

(рисунок 3.10а) и 698 МПа (рисунок 3.16) соответственно. Можно говорить о незначительной разнице результатов.

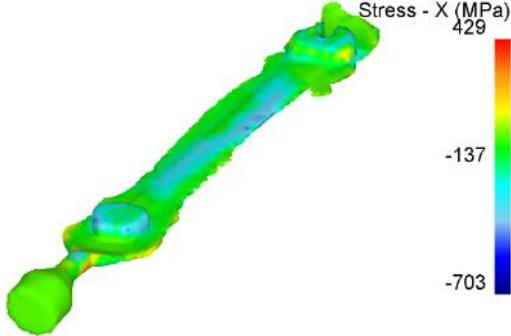
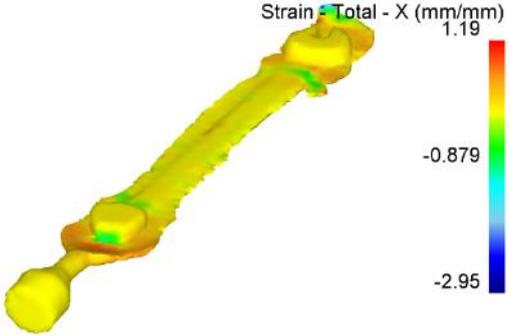
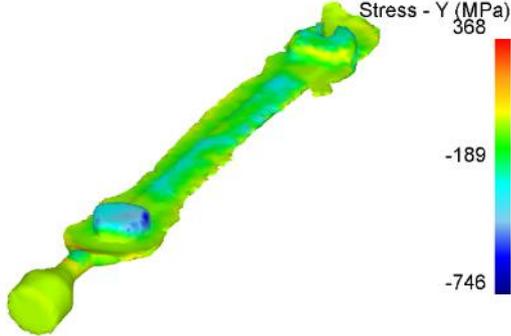
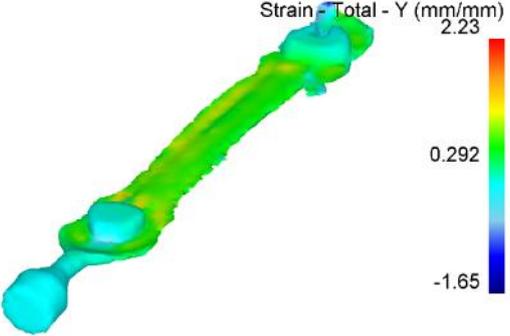
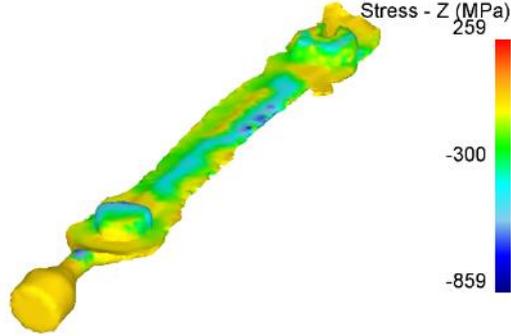
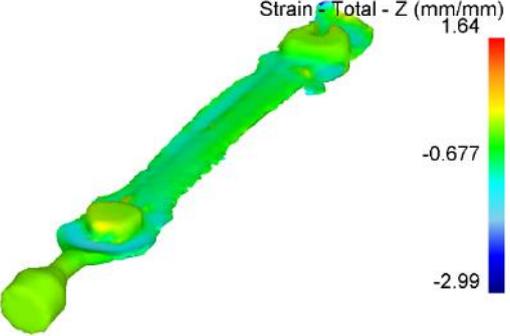
Однако энергия верхней ударной массы для заготовки-полуфабриката достигает максимума в 641 Дж (рисунок 3.11а), для Z-образной заготовки 689 Дж (рисунок 3.17а). Это очень хороший результат при горячей штамповке заготовок за один удар, так как остается еще запас по энергии молота.

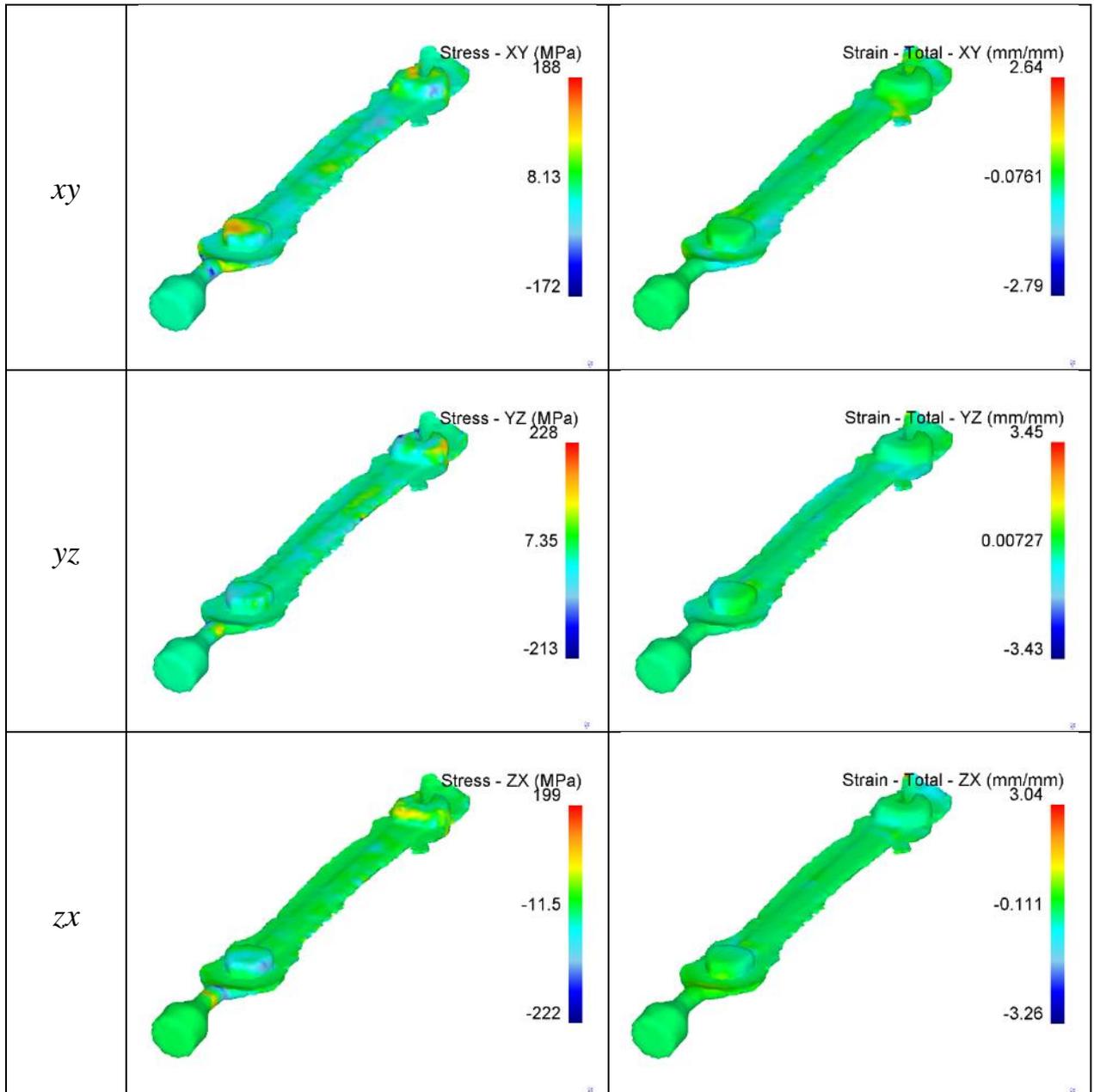
Таблица 3.6 – Сравнение технологии ГОШ из двух видов заготовок

	Вид заготовки	
	Полуфабрикат после поперечно-винтовой прокатки	Z-образная листовая
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

Компоненты тензоров напряжений и деформаций для варианта технологии ГОШ из заготовки, предварительно профилированной поперечно-винтовой прокаткой, показаны в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Напряжения и деформации по трем осям в конце хода для полуфабриката после поперечно-винтовой прокатки

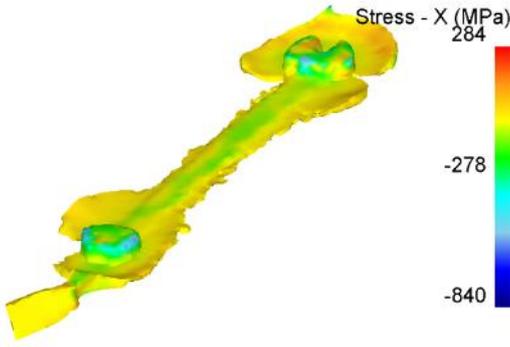
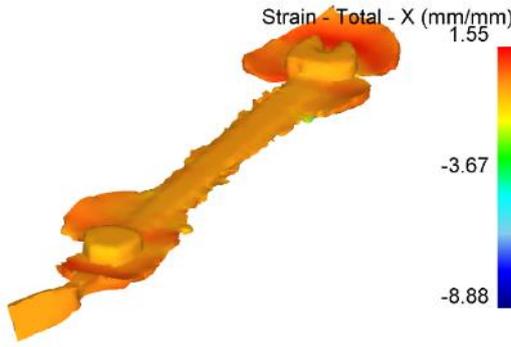
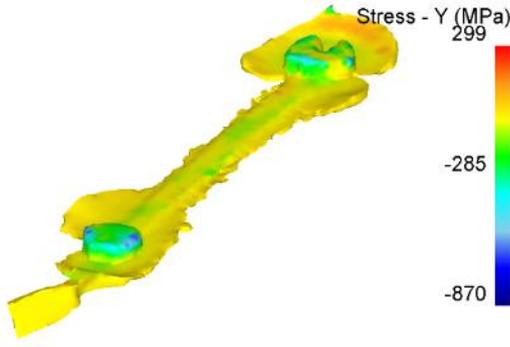
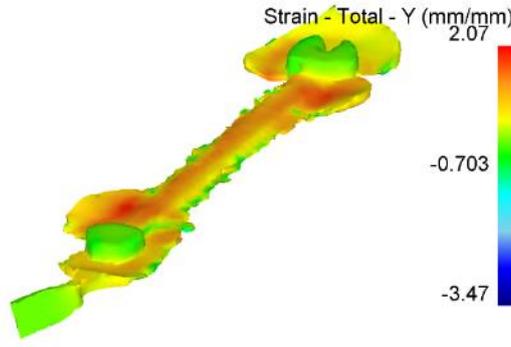
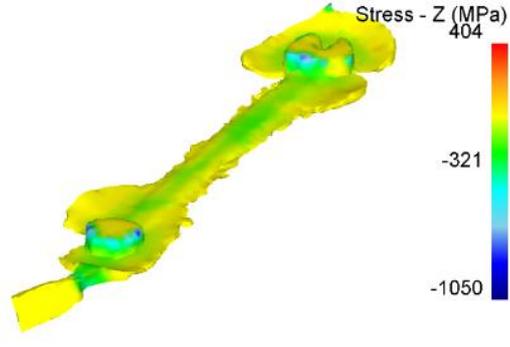
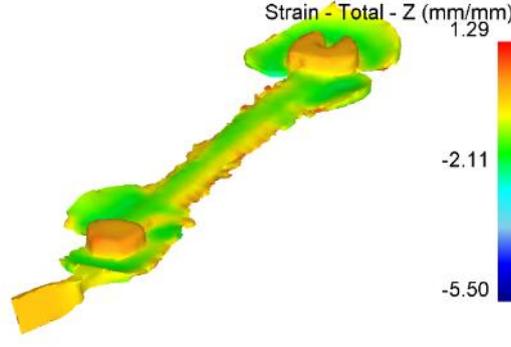
Полуфабрикат после поперечно-винтовой прокатки		
Ось, индекс	Напряжения, МПа	Деформации, мм/мм
x	 <p>Stress - X (MPa) 429 -137 -703</p>	 <p>Strain - Total - X (mm/mm) 1.19 -0.879 -2.95</p>
y	 <p>Stress - Y (MPa) 368 -189 -746</p>	 <p>Strain - Total - Y (mm/mm) 2.23 0.292 -1.65</p>
z	 <p>Stress - Z (MPa) 259 -300 -859</p>	 <p>Strain - Total - Z (mm/mm) 1.64 -0.677 -2.99</p>

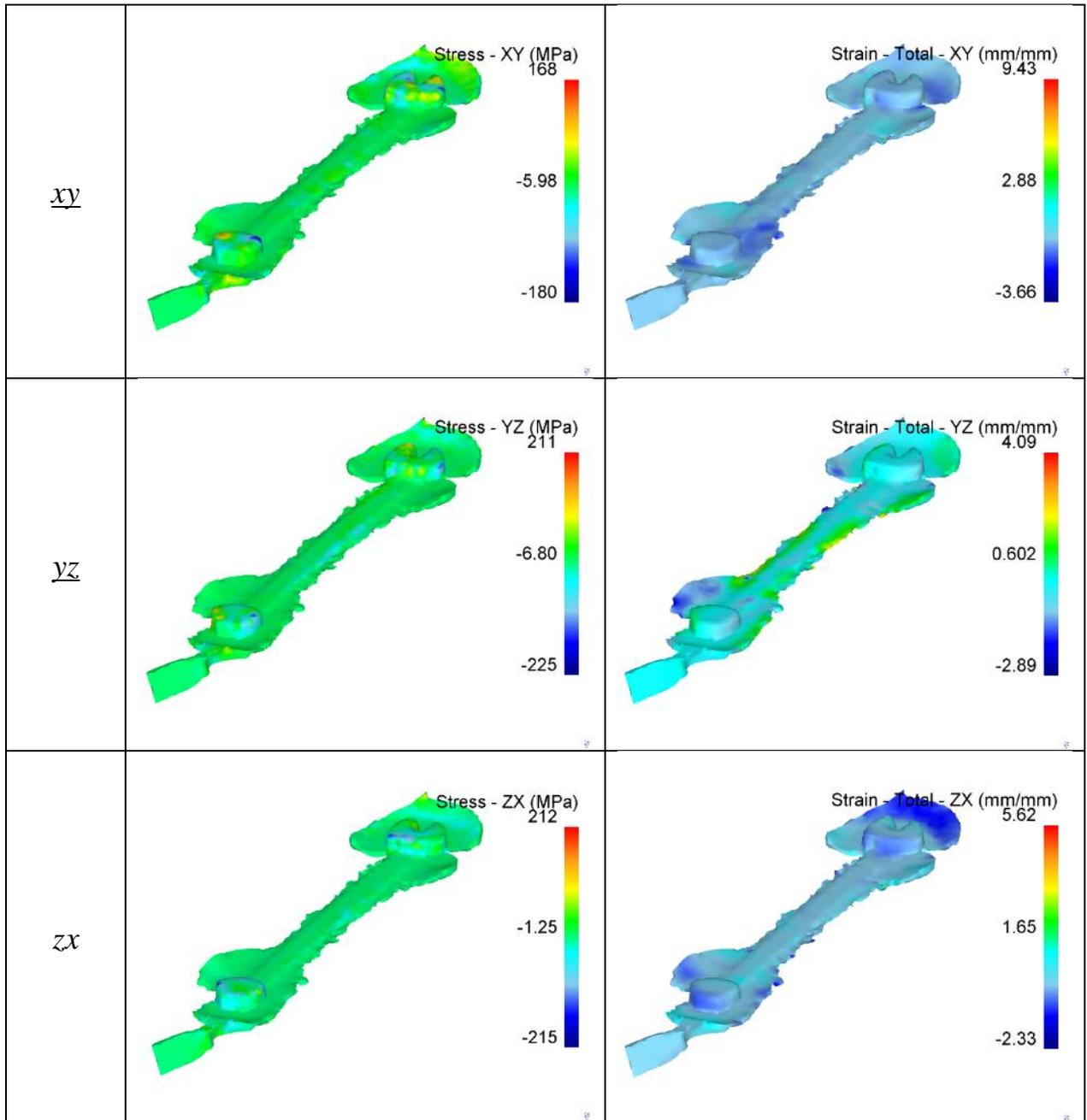


Для заготовки-полуфабриката температура достигла максимума в 1137 °С (рисунок 3.12), а для Z-образной заготовки 1318 °С (рисунок 3.15), что превысило температуру верхнего предела температурного интервала ГОШ 1250 °С. Однако, стоит отметить, что данное температурное значение лишь в объеме менее 2% от общего объема заготовки (рисунок 3.14) и участки с повышенной температурой находятся в зонах облоя. Площадь контакта ударной массы с заготовкой-полуфабрикатом увеличивается на 46% до 35,75 см<sup>2</sup> (рисунок 3.11б), с Z-образной заготовкой на 80% до 38,4 см<sup>2</sup> (рисунок 3.17б).

