

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

*На правах рукописи*

**НГУЕН ЧУНГ КИЕН**

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ГОРЯЧЕЙ ШТАМПОВКИ  
ЭНДОПРОТЕЗОВ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ**

Специальность 05.16.05 «Обработка металлов давлением»

Диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

**К.т.н., доцент, Польшин Владислав Игоревич**

Москва - 2021

## Содержание

|   |    |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ.....   | 4  |
| Глава 1. Аналитический обзор литературы .....   | 9  |
| 1.1. Общая характеристика титановых сплавов .....                                       | 9  |
| 1.1.1. Структура титановых сплавов .....  | 9  |
| 1.1.2. Химический состав титановых сплавов.....   | 14 |
| 1.1.3. Механические свойства титановых сплавов .....                                    | 18 |
| 1.1.4. Химический состав, структура и механические свойства сплавов типа ВТ6 .....      | 19 |
| 1.2. Особенности нагрев и деформации титановых сплавов .....                            | 21 |
| 1.2.1. Особенности нагрев титановых сплавов.....  | 21 |
| 1.2.2. Особенности деформации титановых сплавов.....                                    | 23 |
| 1.2.3. Обработка давлением титановых сплавов .....                                      | 24 |
| 1.2.4. Особенности деформации титанового сплава ВТ6.....                                | 26 |
| 1.3. Способы производства прутковых полуфабрикатов из титанового сплава .....           | 26 |
| 1.3.1. Продольная прокатка .....  | 26 |
| 1.3.2. Радиально-сдвиговая прокатка (РСП).....  | 27 |
| 1.3.3. Ковка на радиально-ковочных машин (РКМ) .....                                    | 28 |
| 1.4. Оборудование для горячей объемной штамповки титановых сплавов .....                | 28 |
| 1.4.1. Штамповка на молотах .....   | 29 |
| 1.4.2. Штамповка на прессах .....   | 30 |
| 1.4.3. Штамповка на горизонтально - ковочных машинах.....                               | 30 |
| 1.4.4. Смазка и схватывание .....   | 31 |
| 1.5. Водородная технология титановых сплавов.....                                       | 32 |
| 1.5.1. Термоводородная обработка (ТВО) .....  | 32 |
| 1.5.2. Водородное пластифицирование .....   | 33 |
| 1.5.3. Механоводородная обработка.....  | 34 |
| 1.6. Применение компьютерное моделирования процессов деформации .....                   | 35 |
| 1.7. Биосовместимые материалы .....   | 36 |
| 1.8. Эндопротез тазобедренного сустава и существующие технологии его изготовления ..... | 37 |
| 1.8.1. Эндопротез тазобедренного сустава .....  | 37 |
| 1.8.2. Существующие технологии изготовления заготовок ножек эндопротезов .....          | 38 |
| 1.9. Заключение по главе 1 .....  | 39 |
| Глава 2. Методика проведения исследований и исследуемые материалы .....                 | 40 |
| 2.1. Исследуемые материалы .....  | 40 |
| 2.1.1. Исследуемые материалы для физического моделирования.....                         | 40 |
| 2.1.2. Исследуемые материалы для горячей деформации .....                               | 42 |

|  |     |
|--|-----|
| 2.2. Оборудование и методика исследовательских работ .....   | 45  |
| 2.2.1. Методика математического моделирования .....  | 45  |
| 2.2.2. Оборудование и оснастки для физического моделирования .....                                     | 46  |
| 2.2.3. Методы и оборудования для исследования микроструктуры .....                                     | 47  |
| 2.2.5. Оборудования и оснастки для горячей штамповки .....   | 50  |
| Глава 3. Компьютерное моделирование процесса штамповки эндопротезов.....                               | 52  |
| 3.1. Выбор схемы штамповки .....   | 52  |
| 3.2. Определение коэффициента трения .....   | 54  |
| 3.3. Выбор формы, типа и размеров заготовок.....   | 56  |
| 3.4. Проектирование конструкции штамповых вставок.....   | 61  |
| 3.5. Компьютерное моделирование процесса горячей штамповки эндопротезов .....                          | 62  |
| 3.5.1. Моделирование штамповки с единичной заготовкой .....  | 67  |
| 3.5.2. Моделирование штамповки со спаренной заготовкой бобышками внутрь .....                          | 69  |
| 3.5.3 Моделирование штамповки со спаренной заготовкой бобышками наружу .....                           | 74  |
| 3.6. Заключение по главе 3 .....   | 78  |
| Глава 4. Физическое моделирование процесса штамповки эндопротезов .....                                | 80  |
| 4.1. Подготовка заготовок и штампы для физического моделирования.....                                  | 80  |
| 4.2. Физическое моделирование с помощью слоистой заготовки.....  | 84  |
| 4.3. Физическое моделирование процесса штамповки эндопротезов.....                                     | 87  |
| 4.3.1. Физическое моделирование штамповки с единичной заготовкой .....                                 | 87  |
| 4.3.2. Физическое моделирование штамповки со спаренной заготовкой.....                                 | 89  |
| 4.4. Заключение по главе 4 .....   | 90  |
| Глава 5. Выбор технологии производства заготовок и её влияние на структуру поковки<br>эндопротеза..... | 92  |
| 5.1. Выбор рациональной заготовки под штамповка.....   | 92  |
| 5.2. Оптимизация параметров штамповки с использованием ТВО .....                                       | 97  |
| 5.3. Заключение по главе 5 .....   | 100 |
| Глава 6. Пробная штамповки эндопротезов из титанового сплава ВТ6.....                                  | 102 |
| 6.1. Выбор термомеханические режимы штамповки эндопротезов .....                                       | 102 |
| 6.2. Разработка изготовление штамповых вставок .....   | 104 |
| 6.3. Проведение пробного штамповки эндопротезов из титанового сплава ВТ6 .....                         | 106 |
| 6.4. Заключение по главе 6 .....   | 108 |
| ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ .....   | 109 |
| Список литературы .....  | 111 |
| Приложение 1 .....   | 118 |
| Приложение 2 .....   | 119 |

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** Титановые сплавы имеют широкое применение в ортопедии и травматологии за счёт их превосходной биосовместимости и низкого модуля упругости, и также высокой удельной прочности. В связи с большим количеством ежегодных проводимых восстановительных операций с замещением костной ткани эндопротезами, необходимо обеспечить медицину не дорогими, но надёжными имплантатами. Эндопротезы используются в медицине и предназначены для полного замещения повреждённого сустава. Их изготавливают из металлов и сплавов, обладающих хорошей биосовместимостью с телом человека. Одними из самых широко используемых материалов являются титановые сплавы, в частности сплавы типа ВТ6. В настоящее время эндопротезы изготавливают методом литья с последующей механообработкой. Существующая технология дорога и не всегда обеспечивает требуемый уровень механических свойств. Однако необходимость повысить качество и эксплуатационные характеристики, снизить стоимость и трудоёмкость производства эндопротезов заставило обратиться к процессам обработке металлов давлением. Главным требованием, предъявляемым к любому имплантату, является надёжность, характеризующаяся способностью функционального выполнения замещения костной ткани при длительном сроке службы.

В связи с этим вопросы о разработке технологического процесса изготовления эндопротезов в открытых штампах из титановых сплавов, направленной на улучшение качества выпускаемых изделий и замена традиционных технологий является важными и актуальными. Эффективным способом получения подобных изделий является горячая штамповка, внедрение которой позволит обеспечить хорошую структуру, улучшение механических свойств и эксплуатационных характеристик изделий при снижении экономических затрат. Работа посвящена разработке технологии получения эндопротезов из титанового сплава ВТ6 на основе компьютерного и физического моделирования процессов горячей штамповки. Основной целью является выбор рациональной схемы объемной штамповки, анализ энергосиловых параметров деформирования, а также определение формы и размеров заготовки. На основании результаты компьютерного моделирования была создана штамповая оснастка для физического моделирования процесса штамповки эндопротеза двух типов поковок: единичная и спаренная. Проводили физическое моделирование процесса, для различных типов исходных заготовок из цилиндрической, плоской и фигурной, сделанных из термопласта, используемого в качестве модельного материала. Проанализированы полученные результаты для выбора оптимальной геометрической конфигурации заготовки и

рациональной схемы штамповки. Оптимизирован и обоснован выбор рационального способа получения заготовок и их обработка для повышения технико-экономических показателей процесса. Разработаны штамповые вставки для изготовления опытной партии поковок эндопротезов с целью исследования структуры и свойств и сравнения с заготовками эндопротезов, полученных литьем и вырезанных из плиты. Предложенная технология не только обеспечивает лучший набор эксплуатационных свойств, но и удешевляет процесс получения эндопротезов. Исследованы механические свойства и структура поковок, которые превосходят показатели, полученные по старой технологии.

**Цель и задачи работы.** Исследование и разработка технологии горячей объемной штамповки эндопротезов из титанового сплава ВТ6 в открытых штампах с помощью компьютерного и физического моделирования. Выбор рациональной схемы объемной штамповки, определение формы и размеров заготовки. Разработка конструкции штамповых вставок для изготовления опытной партии поковок эндопротезов. Анализ влияния способа получения и структуры заготовки на формирование структуры поковки после горячей деформации. Разработка универсальной технологии штамповки деталей из титановых сплавов.

Для достижения поставленных целей решались задачи по:

1. Анализу информации о титановых сплавах их свойствах, составе, структуре и областях применения, нагреву и деформации титановых сплавов, и способов производства прутковой заготовки, в том числе и сплавов типа ВТ6.