В таблице 3.8 для конечной стадии обработки Z-образной заготовки показано распределение компонентов тензоров напряжений и деформаций.

Таблица 3.8 – Напряжения и деформации по трем осям в конце хода для Z-образной заготовки

Z-образная листовая заготовка		
Ось, индекс	Напряжения, МПа	Деформации, мм/мм
x	 <p>Stress - X (MPa) 284 -278 -840</p>	 <p>Strain - Total - X (mm/mm) 1.55 -3.67 -8.88</p>
y	 <p>Stress - Y (MPa) 299 -285 -870</p>	 <p>Strain - Total - Y (mm/mm) 2.07 -0.703 -3.47</p>
z	 <p>Stress - Z (MPa) 404 -321 -1050</p>	 <p>Strain - Total - Z (mm/mm) 1.29 -2.11 -5.50</p>



Для удобства визуального сравнения результатов моделирования двух вариантов технологических процессов ГОШ графики по различным параметрам объединены и построены в одних и тех же осях.

Из графиков (рисунок 3.20) видно, что температура повышается за счет теплового эффекта деформации, также увеличивается площадь контакта штампа с металлом заготовки к концу рабочего хода и при увеличении площади контакта штампа с заготовкой во время рабочего хода сила, необходимая для деформации, повышается (рисунок 3.21).

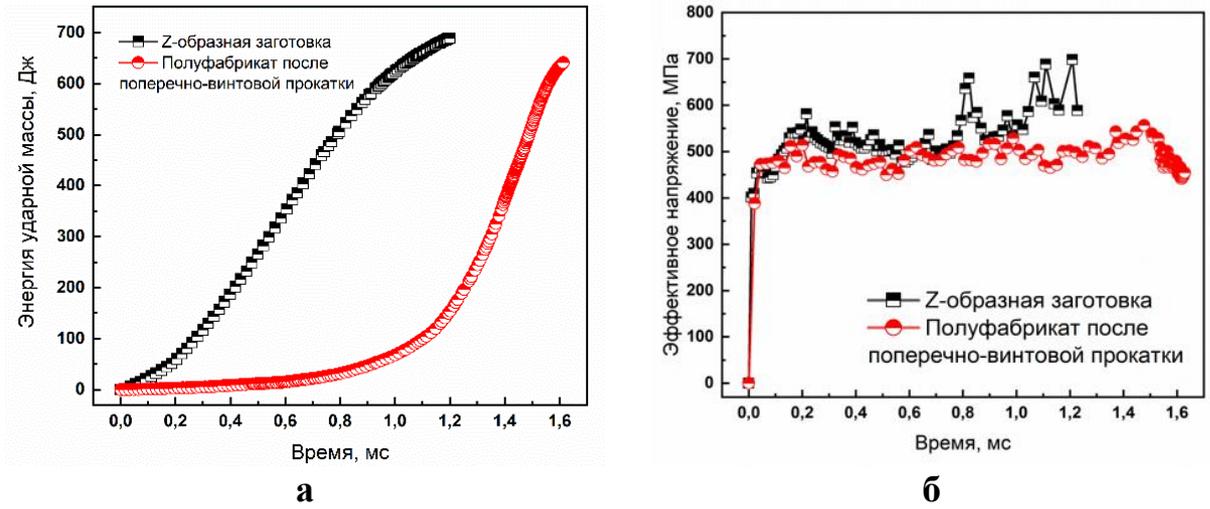


Рисунок 3.19 – Изменение от времени: а - энергии верхней ударной массы; б - эффективных напряжений

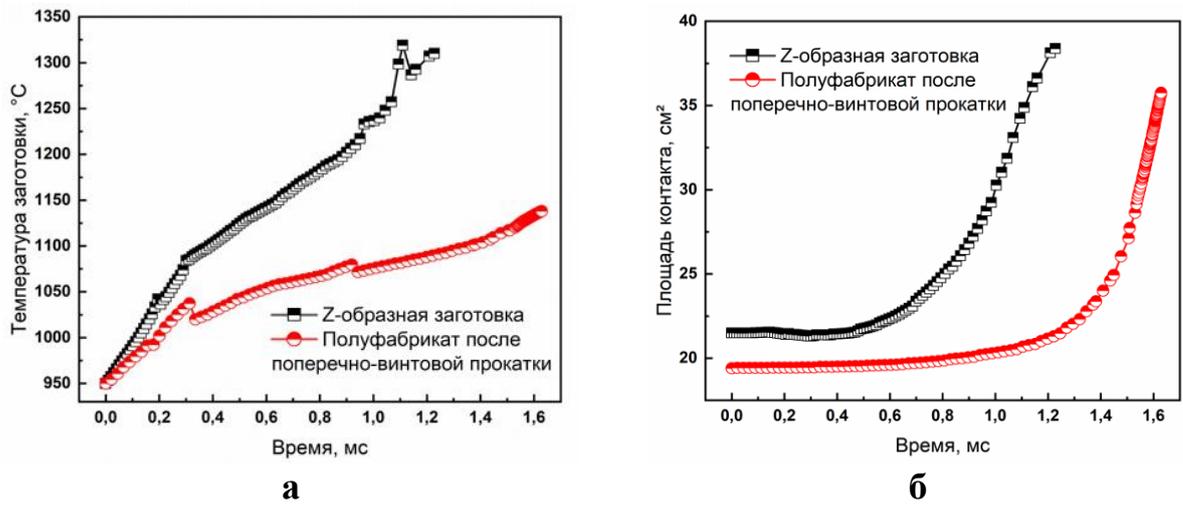


Рисунок 3.20 – Изменение от времени: а - температуры заготовки; б - площади контакта

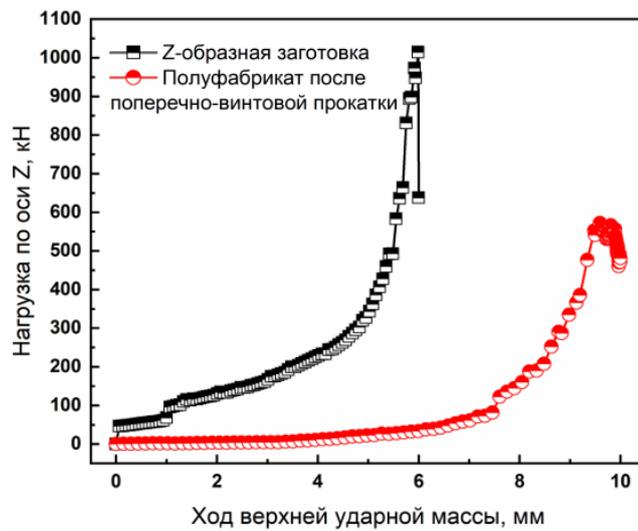
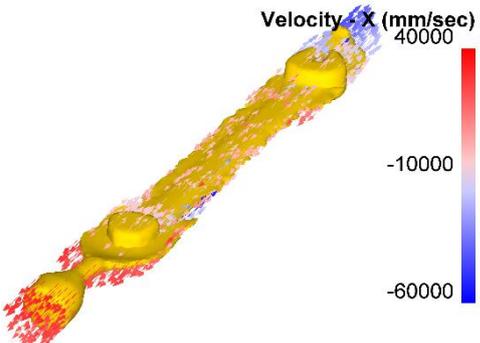
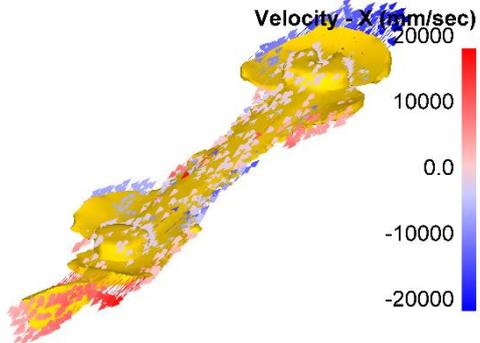
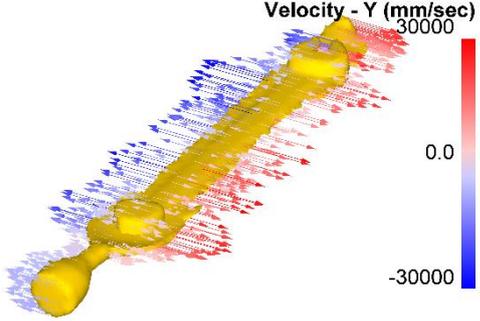
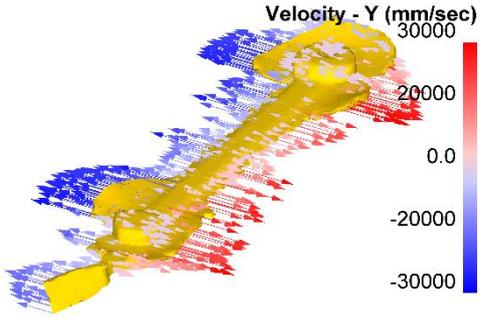
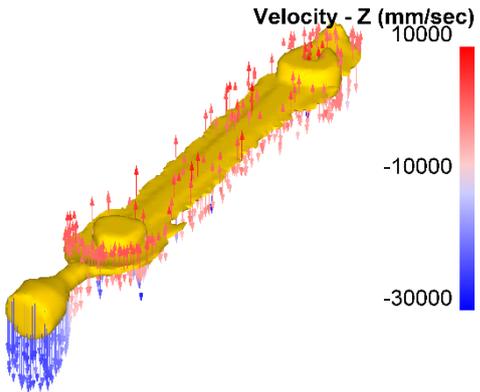
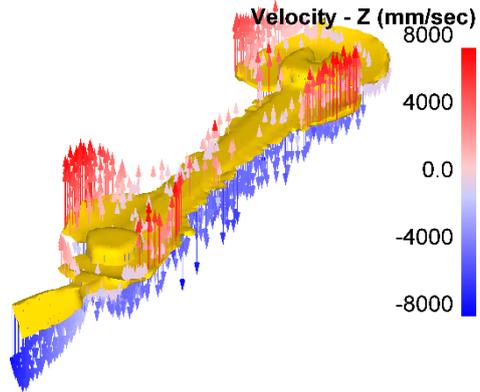


Рисунок 3.21 – Зависимость нагрузки от хода ударной массы

Скорости течения для конечной стадии варианта технологии ГОШ из заготовки, предварительно профилированной поперечно-винтовой прокаткой и для Z-образной заготовки показаны в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Скорости течения по трем осям в конце хода для разных заготовок

Ось, индекс	Полуфабрикат после поперечно-винтовой прокатки	Z-образная листовая заготовка
x		
y		
z		

Видно, что скорости течения достигали максимума 60 м/сек для заготовки, предварительно профилированной поперечно-винтовой прокаткой и 30 м/сек для Z-образной заготовки. Векторы скоростей течения показывают смещения материальных точек в направлениях координатных осей.

### 3.4 Выводы по главе 3

1. Проанализировано влияние размера ячеек сетки КЭ и числа узлов на результаты расчетов. Увеличение количества элементов в сетке кратно влияет на время, затрачиваемое на расчеты (36 минут для 6 тысяч элементов; – 1 час 48 минут для 20 тысяч; – 15 часов 36 минут для 60 тысяч). Число элементов существенно влияет на показатели НДС и тепловые поля, чем гуще сетка элементов, тем точнее результаты расчетов. Однако следует помнить об увеличении времени счета, снижающего производительность расчетов при компьютерном моделировании.

2. В процессе исследования влияния температуры заготовки и штампов на технологические параметры процесса ГОШ и на заполняемость ручья штампа были выявлены следующие закономерности: заполняемость металлом ручья проходит качественнее при верхних значениях температур заготовки и штампов, однако, из-за опасности перегрева, рациональным следует считать значение температуры для заготовки  $950^{\circ}\text{C}$  и значение для штампа  $300^{\circ}\text{C}$  с коэффициентом заполнения облойной канавки 0,4.

3. Судя по графику изменения силовых параметров, величина хода верхней части до полного заполнения металлом гравюры штампа при использовании плоскостной Z-образной заготовки составляет 6 мм против 9,6 мм в варианте 1 (заготовка после поперечно-винтовой прокатки), т.е. рабочий ход в варианте 2 меньше в 1,6 раза.

3. Разница в затрачиваемой энергии удара по двум вариантам штамповки составила 6,97 %. В первом случае затрачивается 16 %, во втором - 17,23 % энергии удара в сравнении с номинальным значением. Для обоих вариантов технологии остается еще существенный запас по энергии молота.

4. По эффективным напряжениям варианты близки. Различаются максимальные значения в конце рабочего хода, по варианту 1 – 556 МПа; по варианту 2 – 698 МПа.

5. Коэффициент использования металла по варианту с Z-образной заготовкой выше в 1,28 раз.

6. Создание параметрических цифровых моделей объектов исследования является необходимым условием при изменении размеров типовых объектов изготовления с сохранением их геометрических форм, что позволит получать необходимые модели корректированием входных параметров геометрии.