2. Анализу научно-технической литературы по оборудованию и технологии для обработки давлением титановых сплавов.

3. Анализу основных, существующих технологий изготовления заготовок эндопротезов тазобедренного сустава.

4. Компьютерному моделированию формоизменения заготовки при горячей объемной штамповки, влиянию размеров и формы исходной заготовки на технологические параметры процесса штамповки (распределение температуры, усилие деформации и заполнение гравюры штампа, коэффициент использования металла), а также зависимости осевого усилия от хода верхнего инструмента.

5. Физическому моделированию процесса штамповки титановых эндопротезов в открытых штампах, были выявлены закономерности и особенности заполнения гравюры штампа, характера образования и формы облоя. Использованию полученных данных для выбора исходных конфигураций заготовок, рациональной схемы штамповки, и необходимого

оборудования для горячей штамповки эндопротезов.

6. Анализу влияния способа получения и структуры заготовки на формирование структуры поковки после горячей деформации.

7. Разработке универсальной технологии штамповки деталей из титановых сплавов.

**Научная новизна.** Научная новизна работы заключается в следующем:

1. На основе методов компьютерного моделирования было проанализировано влияние формы и типа исходной заготовки на технологические параметры процесса горячей объемной штамповки. Проведен выбор рациональной схемы объемной штамповки, анализ энергосиловых и параметров деформирования, а также определение формы и размеров заготовки.

2. Физическое моделирование дало возможность оценить особенности течения металла при горячем деформировании в штампе, полноту формообразовании поковки, заполнения облойной канавки и адекватность выбора объема, формы заготовки, повышение стойкости оснастки и снижения энергосиловых параметров процесса.

3. На основе проведенных исследований разработана технология штамповки для изготовления эндопротезов и установлено, что наиболее рациональным для их эффективного производства возможно использовать прутковую заготовку полученную методом РСП.

4. Разработана новая универсальная технология горячей штамповки титановых сплавов, сочетающая компьютерное и физическое моделирование, выбор рациональной заготовкой и способом её производства, которую можно применять не только для штамповки эндопротезов, а для штамповки любых изделий из титановых сплавов.

**Практическая ценность.**

1. Получены базы данных, которые являются результатами компьютерного моделирования горячей штамповки эндопротезов из титанового сплава ВТ6 и могут быть использованы при моделировании штамповки других деталей.

2. Предложенная модель позволяет быстро оценить влияние размеров и формы исходной заготовки на технологические параметры процесса горячей объемной штамповки: распределения температуры, усилие деформации и т.п.

3. На основании результатов компьютерного моделирования была создана штамповая оснастка для физического моделирования процесса штамповки эндопротеза. Используя различные типы исходных заготовок, проводилось физическое моделирование для оптимизации процесса штамповки. Выбрана оптимальная геометрическая конфигурация

заготовки и рациональная схема штамповки.

4. Предложены технологические рекомендации по схемам расположения заготовок, распределению температуры, усилию деформации и т.п., конструкции и технологической оснастки горячей штамповки эндопротезов.

5. Проведено исследование по выбору рационального способа получения заготовок и влияния ТВО на структуру штамповок из титановых сплавов.

6. Разработанная технология была апробирована при проведении опытной горячей штамповке эндопротезов из титанового сплава ВТ6.

7. Результаты работы используются в учебном процессе при проведении занятий со студентами бакалавриата и магистратуры кафедры «Обработки металлов давлением» в НИТУ МИСиС.

#### **Методы исследования и достоверность результатов.**

Для проведения исследований использовалось современное программное обеспечение, например Qform-3D, Deform-3D, оригинальные и взаимодополняющие методики, соответствующие современному научному уровню. Анализ экспериментальных данных позволяет сделать вывод о правильности выбора методик исследования и предложенных решений проблемы. Основные выводы диссертации обоснованы и логически вытекают из содержания работы.

**Личный вклад автора.** Автор провел аналитический обзор литературы по теме исследования, составил основной план проведения экспериментов, изготовления опытной партии поковок эндопротезов. Был смоделирован процесс штамповки титановых эндопротезов в открытых штампах, изучены микро и макроструктуры заготовок и поковок из сплава ВТ6 до, и после горячей штамповки автором. Выполнил обработку и анализ полученных результатов, участвовал в научных конференциях и подготовке научных статей.

#### **Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Исследование влияния размеров и формы исходных заготовок на технологические параметры процесса горячей объемной штамповки эндопротезов.

2. Выбор рациональной схемы, конфигурации заготовок при горячей штамповке эндопротезов из титанового сплава ВТ6.

3. Выбор режимов деформации титанового сплава ВТ6 для изготовления эндопротезов.

4. Влияние макро и микроструктуры заготовки и способа её производства, а так же

предложенной технологии горячей деформации на эксплуатационные характеристики эндопротезов из титанового сплава ВТ6.

5. Универсальная технология горячей штамповки титановых сплавов, сочетающая компьютерное и физическое моделирование, с выбором рациональной заготовки и предложенными режимами деформации.

**Апробация работы.** Публикации в сборниках трудов Международных конференций:

- 6-я Международная научная конференция «Исследования молодых ученых» Казань, 2020.

- 27-я Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов 2020», МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, 2020.

- 11-й Всероссийской научно-технической конференции «Современные инновации в науке и технике». Курск, 2021.

**Публикации.** Основные положения исследовательской работы апробированы на международных конференциях и в публикациях (из них 3 статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ и 3 опубликованные в сборниках трудов Международных конференций).

**Структура и объем работы.** Диссертация изложена на 119 страницах машинописного текста, в том числе: введение, 6 глав, выводы по работе, 60 рисунок, 25 таблиц и список литературы из 118 источников.



## Глава 1. Аналитический обзор литературы

### 1.1. Общая характеристика титановых сплавов

С развитием уровня производства в авиации, атомной энергетике и космической технике были поставлены задачи, которые не решались с использованием других материалов, кроме титана и его сплавов являются подходящим решением [1]. Комплекс технологических свойств титана и его сплавов связан с особенностью их кристаллической структуры, механических и химических свойств. Для титановых сплавов характерно широким разнообразием структур, на формирование которых значительное влияние оказывают условия кристаллизации, термической обработки, деформации и т. д. Их широко применяют в медицине и промышленности, благодаря высокой прочности, относительно низкой плотности, отличной коррозионной стойкости и хорошей биосовместимости [2].

#### 1.1.1. Структура титановых сплавов

Титан является полиморфным металлом с двумя аллотропическими модификациями. При комнатной температуре титан представляет собой  $\alpha$ -фазу с гексагональной плотноупакованной (ГП) решёткой. При повышении температуры которой до  $882,5^{\circ}\text{C}$  происходит превращение во высокотемпературную  $\beta$ -фазу (от  $882,5^{\circ}\text{C}$  до  $T_{\text{пл}}$  - абсолютная температура плавления) с объёмно-центрированной кубической (ОЦК) решёткой. На температуру превращения между фазами влияют легирующие элементы [3].

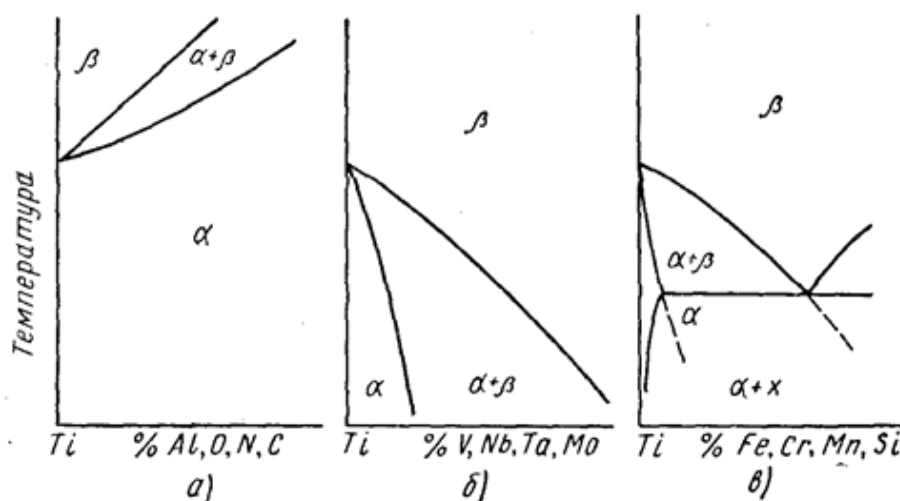


Рисунок 1.1 - Диаграммы состояния титановых сплавов.

Диаграмм состояния титановых сплавов разделяется на три группы (рисунок 1.1) в зависимости от влияния в них внедренных легируемых элементов на температуру

полиморфного превращения  $\alpha \leftrightarrow \beta$ . На рисунке 1.1а изображаются системы, в которых температура полиморфного  $\alpha \leftrightarrow \beta$ -превращения повышается  $\alpha$ -стабилизаторами. Относящимися к элементам, которые расширяют область устойчивости, является алюминий, кислород, углерод и азот. Относятся к изоморфным  $\beta$ -стабилизаторам, легирование которых снижает температуру полиморфного  $\alpha \leftrightarrow \beta$  превращения тугоплавкие переходные металлы, такие как: ванадий, ниобий, тантал, молибден и вольфрам (рисунок 1.1б).