## Глава 4. Экспериментальные исследования технологии горячей объемной штамповки поковки гаечного ключа

### 4.1 Физическое моделирование

Физическое моделирование – это метод экспериментального изучения различных физических объектов или явлений, основанный на использовании моделей, имеющих ту же физическую природу, что и исследуемые объекты [90]. Физическое моделирование процессов горячей объемной штамповки на образцах из модельных материалов получило широкое распространение как один из основных методов экспериментальных исследований, обеспечивающий требование геометрического подобия при соблюдении сходства реологических характеристик материалов и близких условий контактного трения. Для достоверности физического моделирования необходимо соблюдение требования подобия двух явлений – в модели и в реальных испытаниях [92].

В физическом моделировании процессов обработки давлением может быть использована теория подобия, с общим законом подобия [157]:

$$F\left(\frac{x}{l_0}, \frac{y}{l_0}, \frac{z}{l_0}, \varepsilon, \frac{\sigma}{\sigma_s}, \frac{\tau}{\sigma_s}, \frac{p}{\sigma_s}, \frac{v\eta}{l_0\sigma_s}, \alpha t, m\right) = 0, \quad (4.1)$$

где  $\frac{x}{l_0}, \frac{y}{l_0}, \frac{z}{l_0}$  - безразмерные координаты геометрического подобия;

$\varepsilon, \frac{\sigma}{\sigma_s}, \frac{\tau}{\sigma_s}, \frac{p}{\sigma_s}$  - подобие напряженно-деформированного состояния;

$\frac{v\eta}{l_0\sigma_s}$  - скоростное подобие;

$\alpha t$  - тепловое подобие;

$m$  - подобие условий трения.

Если при горячей объемной штамповке обеспечить выполнение условия

$\left(\frac{p}{\sigma_s}\right)_M = \left(\frac{p}{\sigma_s}\right)_H$  или  $\frac{p}{\sigma_s} = idem$ , то за этим следует подобие напряженного

состояния модели и природы [157]. Дальнейший анализ показывает, что при равенстве напряжений должны быть равны и соответствующие деформационные параметры. Исследуемый критерий  $\frac{p}{\sigma_s} = idem$  является неуправляемым, поэтому возможностью воздействия на него это изменение параметра  $\sigma_s$  без нарушения других условия, определяемых критериальным уравнением подобия (4.1). Если выполнить геометрическое подобие, то критерий  $\frac{p}{\sigma_s}$  в силу физического смысла зависит от других критериев  $\frac{v\eta}{l_0\sigma_s}, \alpha t, m$ . Два первых критерия оказывают воздействие на  $\sigma_s$ , критерий  $m$  изменяет параметр  $p$ . В связи с этим материал модели может отличаться от материала природы, условие  $(\alpha t)_m = (\alpha t)_n$  выполняется изменением температуры модели  $t_m$ . По существующим зависимостям  $\sigma_s = f(t)$  для различных металлов решается вопрос о пригодности металла, выбранного для модели [157].

В ходе физического моделирования планируется получение данных о силовых режимах штамповки, оценок изменения формы заготовки и степени заполнения гравюры штампа модельным материалом. При лабораторных испытаниях часто используют свинец [25].

Форма и размеры заготовок для физического моделирования были выбраны по результатам компьютерного моделирования с учетом выявленных недостатков [47]. На первом этапе экспериментальных исследований в качестве материала заготовки был выбран пластилин для проверки смыкания и распределения материала в штампе, а затем свинец марки С0 ГОСТ 3778-98 [37]. 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 идут при  $T = -32^\circ\text{C}$ , а при нормальной температуре полностью заканчиваются.

В процессе штамповки свинца будет исследована равномерность распределения облоя по периметру поковки на промежуточных этапах, после

чего производилась разборка оснастки, снятие верхнего штампа и анализировалось окончательное заполнение гравюры [91]. Также в ходе физического моделирования процесса штамповки был проведен анализ изменения внешней формы заготовок и характера заполнения критических участков ручья штампа, снимались данные по нагрузке в зависимости от перемещения верхней части штампа. На заготовку и штамповые вставки наносилась смазка, заготовка помещалась в нижний штамп и прижималась верхним штампом [92].

## **4.2 Изготовление модельной штамповой оснастки**

Для проектирования 3D-модели заготовки и плоских срезов штамповой оснастки по готовому чертежу (Приложение А) использовалось программное обеспечение КОМПАС-3D. По выполненным послойным чертежам на автоматизированном комплексе лазерной резки получен комплект пластин, показанный на рисунке 4.1, для сборки модельного штампа. В качестве материала модельной оснастки использовалась листовая сталь 20. Половины штампа собирались из нескольких пластин разных толщин, которые после центрирования сваривались, затем блок пластин обрезался и ручей подвергался тщательной зачистке.

Фотография изготовленных верхней и нижней половин штампа для проведения физического моделирования ГОШ представлена на рисунке 4.2. Выбор марки металла, послойная конструкция половин штампа и технология сборки с помощью сварки были обусловлены финансовыми затратами на изготовление. Для сравнения, стоимость изготовления модельной штамповой оснастки из пластин почти в 100 раз дешевле, чем аналогичных моделей частей штампов из цельных заготовок той же марки стали. Фактически изготовлен подкладной штамп, с помощью которого будут проводиться эксперименты.



Рисунок 4.1 – Послойная сборка штампа из нескольких составляющих его пластин



Рисунок 4.2 – Фотография верхней и нижней частей модельного штампа с облойной канавкой измененных размеров

### 4.3 Постановка и проведение экспериментальной штамповки

На первом этапе моделирования технологии ГОШ в качестве модельного материала использован пластилин. Исследование полученной «поковки» из цилиндрической пластилиновой заготовки (рисунок 4.3) показало, что смыкание штампов по плоскости разъема происходит без горизонтальных смещений, а заполнение гравюры штампа соответствует результатам компьютерного моделирования, и можно приступать ко 2-му этапу физического моделирования.



Рисунок 4.3 – Полученная «поковка» из пластилина

Для второго этапа эксперимента заготовки были изготовлены из свинцовых слитков средним диаметром  $\varnothing$  44 мм и длиной 100 мм (рисунок 4.4).



Рисунок 4.4 – Слитки из свинца марки С0

С целью получения цилиндрических прутков слитки подвергались прессованию в матрицах с калибрующими диаметрами  $\varnothing$  18, 12, 8 мм (рисунок 4.5) на гидравлическом прессе номинальной силой 2500 кН завода изготовителя «Гидропресс» г. Оренбург (рисунок 4.6).



Рисунок 4.5 – Матричные вставки для прессования прутковых заготовок диаметрами  $\varnothing$  18, 12, 8 мм



Рисунок 4.6 – Гидравлический пресс, на котором получены прутковые заготовки прессованием

Заготовки после прессования изображены на рисунке 4.7. Из полученных прессованием прутков на токарном станке точились полуфабрикаты с формой и размерами, уточненными компьютерным моделированием. Для улучшения центрирования заготовок в модельном штампе они подвергались поперечной осадке с малой степенью деформации, как показано на рисунке 4.8.



Рисунок 4.7 – Прутковые заготовки, полученные прессованием из слитка



Рисунок 4.8 – Предварительно профилированные заготовки из свинца различной формы

Исследование формообразования заготовок было проведено на испытательном комплексе INSTRON KPX 3500 с компьютерной обработкой данных эксперимента, установленном в лаборатории кафедры систем пластического деформирования Центра коллективного пользования «МГТУ «СТАНКИН» (рисунок 4.9).



Рисунок 4.9 – Испытательный комплекс INSTRON KPX 3500

По результатам экспериментальных исследований, кроме визуального отображения на дисплее компьютера, были получены файлы данных по нагрузке и перемещению верхней части штампа, а также составлены диаграммы и сделаны фотографии в ходе эксперимента.

В процессе штамповки фиксировались изменения внешней формы заготовок и качество заполнения критических участков гравюры штампа, для чего на необходимой стадии процесс останавливался, снималась верхняя часть

штампа и анализировалась степень заполнения гравюры штампа и равномерность вытекания металла в облойную канавку.

Штамповка непрофилированной цилиндрической заготовки выявило незаполнение зева ключа, что является неприемлемым результатом (рисунок 4.10) в результате неверного выбора размеров заготовки.

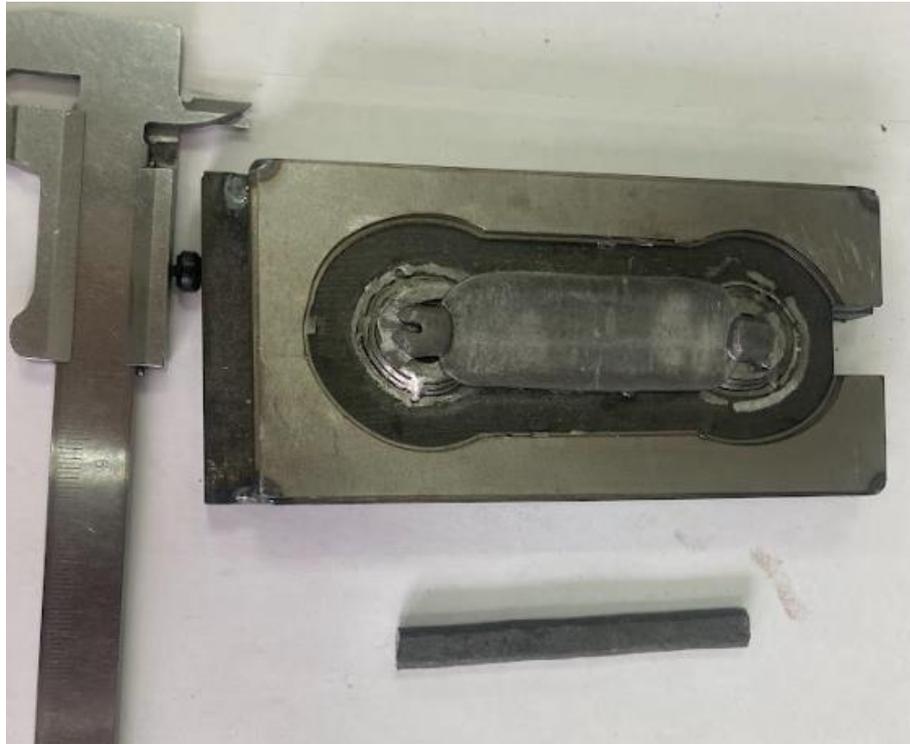


Рисунок 4.10 – Поковка из цилиндрической заготовки с незаполненным зевом

Штамповка профилированной заготовки показала, что ручей штампа заполняется полностью и облой достаточно равномерно распределен по периметру поковки в области мостика (рисунок 4.11).



Рисунок 4.11 – Полученная поковка гаечного ключа

По полученным экспериментальным данным по нагрузке и перемещению верхней части штампа во время процесса штамповки построены соответствующие графические зависимости. (рисунок 4.12).

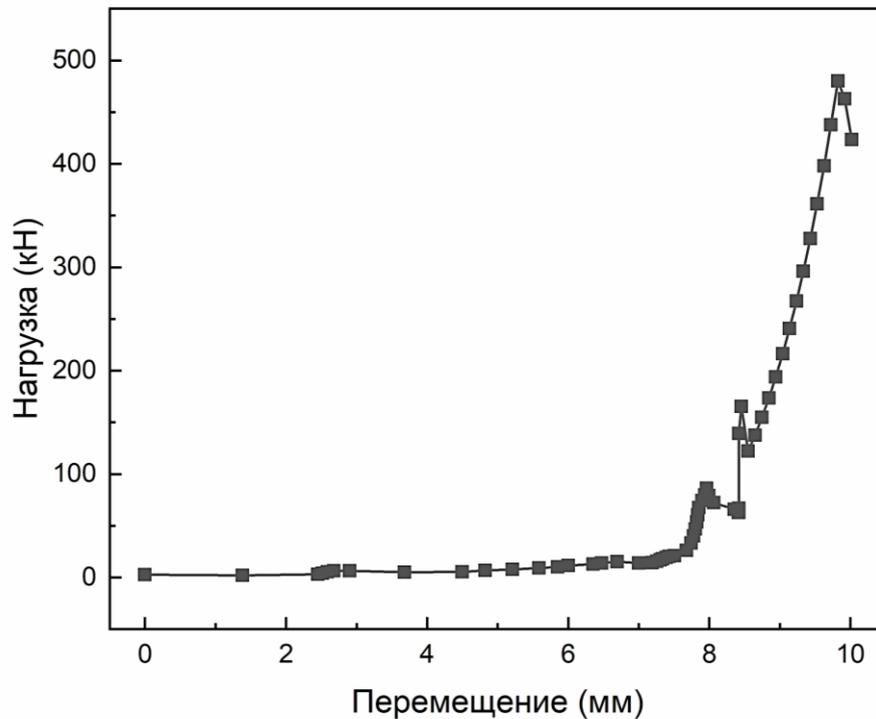


Рисунок 4.12 – Зависимость нагрузки от перемещения верхнего штампа

Дальнейшая штамповка на молоте (рисунок 4.13), установленном в лаборатории кафедры систем пластического деформирования Центра коллективного пользования МГТУ «СТАНКИН» выявила следующий недостаток многослойного штампа. Из-за ударного приложения нагрузки одна из верхних пластин немного деформировалась и поковка получилась со смещением в области ручки (рисунок 4.14).

Исследования по качеству заполнения ручья штампа также 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.



Рисунок 4.13 – Молот с пневматическим приводом модели МА4129



Рисунок 4.14 – Поковка с деформированной ручкой

Поскольку разные типоразмеры гаечных ключей изготавливают согласно ГОСТ из разных материалов, то при моделировании численном и физическом необходимо механические характеристики материалов принимать в соответствии с применяемыми марками сталей.

#### **4.4 Выводы по главе 4**

1. Эксперименты по физическому моделированию предлагаемой технологии ГОШ поковки гаечного ключа выбранного типоразмера 4×5 позволили установить зависимость изменения силовых характеристик деформирования от перемещения ударной массы для заготовок из свинца, применяемого в качестве модельного материала. При величине хода верхней массы 7 мм сила практически остается на нулевой отметке при отсутствии контакта с металлом заготовки, при дальнейшем ходе верхней массы с 7,5 мм до 9,5 мм сила резко возрастает и принимает максимальное значение 500 кН.

2. Что касается геометрических параметров формообразования, то затекание металла в гравюру штампа и ее заполнение происходит согласно прогнозируемым траекториям перемещений и положения линий раздела течения.

3. Поскольку разные типоразмеры гаечных ключей изготавливают согласно ГОСТ из разных материалов, то при моделировании численном и физическом необходимо механические характеристики материалов принимать в соответствии с применяемыми марками сталей.

## Глава 5. Песчаная аналогия в процессах нестационарного течения тонкого пластического слоя металла

Примером математического моделирования процессов ОМД может служить теория нестационарного течения тонкого пластического слоя (ТТТПС) А.А. Ильюшина [60], описывающая напряженно-деформированное состояние металла в таких процессах, как ковка, объемная штамповка и прокатка. Формообразование поковок в процессах штамповки определяется кинематической схемой течения металла. Некоторых положений теории течения тонкого пластического слоя мы коснулись в разделе 1.3 обзорной части диссертации.

### 5.1 Постановка краевой задачи

Переходя к математической формулировке задачи нестационарного пластического течения в тонком слое, предположим заданной геометрическую поверхность, которая совпадает с поверхностью одного из тел штампового инструмента [62]:

$$F(x, y, z) = 0. \quad (5.1)$$

Перейдем в уравнении (5.1) к векторной параметрической форме [62]:

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(\alpha, \beta), \quad (5.2)$$

причем линии скольжения  $\alpha, \beta$  выбраны так, чтобы векторы  $\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \alpha}, \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \beta}$  были ортогональны, поэтому  $\alpha$  и  $\beta$  будут являться ортогональными криволинейными координатами поверхности (5.1). Первая квадратичная форма (квадрат дифференциала дуги) поверхности будет иметь вид [62]:

$$(d\mathbf{r})^2 = ds_1^2 + ds_2^2,$$

$$d\mathbf{r} = \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \alpha} d\alpha + \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \beta} d\beta,$$

$$ds_1 = A d\alpha, \quad ds_2 = B d\beta,$$

где  $ds_1, ds_2$  – дифференциалы дуг поверхности, взятые по криволинейным координатам;  $A(\alpha, \beta), B(\alpha, \beta)$  – коэффициенты первой квадратичной формы. Если считать  $\alpha, \beta$  линиями кривизны, то  $R_1, R_2$  – главные радиусы кривизны поверхности соответственно для линий  $ds_1$  и  $ds_2$ . Известно [60], что коэффициенты первой квадратичной формы  $A$  и  $B$  и радиусы  $R_1$  и  $R_2$  должны удовлетворять уравнениям Гаусса – Кодацци [62]:

$$\begin{aligned} A \frac{\partial}{\partial \beta} \left( \frac{1}{R_1} \right) + \frac{\partial A}{\partial \beta} \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) &= 0, \\ B \frac{\partial}{\partial \alpha} \left( \frac{1}{R_2} \right) + \frac{\partial B}{\partial \alpha} \left( \frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right) &= 0, \\ \frac{AB}{R_1 R_2} + \frac{\partial}{\partial \alpha} \left( \frac{1}{A} \frac{\partial B}{\partial \alpha} \right) + \frac{\partial}{\partial \beta} \left( \frac{1}{B} \frac{\partial A}{\partial \beta} \right) &= 0. \end{aligned} \quad (5.3)$$

Рассмотрим произвольную точку  $M(\alpha, \beta)$  на поверхности (5.2) и бесконечно малую ее окрестность. Проведем в этой точке касательную плоскость к поверхности и спроектируем на нее окрестность поверхности с сеткой криволинейных координат. С точностью до малых высшего порядка кривизны линий поверхности в проекциях на касательную плоскость будут равны кривизнам проекций тех же линий на касательную плоскость. Из рисунка 5.1 видно, что радиусы кривизны линий  $\alpha$  и  $\beta$  удовлетворяют соотношениям [62]:

$$\begin{aligned} \frac{ds_1}{R_\alpha} &= \frac{\partial(ds_1)}{\partial \beta} \frac{\partial \beta}{\partial s_2}, \\ \frac{ds_2}{R_\beta} &= \frac{\partial(ds_2)}{\partial \alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial s_1}. \end{aligned}$$

Отсюда радиусы кривизн линий  $\alpha, \beta$  в касательной плоскости [62]:

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_\alpha} &= \frac{1}{AB} \frac{\partial A}{\partial \beta}, \\ \frac{1}{R_\beta} &= \frac{1}{AB} \frac{\partial B}{\partial \alpha}. \end{aligned} \quad (5.4)$$

Таким образом, найдены радиусы  $R_1, R_2$  в направлении нормали к поверхности и касательные радиусы  $R_\alpha, R_\beta$  кривизн линий поверхности (5.2).

Этим поверхность (5.1) вполне определяется с точностью до ее переносного движения. Величины  $A, B, R_1, R_2$  выражаются через уравнение поверхности в форме (5.2) по известным формулам теории поверхностей. Поскольку ось  $z$  мы направляем по нормали к поверхности (5.2) области пластического течения, то положительным является тот радиус кривизны, для которого центр кривизны лежит на отрицательном направлении оси  $z$ .

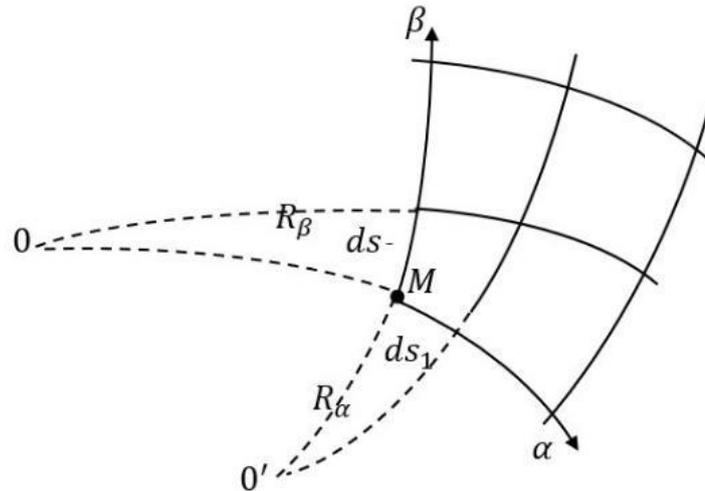


Рисунок 5.1 – Сетка ортогональных линий скольжения, где линии  $\alpha$  и  $\beta$  взяты за криволинейные оси координат

К точкам рассматриваемой поверхности проведем перпендикулярные прямые одинаковой длины равной  $h(\alpha, \beta, t)$ . Если соединить концы отрезков, то получим рабочую поверхность штампа, отстоящую от рассматриваемой на расстояние равное толщине слоя материала  $h(\alpha, \beta, t)$ .

## 5.2 Гипотезы и допущения

Для описания процесса течения в тонком слое пластического материала примем следующие кинематические гипотезы [60]:

- проекции на касательную плоскость (5.1) скоростей физических частиц пластического вещества, расположенных на общей нормали к поверхности

(5.1), практически не отличаются и могут быть приняты равными;

- те же рассуждения касаются и скоростей деформаций материальных частиц деформируемого слоя, которые лежат на общей нормали к (5.1) и их изменениями с точностью до малых величин можно пренебречь, что делает возможным заменить их средней скоростью изменения толщины слоя;

- отношения скоростей деформации к их интенсивности по толщине слоя отличаются на малую величину и могут быть заменены отношением 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 [148] и в тоже время нормальные напряжения вдоль линий  $\alpha$  и  $\beta$  с точностью до величин  $\frac{h}{L}$  в сравнении с единицей равны между собой. Третье нормальное напряжение равно среднему давлению в слое и находится из условия пластичности Мизеса [77]:

$$\sigma_i = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = \sigma_s \quad (5.5)$$

или [62]

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_1 + p = \sigma_s \quad (5.6)$$

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 [62]:

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_{\alpha\alpha} = \dot{\varepsilon}_1 &= \frac{1}{A} \frac{\partial u}{\partial \alpha} + \frac{v}{AB} \frac{\partial A}{\partial \beta}, \\ \dot{\varepsilon}_{\beta\beta} = \dot{\varepsilon}_2 &= \frac{1}{B} \frac{\partial v}{\partial \beta} + \frac{u}{AB} \frac{\partial B}{\partial \alpha}, \\ \dot{\gamma}_{\alpha\beta} = \dot{\varepsilon}_{12} &= \frac{1}{B} \frac{\partial u}{\partial \beta} + \frac{1}{A} \frac{\partial v}{\partial \alpha} - \frac{u}{AB} \frac{\partial A}{\partial \beta} - \frac{v}{AB} \frac{\partial B}{\partial \alpha}. \end{aligned} \quad (5.7)$$

Средняя скорость относительного изменения толщины слоя при его сжатии [62]:

$$\dot{\varepsilon}_{zz} = \dot{\varepsilon}_3 = \frac{1}{h} \left( \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{u}{A} \frac{\partial h}{\partial \alpha} + \frac{v}{B} \frac{\partial h}{\partial \beta} \right) = \frac{1}{h} \frac{dh}{dt} = \frac{d \ln h}{dt}. \quad (5.8)$$

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 [77]:

$$\frac{\partial \lambda}{\partial t} + \frac{u}{A} \frac{\partial \lambda}{\partial \alpha} + \frac{v}{B} \frac{\partial \lambda}{\partial \beta} = \varepsilon_i. \quad (5.9)$$

Воспользовавшись связью напряжений и скоростей деформаций, найдем главные напряжения [62]:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma + \frac{2\delta \sigma_s}{3} \frac{\sigma_s}{\varepsilon_i} \varepsilon_1, & \sigma_3 &= \sigma + \frac{2\delta \sigma_s}{3} \frac{\sigma_s}{\varepsilon_i} \varepsilon_3, \\ \sigma_2 &= \sigma + \frac{2\delta \sigma_s}{3} \frac{\sigma_s}{\varepsilon_i} \varepsilon_2, & \sigma_{12} &= \frac{\delta \sigma_s}{3} \frac{\sigma_s}{\varepsilon_i} \varepsilon_{12}, \end{aligned} \quad (5.10)$$

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  $\frac{\pi}{4} \leq \delta \leq 1$ .

Из экспериментальных данных по сжимаемости известно, что изменение объема происходит упруго, т.е. оно будет малым по сравнению с развитыми пластическими деформациями. Это позволяет воспользоваться условием несжимаемости [21], которое на основании (5.7) и (5.8) запишется в главной системе координат [62]:

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0 \quad (5.11)$$

или [62]

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{AB} \frac{\partial}{\partial \alpha} (hBu) + \frac{1}{AB} \frac{\partial}{\partial \beta} (hAv) = 0. \quad (5.12)$$

Интенсивность скоростей деформаций при условии (5.11) равна [62]:

$$\varepsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_1 \varepsilon_2 + \varepsilon_3^2 + \frac{1}{4} \varepsilon_{12}^2} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varepsilon_2^2 + \varepsilon_2 \varepsilon_3 + \varepsilon_3^2 + \frac{1}{4} \varepsilon_{12}^2} \quad (5.13)$$

В выражениях (5.9) - (5.13) диакритический знак «верхняя точка» над обозначением скоростей деформаций опущен.

Следующие гипотезы относятся к закону трения на контактных поверхностях. Обозначим через  $T_1$  и  $T_2$  касательные контактные напряжения трения, которые зависят от функции давления, относительных скоростей скольжения и коэффициентов трения. Опыт показывает [80, 83, 151], что при сухом трении область контакта может быть условно разделена на три зоны.

При наличии относительного скольжения по физической поверхности инструмента (зона скольжения, примыкающая к границе области материала слоя) касательное напряжение, вызванное трением, определяется законом Кулона, пока оно меньше или равно пределу текучести материала слоя на сдвиг  $\tau_s$ . Направление этого напряжения противоположно направлению вектора относительной скорости скольжения материала. Эта гипотеза основана на законе Кулона.

Второй зоной является зона торможения, где касательное напряжение достигает величины равной пределу текучести материала на сдвиг  $\tau = \tau_s$ . В этой зоне справедлив закон трения Прандтля – Зибеля.

Третья зона названа зоной застоя, в которой касательное напряжение изменяется по линейному закону в диапазоне  $\tau_s \geq \tau \geq 0$ .

Размеры зон скольжения и застоя того же порядка, что и толщина слоя и, следовательно, с удовлетворительной точностью можно считать, что  $T_1 = T_2 = \tau_s$ .

При наличии смазки напряжение трения является заданной функцией [80, 83, 151] относительно скорости скольжения массы и нормального давления; направление касательного напряжения противоположно направлению вектора скорости течения материала.

Если нормальное давление на контактной поверхности отсутствует, то

касательное контактное напряжение отсутствует или пренебрежимо мало.

### 5.3 Решение краевой задачи

Как отмечалось ранее, рассмотрению подлежат процессы активной деформации с относительно небольшими скоростями, поэтому толщина слоя является мало и плавно изменяющейся функцией координат, направление вектора касательного напряжения, вызванного силами контактного трения, противоположно направлениям относительных скоростей скольжения. Сказанное приведет к условиям сохранения импульсов, действующих на элементарный объем слоя  $\rho h A d\alpha B d\beta$ , описываемым уравнениями [59]:

$$\begin{aligned} \rho g_\alpha + \frac{\partial p}{A d\alpha} &= -\frac{2\tau_s}{h} \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}} \frac{\partial p}{B d\beta} = -\frac{2\tau_s}{h} \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}}; \\ \rho g_\beta + \frac{\partial p}{B d\beta} &= -\frac{2\tau_s}{h} \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}} \frac{\partial p}{A d\alpha} = -\frac{2\tau_s}{h} \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}}. \end{aligned} \quad (5.14)$$

где  $g_\alpha, g_\beta$  – ускорения вдоль направлений  $\alpha$  и  $\beta$ .

Кроме того, квазистатическое нагружение деформируемого тонкого слоя позволяет пренебречь силами инерции, тогда для контактного давления получаем уравнение, независящее от компонент скоростей течения [59]:

$$\left(\frac{\partial p}{A d\alpha}\right)^2 + \left(\frac{\partial p}{B d\beta}\right)^2 = \frac{4\tau_s^2}{h^2} \quad (5.15)$$

В частном случае, когда течение слоя происходит под действием параллельных плоскостей штампового инструмента,  $A d\alpha = dx, B d\beta = dy$  и уравнение (5.15) преобразуется следующим образом [59]:

$$\left(\frac{\partial p}{dx}\right)^2 + \left(\frac{\partial p}{dy}\right)^2 = \frac{4\tau_s^2}{h^2} \quad (5.16)$$

Выпишем граничные условия задачи. На краю облойного мостика контактное давление  $p = p'_0$ , где  $p_0$  находится из того условия, что течение в районе облойного мостика происходит по тем же законам течения тонкого слоя по недеформируемым плоскостям, при этом ось  $x$  направлена как

показано на рисунке 5.2.