К эвтектоидообразующим  $\beta$ -стабилизаторам относятся марганец, железо, никель, кремний, медь и др, внедрение которых в титановых сплавах понижает температуру полиморфного  $\alpha \leftrightarrow \beta$  превращения при распаде высокотемпературной  $\beta$ -фазы на эвтектоидную смесь (рис. 1.1 в). К нейтральными упрочнителями относятся легирующие элементы (олово, цирконий и гафний), влияние которых на область растворимости  $\alpha$ - и  $\beta$ -фаз оказывается малым.

Согласно классификации, предложенной С.Г.Глазуновым титановые сплавы различают на:  $\alpha$  - титановые сплавы;  $(\alpha+\beta)$  -сплавы;  $\beta$ -сплавы [4]. Применение  $\alpha$ -титановых сплавов с незначительным содержанием  $\beta$ -фазы широко востребовано в последнее время, при этом сохраняются все основные характеристики чистых сплавов с  $\alpha$ -фазой. Существование  $\beta$ -фазы приводит к улучшению технологических и механических свойств. К таким сплавам относятся псевдо-  $\alpha$ -сплавы. К псевдо-  $\beta$  сплавам относятся сплавы, основанных на основе  $\beta$ -титана с небольшим количеством содержанием  $\alpha$ -фазы в качестве упрочнителя, благодаря чему возможно эффективно их упрочнять закалкой и старением [5].

Микроструктура титановых сплавов классифицируются на 9 типов, изображенных на рисунках 1.2, 1.3):

- Равноосная структура (1, 2, 3 типа), образование которой в результате деформации, осуществляющейся при температуре ниже точки полиморфного  $(\alpha+\beta) \leftrightarrow \beta$ -превращения, обеспечивает высокие пластичности, предел выносливости и наименьшую чувствительность к надрезу. Такая структура является оптимальной для изготовления деталей, работающих в условиях вибрационных нагрузок.

- Деформация, осуществляющаяся при температуре выше точки превращения и заканчивается в двухфазной области образует структуру типов 4, 5, 6. Особенностью которой является игольчатое строение корзиночного плетения, обладающее высокой жаропрочностью и прочностью, сочетая пластичность, выносливость и термическую стабильность. Сплавы с такой структурой часто применяются для изготовления деталей, подвергающихся растягивающим напряжениям в эксплуатации.

- При горячем деформировании в  $\beta$ -области образуется структура типов 7, 8, 9. Которая характерна крупным зерном превращенной  $\beta$ -фазы, и пониженной пластичностью,

долговечностью, выносливостью и чувствительностью к надрезу при эксплуатации с вибрационными нагрузками и низкой термической стабильностью. Для устранения данной структуры возможно повторной деформацией в  $(\alpha+\beta)$  -области.

Макроструктура титановых сплавов классифицирована по десятибалльной системе (рисунок 1.4). Механические свойства и качества изготовленных изделий увеличивается по уменьшению балла макроструктуры и ее максимальной однородности.