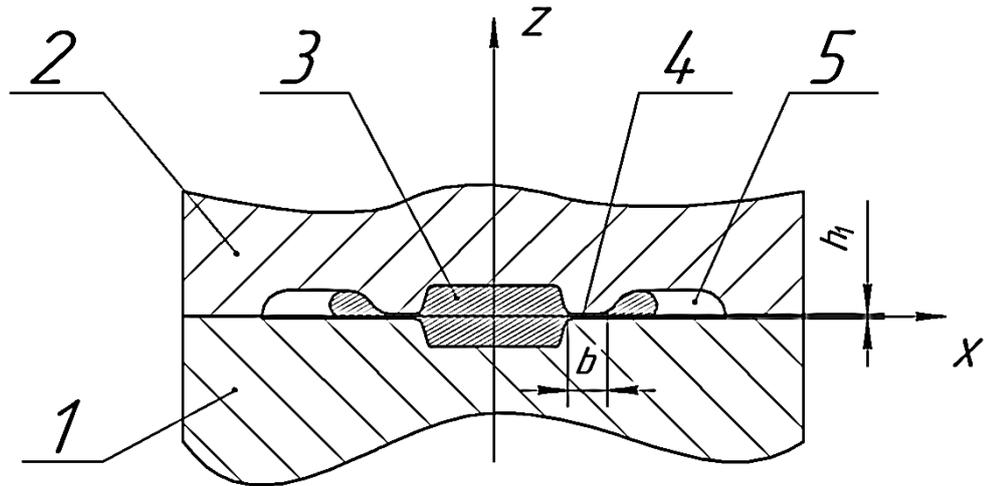


Рисунок 5.2 – Вытекание металла в облой: 1 – нижний штамп; 2 – верхний штамп; 3 – поковка; 4 – облойный мостик; 5 - магазин

Тогда для давления в щели мостика имеем уравнение [59]:

$$\frac{\partial p'}{\partial x} = -\frac{2\tau_s}{h_1}, \quad (5.17)$$

где  $h_1$  – высота облойного мостика.

На выходе металла в зону магазина при  $x = b$  граничным условием будет  $p' = \sigma_s$  ( $b$  – ширина облойного мостика). Интегрируем (5.17) с учетом граничного условия и получаем решение задачи в виде [59]:

$$p' = \sigma_s + \frac{2\tau_s}{h_1}(b - x). \quad (5.18)$$

Следовательно, давление на входе в облойный мостик будет [59]:

$$p'_0 = p'|_{x=0} = \sigma_s + \frac{2\tau_s}{h_1}b = \sigma_s \left[ 1 + \frac{2b}{\sqrt{3}h_1} \right]. \quad (5.19)$$

Из (5.19) следует, что, если  $b \sim h_1$ , то  $p'_0 \sim 2\sigma_s$ .

Если вместо функции давления  $p$  можно ввести новую функцию в соответствии с уравнением [59]:

$$z = \frac{h}{2\tau_s} \left( p - \sigma_s - \frac{2b}{\sqrt{3}h_1} \sigma_s \right), \quad (5.20)$$

которая удовлетворяет уравнению [59]:

$$\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2 = 1 \quad (5.21)$$

и граничному условию  $z = 0$  на границе области  $G$ .

Уравнение (5.21) вместе с условием на границе подтверждают существование аналогии в задачах растекания тонкого слоя и определения параметров предельной насыпи из однородного песка [61, 62].

### 5.3.1 Метод песчаной аналогии

Сложная форма поковок накладывает ограничения не только на параметры технологических процессов штамповки, но и на выбор методов теоретического анализа НДС, теплового фактора, сил деформирования. Невозможным является определение с достаточной точностью конфигурации линий раздела течения в различных зонах поковки, а также направления линий тока.

Нестационарность течения в тонком слое металла затрудняет восстановление границ областей течения в разных зонах поковки на этапах деформирования. Эти проблемы можно решить применением компьютерного моделирования на виртуальных моделях, как было показано ранее, однако не всегда имеется возможность использовать проблемно-ориентированное программное обеспечение.

Более простой подход к анализу законов течения металла в тонком слое обеспечивает метод песчаной аналогии [21], с помощью которого оценивают качественные характеристики: расположение и конфигурацию линий раздела течения на отдельных участках поковки, а вместе с ними и направления линий тока. Так же оказывается возможным восстановление границ областей нестационарного течения, используя расход металла, перетекающего через участок границы, совместно с законом кратчайшей нормали к периметру.

Используя форму предельной насыпи однородного песка по объему

эпюры определяют необходимую силу для перевода тонкого деформируемого слоя в пластическое состояние.

### 5.3.2 Постановка эксперимента для песчаной аналогии

В нашем случае задача ставится следующая: пластический материал сжимается двумя полуштампами. В начальный момент времени поверхность материала ограничена известным контуром, задаваемым формой заготовки. Во время процесса материал свободно растекается до момента его касания стенок гравюры штампа. Толщина слоя характерных  $i$ -х участков поковки в каждый фиксированный момент деформирования постоянна  $h_i = const$ .

Скорость сближения полуштампов известна как функция времени  $dh_i/dt$ . После достижения металлом стенок гравюры наряду с его перераспределением в ручье, одновременно идут процессы вытекания металла в облой через сужающуюся щель облойного мостика. Процесс деформирования заканчивается в момент соударения подвижной части штампа о неподвижную.

Для аналогового моделирования была изготовлена 3D печатью из пластмассы поверхностная модель, соответствующая контуру формы поковки гаечного ключа  $4 \times 5$  в плане, которая показана на рисунке 5.3.

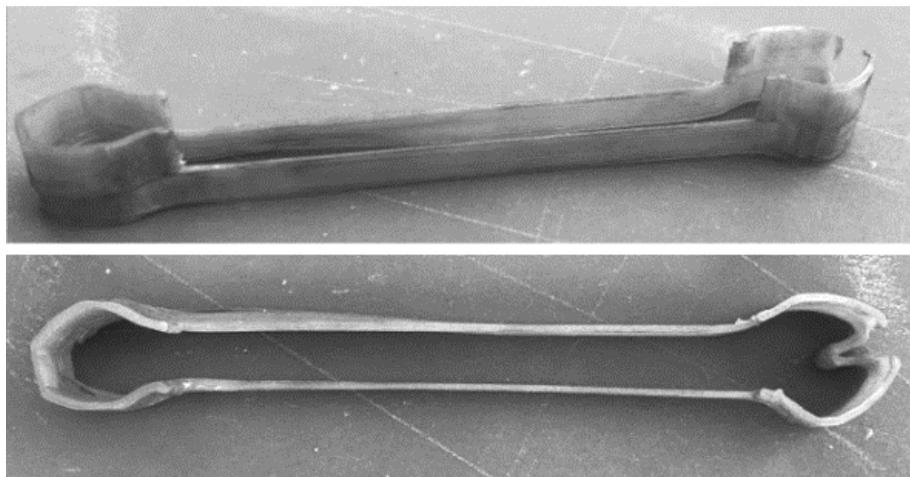


Рисунок 5.3 – Контурная модель поковки гаечного ключа

Далее необходимо подобрать такой однородный мелкодисперсный песок, с теоретически одинаковым коэффициентом внутреннего трения  $\nu$ , причем положить  $\nu = tg\varphi$ . Наполнить им контурную модель, у которой форма и размеры в плане соответствуют исследуемой поковке, а значит и области течения.

При достижении насыпью определенной высоты песок будет свободно осыпаться с бортов наполняемой формы, образуя предельную насыпь, строго определенной формы, высотная координата которой  $\zeta$  должна удовлетворять уравнению [61]:

$$\left(\frac{\partial\zeta}{dx}\right)^2 + \left(\frac{\partial\zeta}{dy}\right)^2 = \nu^2 \quad (5.22)$$

в котором функция  $\zeta$  на границе области течения принимает значение [61]:

$$\zeta|_G = 0. \quad (5.23)$$

Образованная песчаная насыпь предельной высоты при попытках продолжить насыпать на нее песок, будет сохранять форму, высотные размеры и угол наклона ее образующей  $\varphi$ .

Если посмотреть на насыпь сверху, то картина следующая: от бортов к линии симметрии формы образованная насыпью поверхность содержит прямолинейные образующие.

Введем новую переменную  $\frac{\zeta}{\nu}$ , такую, что она в силу тождественности уравнений и граничных условий, которым эти функции удовлетворяют, будет совпадать с функцией  $z$ . Поэтому имеем следующее уравнение [61]:

$$p = \sigma_s \left[ 1 + \frac{2l}{\sqrt{3}\delta} \right] + \frac{\zeta}{\nu} \frac{2\tau_s}{h}. \quad (5.24)$$

Подобрав песок, чтобы величина его коэффициента  $\nu$  численно совпадала со значением отношения  $\frac{2\tau_s}{h}$ , (напомним, что  $\tau_s$  – предел текучести металла на сдвиг), тогда функция давления выразится [61]:

$$p = \sigma_s \left( 1 + \frac{2l}{\sqrt{3}\delta} \right) + \zeta, \quad (5.25)$$

По контуру модели гаечного ключа высота вертикального борта формы соответствует величине  $\sigma_s \left(1 + \frac{2l}{\sqrt{3}\delta}\right)$  (рисунок 5.3). В этом случае высотный размер насыпи  $\zeta$  будет совпадать по величине с давлением  $p$  на контактной поверхности области течения, и для этих функций математические постановки задач будут одинаковы.

По песчаной насыпи (рисунок 5.4) определяем границу раздела течения металла на характерных участках, т.е. геометрическое место точек, определяющих ребро давления.

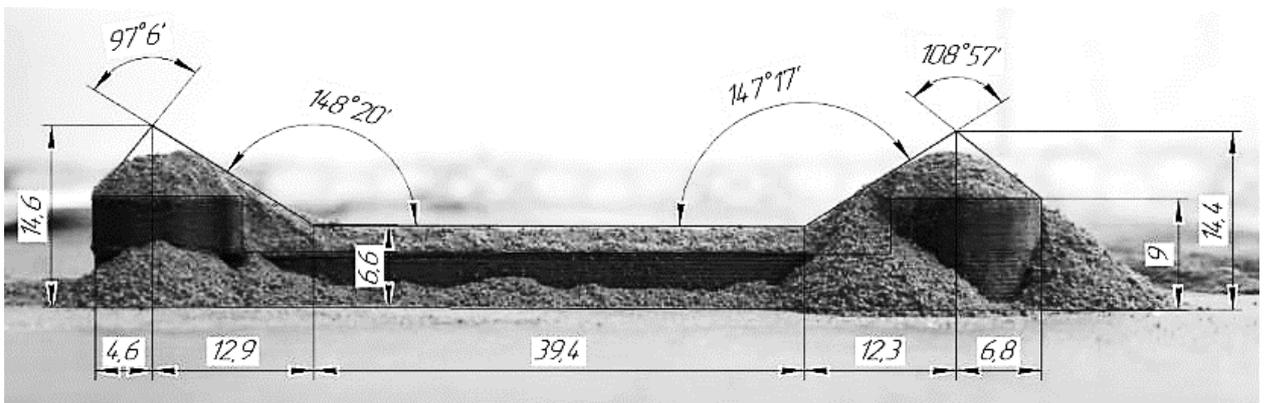


Рисунок 5.4 – Предельная насыпь песчаной аналогии

### 5.3.3 Расчет силовых параметров

Сила  $Q$ , которую должна развить применяемая для осуществления процесса течения машина, зависит от геометрических параметров поковки, в том числе от толщины  $h$  [61]:

$$Q = \sigma_s d^2 \left(1 + \frac{2l}{\sqrt{3}\delta} + \frac{d}{3\sqrt{3}h}\right) \quad (5.26)$$

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

Суммарная сила равна сумме сил в разных областях, на которые условно разбита поковка. Разделим поковку гаечного ключа на несколько разных областей, для которых течение металла будет отличаться ввиду особенностей

геометрии этих участков (рисунок 5.5).

По формуле (5.26) определим силу в разных зонах поковки. Характерные области представлены сложными фигурами. Для упрощения вычислений площадей и объемов насыпи каждой из зон, их можно представить более простыми геометрическими фигурами, при условии, что площади и объемы насыпи будут равны реальным значениям рассматриваемых областей гаечного ключа.

Расчеты объемов насыпи и площадей проведем, используя модели, разработанные в ПО КОМПАС-3D, которое позволит с достаточной точностью рассчитать параметры сложных фигур.

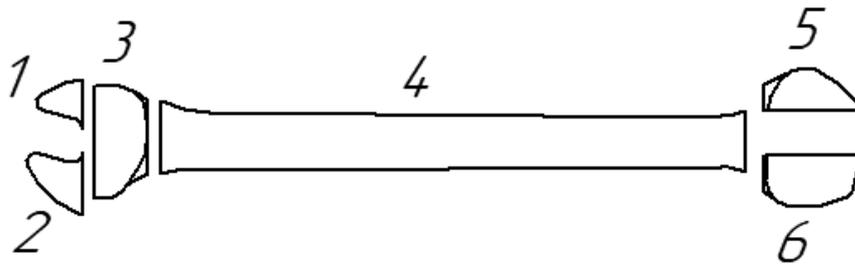


Рисунок 5.5 – Разбиение на области с характерным течением поковки ключа

Зона №1 и ее интерпретация представлены на рисунке 5.6. Параметры для расчета следующие:  $d = 4,1$  мм,  $\delta = 3,4$  мм,  $l = 3,25$  мм,  $h = 6,5$  мм,  $\sigma = 24$  МПа. Необходимо перевести все величины в Международную систему физических величин СИ, то есть мм в м. Получим:

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

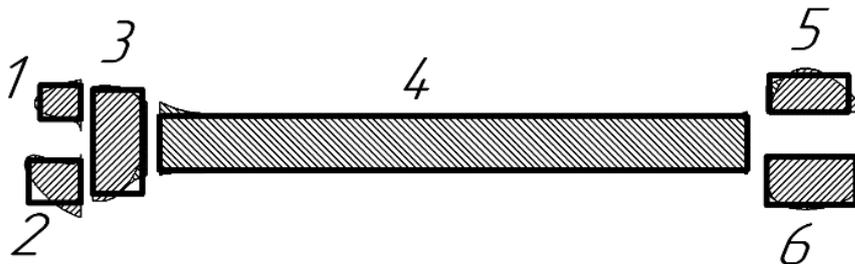


Рисунок 5.6 – Упрощение конфигурации зон поковки при условии равных площадей

Зона №2 и ее интерпретация представлены на рисунке 5.6. Параметры для расчета следующие:  $d = 5,3$  мм,  $\delta = 4,3$  мм,  $l = 3,25$  мм,  $h = 6,5$  мм,  $\sigma = 24$  МПа. Получим:  $Q_2 = 1368,3$  Н

Зона №3 и ее интерпретация представлены на рисунке 5.6. Параметры для расчета следующие:  $d = 5$  мм,  $\delta = 10,6$  мм,  $l = 3,25$  мм,  $h = 6,5$  мм,  $\sigma = 24$  МПа. Получим:  $Q_3 = 901,2$  Н

Зона №4 и ее интерпретация представлены на рисунке 5.6. Параметры для расчета следующие:  $d = 58$  мм,  $\delta = 5,5$  мм,  $l = 0,75$  мм,  $h = 1,5$  мм,  $\sigma = 24$  МПа. Получим:  $Q_4 = 694237,8$  Н

Зона №5 и ее интерпретация представлены на рисунке 5.6. Параметры для расчета следующие:  $d = 8$  мм,  $\delta = 3,7$  мм,  $l = 3,25$  мм,  $h = 6,5$  мм,  $\sigma = 24$  МПа. Получим:  $Q_5 = 3457,7$  Н

Зона №6 и ее интерпретация представлены на рисунке 5.6. Параметры для расчета следующие:  $d = 9,1$  мм,  $\delta = 4,9$  мм,  $l = 3,25$  мм,  $h = 6,5$  мм,  $\sigma = 24$  МПа. Получим:  $Q_6 = 4045$  Н

Общая сила  $Q$ , развиваемая на инструменте, для перевода металла поковки в пластическое состояние, необходимое для формоизменения поковки, складывается из составляющих описанных зон:

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

Величина необходимой расчетной силы  $Q = 705$  кН.