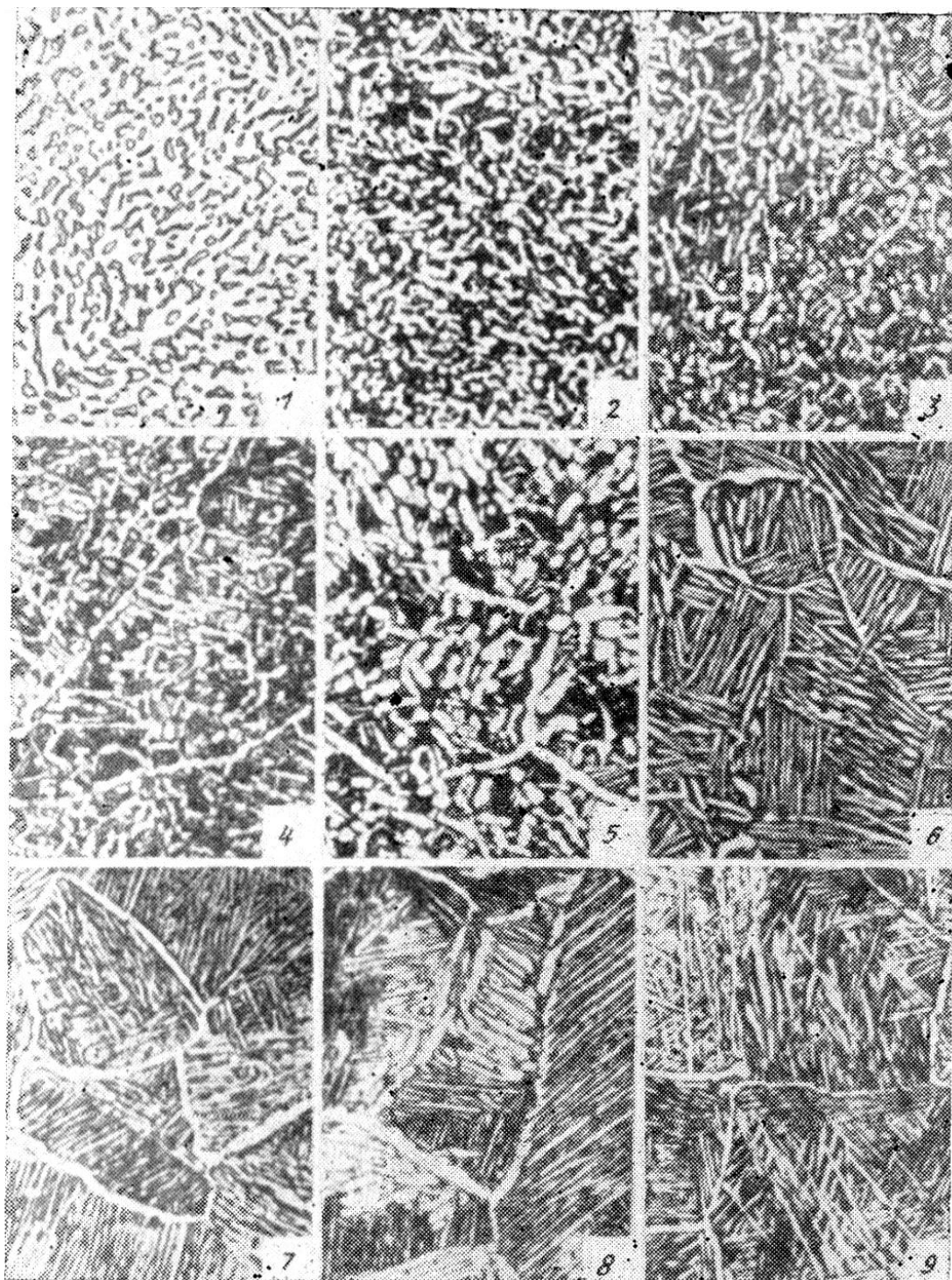


Рисунок 1.2 - Шкала микроструктур двухфазных титановых сплавов x500.