На рисунке 5.7 представлены графики по данным, полученным компьютерным моделированием и физическим экспериментом.

Пунктирной линией, параллельной оси абсцисс, отмечено значение силы в соответствии с расчетным значением силы  $Q$ , полученным методом аналогии с песчаной насыпью, который дает результаты, так называемой верхней оценки.

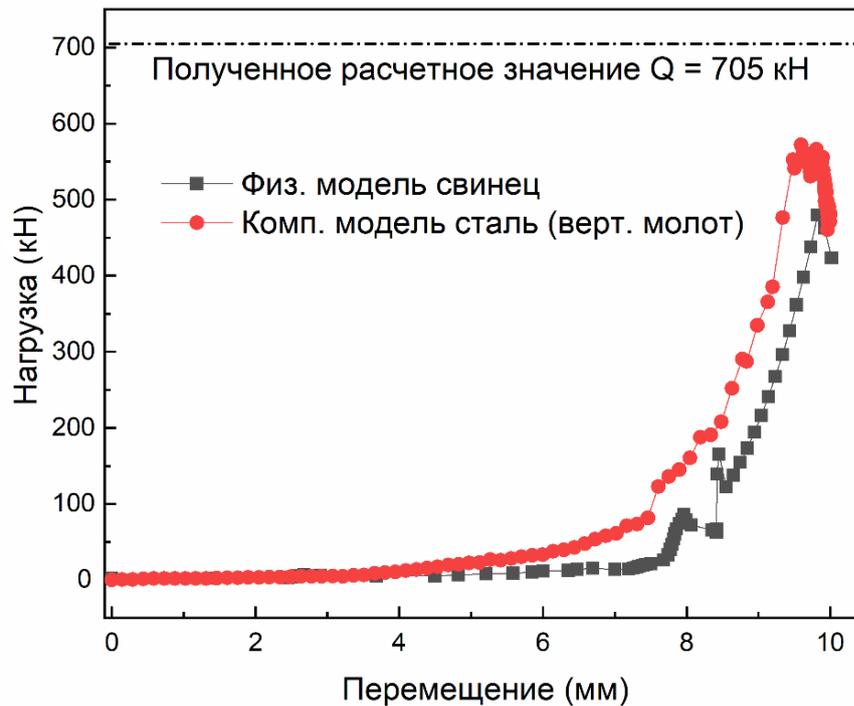


Рисунок 5.7 – Сравнение результатов численного моделирования, физического эксперимента и аналитического решения: ● – компьютерное моделирование горячей штамповки стали 40Х; ■ – физический эксперимент на модельном материале свинец С0; - - - - – метод песчаной аналогии

#### 5.4 Выводы по главе 5

1. С помощью метода характеристик теории пластичности проанализирована математическая формулировка краевой задачи нестационарного пластического течения в тонком слое с заданными границами.

2. Для поковки, имеющей сложную индивидуальную форму, с помощью графо-аналитического метода аналогии с «песчаной насыпью» решена задача по определению силовых параметров ГОШ поковки гаечного ключа с размерами зевов  $4 \times 5$  мм. 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.

3. Метод песчаной аналогии может быть распространен на поковки других типоразмеров с созданием контурных моделей поковок соответствующих размеров, при этом аналитические зависимости остаются в силе.

4. Из сравнения силовых параметров, полученных в результате проведения компьютерного моделирования и физического эксперимента можно сделать вывод, что характер изменения силовых параметров идентичен, однако кривые изменения силовых параметров не совпадают. Этот факт объясняется следующими соображениями. Сравнивая пределы текучести металлов в соответствующих температурных условиях в численном 24 МПа и физическом 13 МПа экспериментах, убеждаемся в их различии в 1,85 раза. Это одна из основных причин несовпадения графиков нагрузок. Если анализировать реологические характеристики металлов, участвовавших в экспериментах, то и здесь найдутся различия и это является еще одной причиной несовпадения сравниваемых параметров. Если соблюсти геометрическое подобие удастся при использовании масштаба моделирования 1:1, то всему виной противоречивость химического состава, физического и теплового подобия [156]. Поэтому полное совпадение результатов штамповки разных материалов в различных условиях невозможно.

## 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, осуществляемой 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 и каковыми являются поковки гаечных ключей различных типоразмеров.

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 ГОШ; 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.

**Список использованных источников**

1. Абашкин, В.П. Моделирование течения металла в процессахковки плоских заготовок для устранения неравномерности формирования поковок: автореф. дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук: специальность 05.16.05 / Абашкин Виктор Павлович. – М., 2008. – 20 с.
2. Аксенов, Л.Б. Системное проектирование процессов объемной штамповки. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1990. – 240 с.
3. Александров, А.А. К расчету процессов деформации по линиям тока // Известия вузов. Черная металлургия. – 2015. – № 4. – С. 282-283.
4. Алямовский, А.А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation. Учебное пособие / А.А. Алямовский. – М.: ДМК Пресс, 2010. – 464 с.
5. Антощенко, Ю.М. Исследование процесса осесимметричной осадки методами компьютерного моделирования // Известия вузов. Черная металлургия. – 2015. – № 1. – С. 49-53.
6. Артес, А.Э. Групповое производство деталей холодной объемной штамповкой. – М.: Машиностроение, 1991. – 192 с.
7. Артес, А.Э. Проблема создания переналаживаемых (гибких) технологических процессов холодной объемной штамповки // Кузнечно-штамповочное производство. – 1984. – № 9. – С. 26-28.
8. Арюлин, С.Б. Теоретическое определение параметра геометрии очага деформации при маятниковой прокатке // Заготовительные производства в машиностроении. – 2016. – № 7. – С. 22-28.
9. Атрошенко, А.П. Исследование усилий штамповки на КГШП при изготовлении поковок из специальных сталей и сплавов с применением ТМО // Сборник трудов ЛПИ. – Л., 1967. – № 287. – С. 94-101.
10. Баглюк, Г.А. Особенности деформированного состояния пористых заготовок при их закрытой и открытой горячей штамповке // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2015. – № 1. – С. 57-62.

11. Базайкин, В.И. Напряжения начала протяжки цилиндрической заготовки при горячей ковке в комбинированных бойках // Известия вузов. Черная металлургия. – 2015. – № 2. – С. 100-105.
12. Баранов, Г.Л. Анализ контактных напряжений в зоне очага пластической деформации со знакопеременными силами трения // Известия вузов. Черная металлургия. – 2015. – № 3. – С. 192-196.
13. Баранов, Г.Л. Контактные напряжения при пластическом течении металла в клиновидном канале // Известия вузов. Черная металлургия. – 2015. – № 6. – С. 429-433.
14. Баранов, Г.Л. Определение контактных напряжений при осадке прямоугольной полосы // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2015. – № 4. – С. 25-31.
15. Батуев, Ц. А. Обоснование наиболее рациональных технологических факторов, влияющих на процесс формообразования при горячей листовой штамповке оковок из титанового сплава / Ц.А. Батуев, Э.Ц. Галсанова, А.Д. Грешилов // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2020. – № 8(243). – С. 19-22.
16. Богатов, А. А. Механические свойства и модели разрушения металлов: учеб. пособие. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ – УПИ, 2002. – 329 с.
17. Бодунов, М.А. Течение тонкого слоя пластически анизотропного материала по грани упругого параллелепипеда / М.А. Бодунов, И.В. Бородин, Л.К. Кийко // Известия МГТУ МАМИ. – 2014. – № 3(21). – С. 22-28.
18. Бочаров, Ю.А. Кузнечно-штамповочное оборудование. Учебник для студентов высших учебных заведений. – М.: Академия, 2008. – 480 с.
19. Бриджмен, П. Физика высоких давлений. – М. – Л.: Объединенное научно-техническое издательство НКТП СССР, 1935. – 402 с.
20. Бурко, В.А. Особенности проектирования и реализации ресурсосберегающих технологий штамповки поковок прямоугольных и

- круглых в плане // Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2012. – № 25. – С. 87-94.
21. Васин, Р.А. Лабораторный практикум по механике деформируемых твердых тел/ Р.А. Васин, Д.В. Георгиевский, И.М. Керштейн и др.. М.: Изд-во Московского ун-та, 1990. 166 с.
  22. Вильданов, И.З. Формирование конструкторско-технологической документации на ответственные детали, получаемые пластическим деформированием, с учетом их эксплуатационных свойств // Вестник машиностроения. – 2015. – № 6. – С. 55-58.
  23. Власов, А.В. Конечно-элементное моделирование технологических процессов ковки и объемной штамповки : учебное пособие / А. В. Власов, С. А. Стебунов, С. А. Евсюков [и др.]. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. – 383 с.
  24. Воробьев, В.М. Основы теории и реализация технологических решений процессов выдавливания металлов в многоканальных штампах: Учебное пособие / В.М. Воробьев. – М.: «ИП Скороходов В.А.», 2012. – 290 с.
  25. Воронцов, А.Л. Теория штамповки выдавливанием / А.Л. Воронцов. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 721 с.
  26. Галсанова, Э. Ц. Определение температурных напряжений при нагреве тонких листовых заготовок / Э.Ц. Галсанова, Я.В. Калинин // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2021. – № 1(248). – С. 54-57.
  27. Ганиева, В.Р. Компьютерное моделирование технологических процессов обработки давлением конструкционных сверхпластичных материалов / В.Р. Ганиева, О.П. Тулупова, Ф.У. Еникеев, А.А. Круглов // Вестник машиностроения. – 2017. – № 2. – С. 63-69.
  28. Голенков, В.А. Теория обработки металлов давлением: учебник для вузов / В.А. Голенков, С.П. Яковлев, С.А. Головин и др. – М.: Машиностроение, 2013. – 442 с.

29. Головин, А.Ф. Прокатка. Часть 1. Теория пластичной деформации. – М.: Металлургиздат, 1933. – 135 с.
30. ГОСТ 103–2006 Прокат сортовой стальной горячекатаный полосовой. Сортамент. – М.: Стандартиформ, 2009. – 12 с.
31. ГОСТ 1050–2013 Металлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей. Общие технические условия. – М.: Стандартиформ, 2014. – 32 с.
32. ГОСТ 19903–2015 Прокат листовой горячекатаный. Сортамент. – М.: Стандартиформ, 2016. – 15 с.
33. ГОСТ 2590–2006 Прокат сортовой стальной горячекатаный круглый – М.: Стандартиформ, 2010. – 8 с.
34. ГОСТ 2591–2006 Прокат сортовой стальной горячекатаный квадратный. Сортамент – М.: Стандартиформ, 2009. – 6 с.
35. ГОСТ 2838–80 Ключи гаечные. Общие технические условия. – М.: Стандартиформ, 2008. – 7 с.
36. ГОСТ 2839–80 Ключи гаечные с открытым зевом двусторонние. Конструкция и размеры. – М.: Издательство стандартов, 1987. – 12 с.
37. ГОСТ 3778–98 Свинец. Технические условия. – Минск: ИПК Издательство стандартов, 2003. – 8 с.
38. ГОСТ 4543–2016 Металлопродукция из конструкционной легированной стали. Технические условия. – М.: Стандартиформ, 2019. – 50 с.
39. ГОСТ 7505–89 Поковки стальные штампованные. Допуски, припуски и кузнечные напуски. – М.: Стандартиформ, 2003. – 86 с.
40. ГОСТ Р ИСО 3318–2013 Ключи гаечные с открытым зевом двусторонние, накидные двусторонние и комбинированные. Головки ключей. Основные размеры. – М.: Стандартиформ, 2014. – 8 с.
41. ГОСТ Р ИСО 54488–2011 Ключи гаечные Разводные. Технические условия. – М.: Стандартиформ, 2011. – 11 с.
42. Гречников, Ф.В. Теория пластического деформирования металлов :

- учебник / Ф. В. Гречников, В. Р. Каргин. – Вологда : Инфра-Инженерия, 2023. – 448 с.
43. Грешнов, В.М. Основы физико-математической теории необратимых деформаций металлов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – №4(4). – С. 1457-1458.
  44. Губкин, С.И. Пластическая деформация металлов. – М.: Металлургиздат, 1961. – 306 с.
  45. Губкин, С.И. Теория обработки металлов давлением. – М.: Металлургиздат, 1947. – 532 с.
  46. Гун, Г.Я. Теоретические основы обработки металлов давлением: учебник для вузов. – М.: Металлургия, 1980. – 456 с.
  47. 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.
  48. 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.
  49. Джонсон, У. Механика процесса выдавливания металла: пер. с англ / В. Джонсон, Х. Кудо. – М.: Металлургия, 1965. – 174 с.
  50. Джонсон, У. Теория пластичности для инженеров / У. Джонсон, П. Меллор. Перевод с английского А. Г. Овчинникова. – М.: Машиностроение, 1979. – 567 с.
  51. Дмитриев, А. М. Технологияковки и объемной штамповки : учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности "Машины и технология обработки металлов давлением" направления подготовки дипломированных специалистов "Машиностроительные технологии и оборудование" / А. М. Дмитриев, А. Л. Воронцов. – 2-е издание, дополненное и переработанное. – М.: Машиностроение-1, 2005. – 500 с.

52. Евстратов, В.А. Основы технологии выдавливания и конструирования штампов. – Харьков: Вища школа, 1987. – 384 с.
53. Елифанов, Г. И. Физика твердого тела : учебное пособие. – 4-е изд., стер. – Санкт-Петербург: Лань, 2022. – 288 с.
54. Живов, Л.И. Кузнечно-штамповочное оборудование; Учебник для вузов / Л.И. Живов, А.Г. Овчинников, Е.Н. Складчиков. Под ред. Л.И. Живова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 650 с.
55. Журавлев, В. Ф. О разложениях Паде в задаче о двумерном кулоновом трении / В. Ф. Журавлев, А. А. Киреенков // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. – 2005. – № 2. – С. 3-14.
56. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике: [перевод с англ.] / О. Зенкевич. – М.: Мир. – 1975. – 541 с.
57. Зибель, Э. Обработка металлов в пластическом состоянии. / Э. Зибель. М.–Л. : Металлургиздат, 1934. – 197 с.
58. Измайлов, В. В. Фрикционные характеристики металлических пар трения и законы трения Амонтона и Кулона / В. В. Измайлов, М. В. Новоселова // Трение и износ. – 2019. – Т. 40, № 5. – С. 473-478.
59. Ильюшин, А.А. Вопросы теории течения пластического вещества по поверхностям // Прикладная математика и механика. – 1954. – Т. 18. – № 3. – С. 265-288.
60. Ильюшин, А.А. Пластичность. – М. – Л.: ОГИЗ, 1948. – 376 с.
61. Ильюшин, А.А. Полная пластичность в процессах течения между жесткими поверхностями, аналогия с песчаной насыпью и некоторые приложения // Прикладная математика и механика. – 1955. – Т. 19. – № 6. – С. 693-713.
62. Ильюшин, А.А. Труды (1946-1966). Т. 2. Пластичность / Составители Е.А. Ильюшина, М.Р. Короткина. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 480 с.
63. Кадымов, В.А. Контактная задача пластического течения в тонкослойных областях с продольными ребрами / В.А. Кадымов, Е.Н. Сосенушкин, Е.А.

- Яновская // Сб. «Упругость и неупругость». – М.: Изд-во МГУ. – 2021. – С. 198-207.
64. Кадымов, В.А. Контактные задачи пластического течения в тонком слое: теория, анализ решений и их приложения / В.А. Кадымов, Е.Н. Сосенушкин, Е.А. Яновская // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2022. – № 3. – С. 18-28.
65. Кадымов, В.А. Математическое моделирование контактных задач пластического течения (монография). – Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2016. – 129 с.
66. Кадымов, В.А. Эксперименты по стесненной осадке тонкого пластического слоя прямоугольной формы / В.А. Кадымов, Е.Н. Сосенушкин, Е.А. Яновская / Моделирование нелинейных процессов и систем. Материалы шестой международной конференции. – М.: Янус-К. – 2023. – С. 130-136.
67. Карслоу, Г.С. Теплопроводность твердых тел / Г.С. Карслоу, Д. Егер. – М.: Наука, 1964. – 487 с.
68. Кийко, И.А. Анизотропия в процессах течения тонкого пластического слоя // Прикладная математика и механика. – 2006. – Т. 70. – № 2. – С. 344-351.
69. Кийко, И.А. О форме пластического слоя, сжимаемого параллельными плоскостями // Вестник Московского университета. Серия 1. Математика. Механика. – 2015. – № 3. – С. 40-49.
70. Кийко, И.А. Об одной модели контактного трения в процессах течения тонкого пластического слоя // Известия МГТУ МАМИ. – 2014. – № 4(22). – С. 64-66.
71. Кийко, И.А. Обобщение задачи Л. Прандтля о сжатии полосы // Вестник Московского университета. Сер. 1: Математика. Механика. – 2002. – №4. – С. 50-56.
72. Кийко, И.А. Технология обработки давлением и новые постановки задач

в теории пластичности // Труды 9-й конференции по прочности и пластичности. – М., 1996. – Т. 3. – С. 149.

73. Кобелев, А.Г. Горизонтальный бесшаботный молот с гидравлической связью масс / А.Г. Кобелев, Д.С. Чашкин // Известия МГТУ МАМИ. – 2013. – Т. 2. – №2(16). – С. 183-187.
74. Колмогоров, В.Л. Механика обработки металлов давлением. – М.: Металлургия, 1986. – 688 с.
75. Колотов, Ю.В. Методика испытания бесшаботного молота с гидравлическим механизмом связи / Ю.В. Колотов, Е.Н. Сосенушкин // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2010. – №10. – С. 32-35.
76. Константинов, И.Л. Моделирование процесса горячей объемной штамповки поковки из алюминиевого сплава АК6 / И.Л. Константинов, И.Ю. Губанов, И.О. Астрашабов // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2015. – № 1. – С. 45-48.
77. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров: Определения, теоремы, формулы / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1970. – 720 с.
78. Коробова, Н.В. Применение программного комплекса DEFORM 3D для исследования холодного выдавливания стаканов из спеченных порошковых заготовок / Н.В. Коробова, М.Д. Петров // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2013. – № 4. – С. 25-27.
79. Косарев, И.В. Обоснование введения радиальной схемы течения металла в процессах штамповки тонкостенных ребристых деталей из алюминиевых сплавов / И.В. Косарев, К.Н. Соломонов // Известия вузов. Машиностроение. – 2000. – № 3. – С. 62-65.
80. Крагельский, И.В. Коэффициенты трения. Справочное пособие. – М.: МАШГИЗ, 1962. – 220 с.

81. Красовский, Г.В. Управление конкурентоспособностью проектируемого технологического оборудования / Г.В. Красовский, В.В. Корнеев, Е.Н. Сосенушкин // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2010. – № 6. – С. 17-21.
82. Ланской, Е.Н. Автоматизация проектирования групповых процессов холодной и полугорячей объемной штамповки при многономенклатурном производстве деталей / Е.Н. Ланской Е.Н. Сосенушкин // Машиностроительное производство. Сер. Технология и оборудование кузнечно–штамповочного производства: Обзорная информация. Вып.6. –М.: ВНИИТЭМР, 1989. – 84 с.
83. Леванов, А.Н. Контактное трение в процессах обработки металлов давлением / А.Н. Леванов, В.Л. Колмогоров, С.П. Буркин и др. – М.: Металлургия, 1976. – 416 с.
84. Малинин, Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести / Н.Н. Малинин. – М.: Машиностроение, 1968. – 400 с.
85. Мамаев, В.Б. Моделирование влияния технологических факторов на протекание и результаты процессов осадки на основании метода траекторий главных нормальных направлений // Заготовительные производства в машиностроении. – 2015. – № 12. – С. 13-19.
86. Мамаев, В.Б. Условие пластичности и граничные условия на примере исследования напряженного состояния в процессах осадки // Заготовительные производства в машиностроении. – 2015. – № 10. – С. 24-31.
87. Матвийчук, В.А. Анализ деформируемости металлов при поверхностном упрочнении деталей / В.А. Матвийчук, В.П. Егоров, В.М. Михалевич, В.Д. Покрас // Кузнечно-штамповочное производство. – 1990. – № 10. – С. 10-13.
88. Мещерин, В.Т. Основные проблемы закрытой горячей точной объемной штамповки // Кузнечно-штамповочное производство. – 1972. – № 8. – С.

1-6.

89. Митрофанов, С.П. Гибкие технологические системы холодной штамповки / С.П. Митрофанов, Л.Л. Григорьев, Ю.М. Клепиков и др. –Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1987. – 285 с.
90. Надаи, А. Пластичность и разрушение твердых тел. – М.: Иностранная литература, 1954. – 647 с.
91. Нгуен, Ч.К. Разработка технологии горячей штамповки эндопротезов из титановых сплавов: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.05 / Нгуен Чунг Киен. – М., 2021. – 119 с.
92. Нгуен, Ч. К. Физическое моделирование процесса штамповки эндопротезов с помощью слоистой заготовки / Ч.К. Нгуен, В.И. Полькин // Современные инновации в науке и технике: сборник научных трудов 11-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием – Курск, 2021. – С. 193-196.
93. Непершин, Р.И. Пластическое формоизменение металлов. – М.: Наука, 1967. – 137 с.
94. Овчинников, А.Г. Основы теории штамповки выдавливанием на прессах / А.Г. Овчинников. – М.: Машиностроение, 1983. – 200 с.
95. Охрименко, Я.М. Технология кузнечно-штамповочного производства. – М.: Машиностроение, 1976. – 560 с.
96. Паршин, В.С. Практическое руководство к программному комплексу DEFORM-3D: учебное пособие / В.С. Паршин и др.– Екатеринбург: УрФУ, 2010. – 265 с.
97. Пат. 2114727С1 Российская Федерация, МПК В25В13/08, В21J13/02, В25В3/00. Гаечный ключ, штамп для его изготовления и устройство для обработки гаечного ключа [текст] / Зурикьян М.М.; патентообладатель Зурикьян Михаил Миронович. – N 97100993/28; заявл. 22.01.1997; опубл. 10.07.1998.
98. Пат. 2305610С2 Российская Федерация, МПК В21Н1/18, В21К5/06.

- Способ изготовления поковки удлиненной формы [текст] / Рудович А.О., Клушин В.А.; патентообладатель Черкас Виктор Иванович. – N 2005133143/02; заявл. 28.10.2005; опубл. 10.09.2007, Бюл. N 25.
99. 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". – N 2021136351; заявл. 09.12.2021; опубл. 18.10.2022, бюл. N 29.
100. 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". – N 2021136348; заявл. 09.12.2021; опубл. 18.10.2022, бюл. N 29.
101. 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". – N 2021136355; заявл. 09.12.2021; опубл. 23.11.2022, бюл. N 33.
102. 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". – N 2021136354; заявл. 09.12.2021; опубл. 23.11.2022, бюл. N 33.

103. Пат. CN109926795A Китай, МПК B23P15/00. Method for forming wrench tool [текст] / Bairong L.; патентообладатель Bairong Liao – N 201711351840.2; заявл. 15.12.2017; опубл. 25.06.2019.
104. Пат. DE102009038116A1 Германия, МПК B21K5/16. Methods for manufacturing combination wrenches without generating carbon scale [текст] / Hu. B.; патентообладатель Hu Bobby. – N 97131820; заявл. 20.08.2008; опубл. 25.02.2010.
105. Пат. JP2018065166A Япония, МПК B21K5/16. Wrench manufacturing process [текст] / Ming-Chang C., Mao-Chih L.; патентообладатель Ming-Chang Chen, Mao-Chih Liao – N 2016-204667; заявл. 18.10.2016; опубл. 26.04.2018.
106. Пат. US2017056962A1 США, МПК B21D28/24, B21K5/16, B22F3/10, B22F3/24. Process of manufacturing wrenches [текст] / Lin C.C.; патентообладатель Lin Chen Chin – N 15/347,866; заявл. 10.11.2016; опубл. 02.03.2017.
107. Пат. US2019176215A1 США, МПК B21J1/04, B21J1/06, B21J5/02, B21K5/16. Method for forming a spanner [текст] / Liao P.J.; патентообладатель Liao Po Jung – N 15/834,314; заявл. 07.12.2017; опубл. 13.06.2019.
108. Поксеваткин, М.И. Алгоритмизация закрытой штамповки изделий без штамповочных уклонов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2013. – № 9. – С. 19-21.
109. Прандтль, Л. Примеры применения теоремы Генки к равновесию пластических тел / Теория пластичности. Сборник статей – М.: Гос. изд. Иностранной литературы. – 1948. – С. 102-113 [Prandtl L.

Anwendungsbeispiele zu einem Henckyschen Satz über das plastische Gleichgewicht// ZAMM. 1923. Bd.3. H.6. Pp. 401-406].

110. Процесс изготовления комбинированных ключей UNIOR // Униор Профешнл 2005-2022. URL: [https://www.unior.ru/catalog/about\\_unior/keys/wrenches\\_pr.pdf](https://www.unior.ru/catalog/about_unior/keys/wrenches_pr.pdf) (дата обращения: 23.05.2022).
111. Работнов, Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела / Ю.Н. Работнов. – М.: URSS, 2019. – 712 с.
112. Радкевич, М.М. Конечно-элементное моделирование формоизменения стальной заготовки при штамповке поковок удлиненной формы в открытых штампах на КГШП / М.М. Радкевич, В.С. Мамутов, Д.Ю. Фомин // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2013. – № 3(178). – С. 244-251.
113. Рвачев, М.А. Применение метода R-функций для экспериментально-расчетного исследования напряженного состояния и деформируемости в осесимметричных процессах ОМД / М.А. Рвачев, В.Д. Покрас // Известия Вузов. Черная металлургия. – 1991. – № 11. – С. 59-60.
114. Ребельский, А.В. Основы проектирования процессов горячей объемной штамповки / А.В. Ребельский. – М.: Машиностроение, 1965. – 248 с.
115. Рене, И.П. Теоретические основы экспериментальных методов исследования деформаций методом сеток в процессах обработки металлов давлением. – Тула: ТПИ, 1979. – 96 с.
116. Рудской, А.И. Теория и технология прокатного производства: Учебное пособие / А.И. Рудской, В.А. Лунев. – СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, 2008. – 527 с.
117. Руководство пользователя КОМПАС-3D v21 // АСКОН – Системы проектирования. URL:

[https://kompas.ru/source/info\\_materials/2022/%D0%9A%D0%9E%D0%9C%D0%9F%D0%90%D0%A1-3D/RelNotes.pdf](https://kompas.ru/source/info_materials/2022/%D0%9A%D0%9E%D0%9C%D0%9F%D0%90%D0%A1-3D/RelNotes.pdf) (дата обращения 20.06.2021).

118. Свирин, В.В. Исследование влияния различных факторов на кинематическую схему течения металла в процессахковки и штамповки // Известия вузов. Черная металлургия. – 2011. – №7. – С. 34-37.
119. Сегерлинд, Л. Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд – М.: Мир, 1979. – 392 с.
120. Семенов, Е.И. Ковка и объемная штамповка. Справочник в 4-х томах. Т.1. Материалы и нагрев. Оборудование. Ковка / Е.И. Семенов. – М.: Машиностроение, 2010. – 568 с.
121. Семенов, Е.И. Ковка и объемная штамповка. Справочник в 4-х томах. Т.2 Горячая объемная штамповка / Е.И. Семенов. – М.: Машиностроение, 2010. – 710 с.
122. Сидельников, С.Б. Кузнечно-штамповочное производство. Конспект лекций / С.Б. Сидельников, И.Л. Константинов – Красноярск: ФГАОУ ВПО «СФУ», 2012. – 59 с.
123. Симонова, Л.А. Имитационное моделирование формообразования специального дискового инструмента на этапе технологической подготовки производства на примере сферической фрезы // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2015. – № 3. – С. 30-33.
124. Соколовский, В.В. Теория пластичности. – М.: Гостехиздат, 1951. – 396 с.
125. Соломонов, К.Н. Анализ формообразования плоских поковок / К.Н. Соломонов, В.П. Абашкин // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение. – 2008. – № 4. – С. 59-65.
126. Соломонов, К.Н. Моделирование технологических методик пластического деформирования / К.Н. Соломонов, Н.И. Федоринин, Л.И. Тищук // Известия Самарского научного центра Российской академии

наук. – 2017. – Т. 19. – № 1(3). – С. 517-519.

127. Соломонов, К.Н. Моделирование формообразования поковок: исследования, гипотезы, разработки. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. – 172 p.
128. Сосенушкин, Е.Н. Кинематическая и динамическая модели механики деформируемого твердого тела / Е.Н. Сосенушкин, В.А. Кадымов, Е.А. Яновская [и др.] // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2016. – Т. 18. – № 1-2. – С. 300-308.
129. Сосенушкин, Е.Н. Математическая модель свободного затекания металла в ребра жесткости при выдавливании плоских поковок / Е.Н. Сосенушкин, Д.С. Гусев, А.А. Архипов // Цифровая экономика: оборудование, управление, человеческий капитал: материалы всероссийской научно-практической конференции, Вологда, 2018 – С. 89-91.
130. Сосенушкин, Е.Н. Математическая модель управления распределением деталей по технологическим группам / Е.Н. Сосенушкин, Е.А. Яновская, Е.И. Третьякова и др. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2009. – №3. – С. 47-53.
131. Сосенушкин, Е.Н. Математическая модель штамповки фланца с выдавливанием рёбер / Е.Н. Сосенушкин, В.А. Кадымов, Е.А. Яновская, Д.С. Гусев, М.В. Прокин, А.А. Архипов, Т.В. Гуреева // Состояние и перспективы развития технологических процессов обработки металлов давлением и оборудования кузнечно-прессового машиностроения в современных условиях: Сборник научных статей и докладов XIV Международного Конгресса "Кузнец-2019". Посвящается 80-летию со дня рождения Ю.А. Зимина, Рязань, 2019 – С. 341-350.
132. 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.