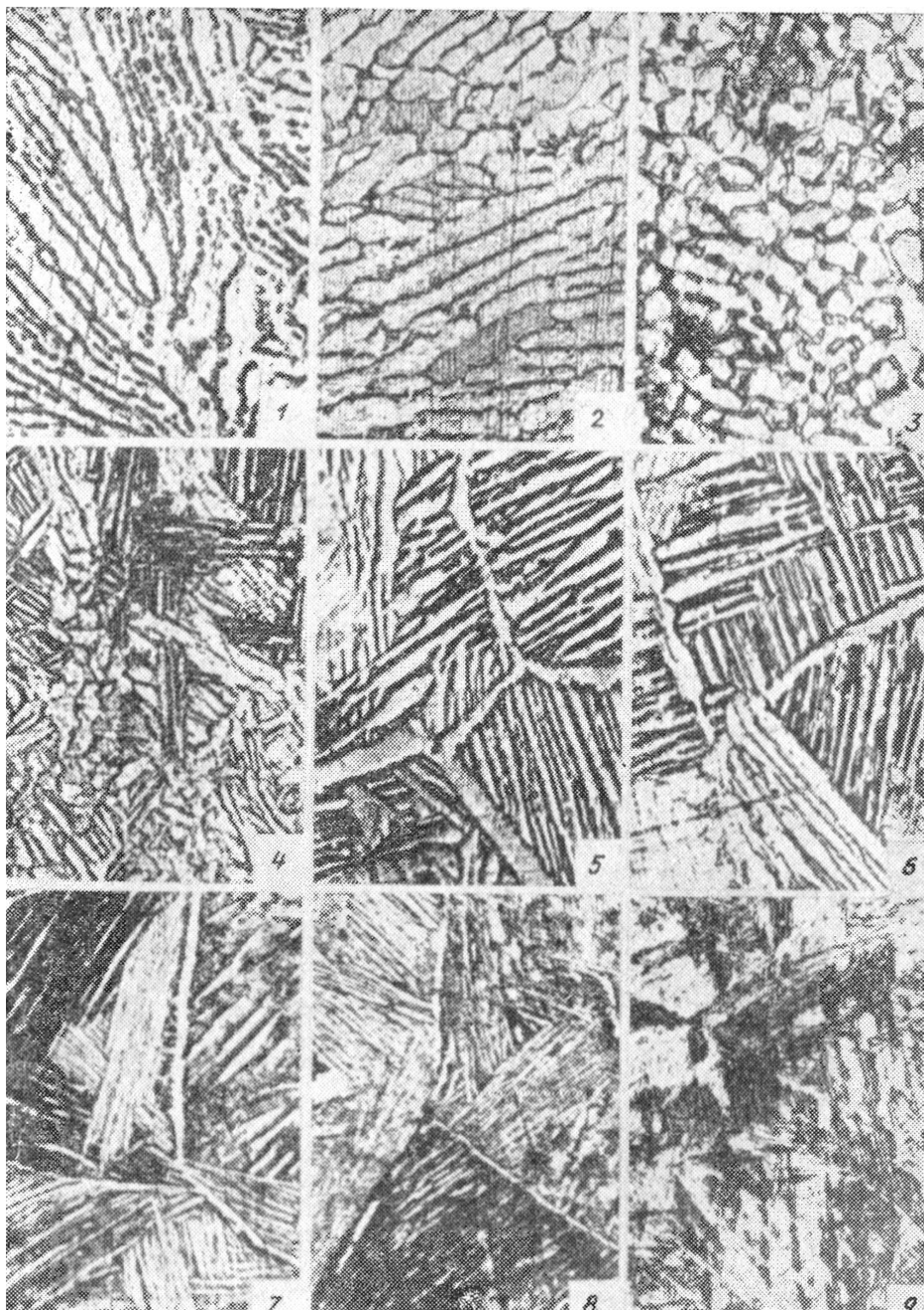


Рисунок 1.3 - Шкала микроструктур однофазных титановых сплавов x500.

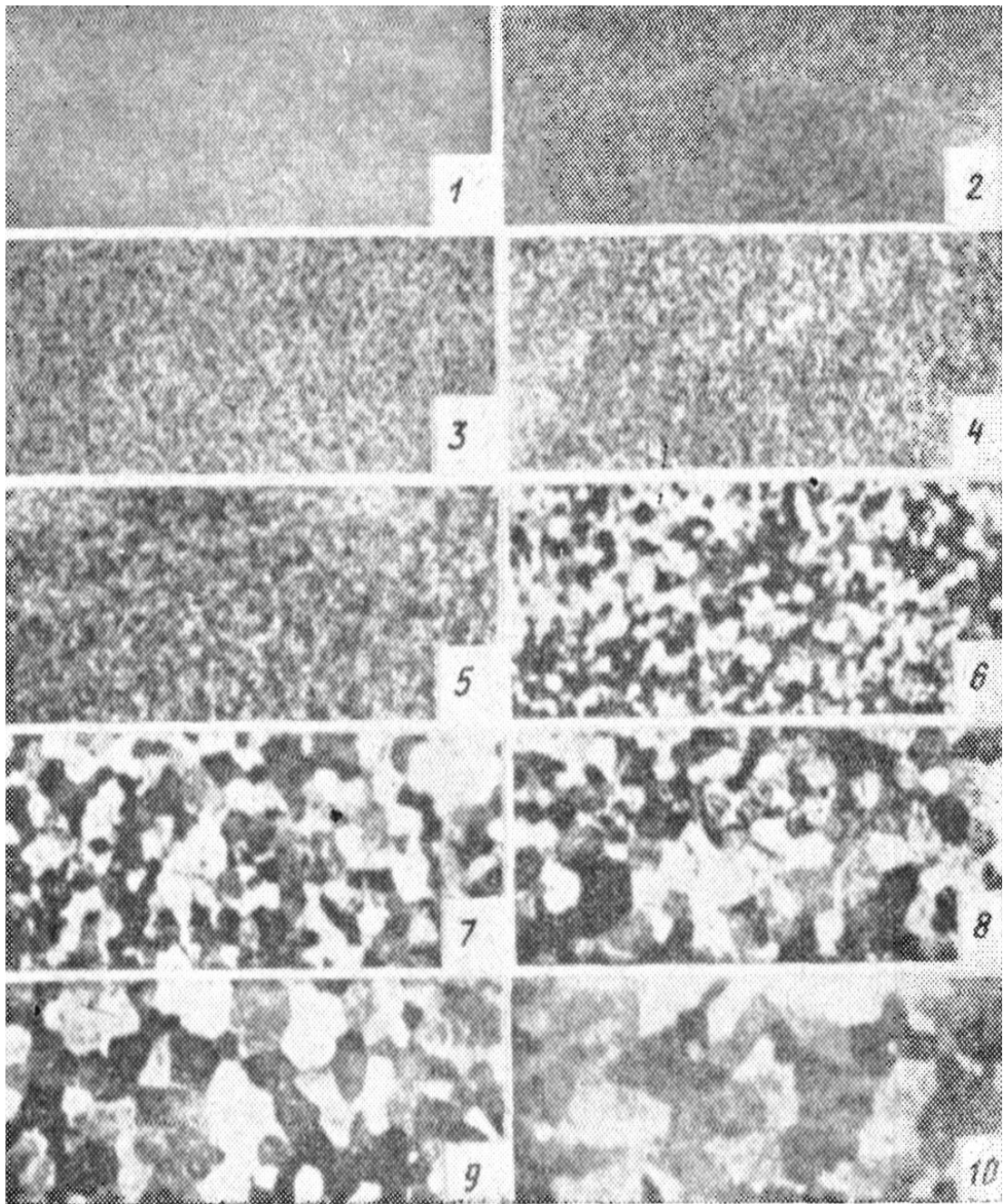


Рисунок 1.4 - Шкала макроструктур титановых сплавов.