133. 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.
134. Сосенушкин, Е.Н. Механика выдавливания алюминиевого сплава при штамповке поковки с продольными рёбрами / Е.Н. Сосенушкин, В.А. Кадымов, Е.А. Яновская и др. // Цветные металлы. – 2019. – №3. – С. 69-75.
135. 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.
136. Сосенушкин, Е.Н. Модель деформированного состояния штампуемой заготовки / Е.Н. Сосенушкин, В.А. Кадымов, Е.А. Яновская, А.Е. Сосенушкин // Проблемы и перспективы развития машиностроения: Сборник научных трудов международной научно-технической конференции, посвящённой 60-летию Липецкого государственного технического университета. – Липецк, 2016. – С. 224-231.
137. Сосенушкин, Е.Н. Перспективные процессы объемной штамповки / Е.Н. Сосенушкин. –М.: Машиностроение, 2011. – 480 с.
138. Сосенушкин, Е.Н. Пластическое течение в тонком слое: теория, математические модели, анализ решений и их приложения /Е.Н.

Сосенушкин, Е.А. Яновская. – М.: Янус-К, 2023. – 208с.

139. 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.
140. Сосенушкин, Е.Н. Автоматическая классификация деталей машиностроения, изготавливаемых холодной и полугорячей объемной штамповкой / Е.Н. Сосенушкин // Заготовительные производства в машиностроении. – 2006. – №5. – С.20-27.
141. Степанский, Л.Г. Расчеты процессов обработки металлов давлением. – М.: Машиностроение, 1979. – 213 с.
142. Сторожев, М.В. Ковка и объемная штамповка стали : Справочник в двух томах. Том 1 – М.: Машиностроение, 1967. – 435 с.
143. Сторожев, М.В. Теория обработки металлов давлением: учеб. для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.
144. Гарновский, И.Я. Деформации и усилия при обработке металлов давлением. – М.: Машгиз, 1959. – 304 с.
145. Гарновский, И.Я. Формоизменения при пластической обработке металлов: (ковка и прокатка). – М.: Metallurgizdat, 1954. – 535 с.
146. Техническая характеристика молота // ПромСтройМаш. URL: [https://www.stanki-zavod.ru/produksiya/oborudovanie\\_dlya\\_vyipolneniya\\_kuznechnyih\\_rabot/molot\\_kovochnyiy\\_ma\\_4129a](https://www.stanki-zavod.ru/produksiya/oborudovanie_dlya_vyipolneniya_kuznechnyih_rabot/molot_kovochnyiy_ma_4129a) (дата обращения 20.06.2021).
147. Тимошенко, С.П. Теория упругости. – Л.: ОНТИ ГТТИ, 1934. – 452 с.
148. Тищук, Л.И. Разработка методики проектирования процессов пластического формоизменения металлических плоских заготовок на основе компьютерного и физического моделирования: дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук: специальн. 05.16.05 / Тищук Людмила Ивановна –

- Воронеж, 2018. – 179 с.
149. Томленов, А.Д. Теория пластического деформирования металлов. – М.: Металлургия, 1972. – 408 с.
150. ТУ 3926-043-53581936-2019 Ключи гаечные с открытым зевом односторонние
151. Унксов, Е.П. Инженерная теория пластичности. Методы расчета усилий деформирования. – М.: Машгиз, 1959. – 328 с.
152. Утяшев, Ф.З. Современные методы интенсивной пластической деформации / Ф.З. Утяшев. – Уфа: РИК УГАТУ, 2008. – 313 с.
153. Фомичев, А.Ф. Компьютерное исследование кузнечной разгонки полотна диска из стали 20Х13 // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2015. – № 4. – С. 33-36.
154. Хилл, Р. Математическая теория пластичности / Р. Хилл. – М.: ГИТТЛ, 1956 – 404 с.
155. Хмара, С.М. Определение области рационального применения КГШП и ПШМ // Кузнечно-штамповочное производство. – 1970. – № 1. – С. 35-37.
156. Целиков, А.И. Теория продольной прокатки / А.И. Целиков, Г.С. Никитин, С.Е. Рокотян. – М.: Металлургия, 1980. – 320 с.
157. Чижиков, Ю.М. Теория подобия и моделирование процессов обработки металлов давлением / Ю.М. Чижиков. – М.: Металлургия, 1970. – 296 с.
158. Шарапин, Е.Ф. Элементы теории обработки металлов давлением. – М.: Металлургиздат, 1964. – 208 с.
159. Шибиков, В. Г., Панкратов Д. Л., Хайруллин Р. А., Панкратов Д. Д., Низамов Р. С. Обоснование требований к точности заготовки для прецизионной штамповки шестерен // Заготовительные производства в машиностроении. – 2019. – Т. 17. – № 7. – С. 310-312.
160. Эдуардов, М.С. Штамповка в закрытых штампах / М.С. Эдуардов. – М.: Машиностроение, 1971. 240 с
161. Яковлев, С.П. Изотермическое деформирование высокопрочных

анизотропных материалов / Яковлев С.П. и др. – М.: Машиностроение, 2004. – 427 с.

162. Яковлев, С.П. Экспериментально-технологическая отработка формообразования оребренных конструкций / С.П. Яковлев, Яковлев С.С., В.Н. Чудин и др. // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2008. – №4. – С. 70-76.
163. Яковлев, С.С. Оценка силовых режимов прямого горячего выдавливания фланцевых втулок из высокопрочных материалов / С.С. Яковлев, В.Н. Чудин, А.А. Пасынков // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2013. – Вып.1. – С. 123-132.
164. Яловой, Н.И. Тепловые процессы при обработке металлов давлением / Н.И. Яловой, М.А. Тылкин, П.И. Полухин и др./ – М.: Высшая школа, 1973. – 631 с.
165. Altan, T. Hammers and presses for forging / T. Altan, M. Shirgaokar // Metalworking: Bulk Forming. – 2005. – Vol. 14A. – p. 23-35.
166. Alzahrani, B. Analytical and numerical modeling of thick tube hydro forging / B. Alzahrani, G. Ngaile // Procedia Engineering. – 2014. – Vol. 81. – p. 2223-2229.
167. Asai, K. Estimation of frictional property of lubricants for hot forging of steel using low-speed ring compression test // Procedia Engineering. – 2014. – Vol. 81. – p. 1970-1975.
168. Baya, F. Electromagnetic forming processes: material behaviour and computational modelling // Procedia Engineering. – 2014. – Vol. 81. – p. 793-800.
169. Bedekar, V. Microstructure and texture evolutions in AISI 1050 steel by flow forming / V. Bedekar, P. Pauskar, R. Shivpuri, J. Howe // Procedia Engineering. – 2014. – Vol. 81. – p. 2355-2360.
170. Behrens, B.-A. Hot stamping of load adjusted structural parts // Procedia Engineering. – 2014. – Vol. 81. – p. 1756-1761.

171. Bekletenler, E.D. An investigation for the performance of the design of hot forging die and workpiece / E.D. Bekletenler, S. İrizalp, M. Delibalçı // *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*. – 2022. – Vol. 5. – p. 96-107.
172. Dong, W. Analytical and FEM investigations on boss forming process by compression drawing method / W. Dong, Q. Lin, Y. Li, Z. Wang // *Procedia Engineering*. – 2014. – Vol. 81. – p. 383-388.
173. Ducato, A. Influence of geometrical ratios in forgeability of complex shapes during hot forging of Ti-6Al-4V titanium alloy / A. Ducato, G. Buffa, L. Fratini, R. Shivpuri // *Procedia Engineering*. – 2014. – Vol. 81. – p. 516-521.
174. Ervasti, E. Closed – die forging and slab hot rolling with focus on material yield: Doctoral thesis ... Doctorate of Engineering: Production Engineering / Ervasti Esa – Stockholm, 2008. – 41 p.
175. Espinoza, E. Optimizing a hammer forging progression for a large hand tool: (2015). Master's Thesis (2009) Paper 337: Mechanical Engineering / Espinoza Edgar – Marquette University. [http://epublications.marquette.edu/theses\\_open/337](http://epublications.marquette.edu/theses_open/337)
176. Grillo, F. Open die forging vs. closed die forging // *Steel Available*. URL: <https://www.steelavailable.com/en/open-die-forging-closed-die-forging-whats-difference/> (дата обращения: 23.05.2022).
177. Kadymov, V.A. Modeling of the stamping process of box-type forging / V.A. Kadymov, E.N. Sosenushkin, E.A. Yanovskaya // *Web of Conf. ICSSMSTE*. – Yalta, 2020. – № 315.
178. Kaushish, J.P. *Manufacturing processes*. Second edition. – New Delhi: PHI Learning Private Limited, 2010. – 1040 p.
179. Kim, H. Effects of surface finish and die temperature on friction and lubrication in forging / H. Kim, T. Altan // *Procedia Engineering*. – 2014. – Vol. 81. – p. 1848-1853.
180. Mohamed, M. A new test design for assessing formability of materials in hot

Stamping / M. Mohamed, J. Lin, A. Foster and others // *Procedia Engineering*. – 2014. – Vol. 81. – p. 1689-1694.

181. Yang, D.Y. Analysis and design of multiblow hammer forging processes by the explicit dynamic finite element method / D.Y. Yang, Y.H. Yoo // *CIRP Annals*. – 1997. – Vol. 46.1. – p. 191-194.
182. Zhou, J. A study on simulation of deformation during roll – forging process using system of special shaped and hat groove / J. Zhou, Z. Jia, H. Liu, M. Wang // *Reviews on Advanced Material Science*. – 2013. – Vol. 33. – p. 354-359.





федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

«УТВЕРЖДАЮ»  
проректор по образовательной  
деятельности и молодежной политике  
к.т.н.  
М.В. Бильчук  
2024 г



АКТ  
внедрения в учебный процесс результатов  
диссертационной работы «Совершенствование процессов горячей объемной  
штамповки поковок с тонкими полотнами»  
аспиранта Д.С. Гусева

Результаты теоретических исследований нестационарного течения тонкого слоя со сложной границей при заполнении полости ручья молотового штампа, полученные на основе разработанных аспирантом математической и компьютерной моделей, а также результаты экспериментов по реализации вариантов технологии изготовления поковок гаечных ключей, которые подтверждают адекватность выдвинутых гипотез и проведенных расчетов, внедрены в учебный процесс в курсах бакалавриата «Теория обработки металлов давлением», «Специализированное оборудование для инновационных процессов обработки давлением», «Технология производства кузнечно-штамповочного оборудования и штамповой оснастки» согласно учебным планам направления 15.03.01 «Машиностроение», а также в курсе «Проблемы прочности и пластичности в технологических процессах» для магистратуры направления 15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» профиль «Физико-технологические процессы обработки давлением» ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН».

Представитель подразделения, в котором внедрена разработка: Представители подразделения разработчика:

Начальник  
учебно-методического управления  
к.т.н.

 С.А. Тясто

Научный руководитель  
д.т.н.  Е.Н. Сосенушкин

Аспирант  Д.С. Гусев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

**№ 2781825**

**Способ изготовления гаечных ключей пластическим деформированием**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный технологический университет "СТАНКИН" (ФГБОУ ВО "МГТУ "СТАНКИН") (RU)*

Авторы: *Сосенушкин Евгений Николаевич (RU), Сосенушкин Александр Евгеньевич (RU), Кадымов Вагид Ахмедович (RU), Яновская Елена Александровна (RU), Гусев Дмитрий Сергеевич (RU), Рогулин Сергей Александрович (RU), Хохлова Ника Геннадьевна (RU)*

Заявка № **2021136351**

Приоритет изобретения **09 декабря 2021 г.**

Дата государственной регистрации  
в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации **18 октября 2022 г.**

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает **09 декабря 2041 г.**

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

*Ю.С. Зубов*



# РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2781826

### Способ штамповки гаечных ключей

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный технологический университет "СТАНКИН" (ФГБОУ ВО "МГТУ "СТАНКИН") (RU)*

Авторы: *Сосенушкин Евгений Николаевич (RU), Сосенушкин Александр Евгеньевич (RU), Кадымов Вагид Ахмедович (RU), Яновская Елена Александровна (RU), Гусев Дмитрий Сергеевич (RU), Рогулин Сергей Александрович (RU), Хохлова Ника Геннадьевна (RU)*

Заявка № 2021136348

Приоритет изобретения **09 декабря 2021 г.**

Дата государственной регистрации  
в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации **18 октября 2022 г.**

Срок действия исключительного права  
на изобретение истекает **09 декабря 2041 г.**

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

*Ю.С. Зубов*



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

**№ 2784307**

**Способ изготовления гаечных ключей пластическим деформированием**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный технологический университет "СТАНКИН" (ФГБОУ ВО "МГТУ "СТАНКИН") (RU)*

Авторы: *Сосенушкин Евгений Николаевич (RU), Сосенушкин Александр Евгеньевич (RU), Кадымов Вагид Ахмедович (RU), Яновская Елена Александровна (RU), Гусев Дмитрий Сергеевич (RU), Шарыкин Михаил Валерьевич (RU), Хохлова Ника Геннадьевна (RU)*

Заявка № 2021136355

Приоритет изобретения **09 декабря 2021 г.**

Дата государственной регистрации  
в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации **23 ноября 2022 г.**

Срок действия исключительного права  
на изобретение истекает **09 декабря 2041 г.**

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

*Ю.С. Зубов*



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

**№ 2784309**

**Способ штамповки гаечных ключей**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный технологический университет "СТАНКИН" (ФГБОУ ВО "МГТУ "СТАНКИН") (RU)*

Авторы: *Сосенушкин Евгений Николаевич (RU), Сосенушкин Александр Евгеньевич (RU), Кадымов Вагид Ахмедович (RU), Яновская Елена Александровна (RU), Гусев Дмитрий Сергеевич (RU), Шарыкин Михаил Валерьевич (RU), Хохлова Ника Геннадьевна (RU)*

Заявка № **2021136354**

Приоритет изобретения **09 декабря 2021 г.**

Дата государственной регистрации  
в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации **23 ноября 2022 г.**

Срок действия исключительного права  
на изобретение истекает **09 декабря 2041 г.**

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

*Ю.С. Зубов*