### 1.1.2. Химический состав титановых сплавов

В литературе и на практике чаще всего рассматривается классификация, принятая В. Н. Моисеевым [6]. Как вышесказано, что легирующие элементы оказывают значительное влияние на область существования фаз титановых сплавов за счёт понижения и повышения температуры, при которой происходит переход фаз. Любые титановые сплавы можно классифицировать на  $\alpha$ -сплавы,  $(\alpha+\beta)$ -сплавы и  $\beta$ -сплавы по химическому составу сплава с введением легирующих элементов. К титановым  $\alpha$ -сплавам относят сплавы, содержащие легирующие элементы, которые повышают стабильность  $\alpha$ -фазы ( $\alpha$ -стабилизатор). Основным элементом данной группы стал алюминий. Кроме этого, к  $\alpha$ -стабилизаторам относятся и элементы, такие как кислород, азот, углерод, но их содержание приводит к снижению механических свойств полученных сплавов. Вторую группу составляют элементы, стабилизирующие  $\beta$ -фазу ( $\beta$ -стабилизатор): молибден, кремний, ванадий, хром, кобальт, железо.

|  |                      |                                       |                                     |
|--|----------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| <b><math>\alpha</math> сплавы</b>                    |                      | -Более высокая плотность              |                                     |
|  | Нелегированный титан | -Увеличение реакции на термообработку |                                     |
|  | Ti-5Al-2.5Sn         |                                       |                                     |
| <b>Псевдо-<math>\alpha</math> сплавы</b>             | Ti-8Al-1Mo-1V        | -Увеличение скорости деформации       |                                     |
|  | Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo   | Чувствительность                      |                                     |
| <b>Двухфазные сплавы (<math>\alpha+\beta</math>)</b> | Ti-6Al-4V            | -Улучшение технологичности            |                                     |
|  | Ti-6Al-2Sn-6V        |                                       |                                     |
| <b>Псевдо-<math>\beta</math> сплавы</b>              | Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo   |                                       | -Повышение сопротивления ползучести |
|  | Ti-3Al-10V-2Fe       |                                       |                                     |
| <b><math>\beta</math> сплавы</b>                     | Ti-13V-11Cr-3Al      |                                       | -Улучшение свариваемости            |
|  | Ti-8Mo-8V-2Fe-3Al    |                                       |                                     |

Рисунок 1.5. Влияние легирования на структуры и свойства титановых сплавов.

Указанные добавки понижают температуру полиморфного превращения титана. Третья группа сплавов с ( $\alpha+\beta$ ) структурой, обладают двухфазным строением либо при обычной температуре, либо при нагреве до сравнительно невысоких температур. Влияние легирующих элементов на области  $\alpha$ - и  $\beta$ -твердых растворов и фазовые превращения имеет значительное значение в практике, поскольку в результате чего возможно получать сплавы с различной структурой и таким образом решать вопросы термической обработки этих сплавов. Одним из важнейших легирующих элементов является алюминий. Его внедрение в титановых сплавах для повышения прочности и жаропрочности, а также для снижения склонности к их окислению при высоких температурах. Титановые сплавы, содержащих алюминий характерны высокой термической стабильностью.

К  $\alpha$  сплавам относятся: ВТ1-00 и ВТ1-0, часто применяются в качестве конструкционного материала для изготовления деталей требуется высокая пластичность, для изготовления полуфабрикатов, используемых в авиастроении, применяется ВТ1-2. Из сплава ВТ5 изготавливаются штамповочные детали и узлы, заготовки и полуфабрикаты, использование которых в промышленности: сварные детали, работающие при температуре от -253 до 400°C. Сплав ВТ5-1 применяют для изготовления предназначенных деталей для изготовления штамповочных конструкций. Сплав ПТ-7М применяется в промышленности для трубопроводов работающих при комнатной и повышенных (до 400-450°C) температурах в агрессивных средах.

К псевдо  $\alpha$  сплавам относятся: Сплав ОТ4-0 системы Ti-Al-Mn предназначен для изготовления листов, ленты, полосы, прутков, профилей, труб, поковок и штамповок. Применяют его в изделиях, изготавливаемых с использованием сварки, штамповки, гибки и других методов обработки. Сплав марки ОТ4-1 системы Ti-Al-Mn может быть использован для изготовления поковок, штамповок, прутков, профилей, труб, проволоки и других полуфабрикатов. Сплав марки ВТ20 системы Ti-Al-Zr-Mo-V предназначен для изготовления листов и плит; кроме того, из него могут быть изготовлены поковки, штамповки, прутки, профили и другие полуфабрикаты. Сплав ПТЗВ применяется для изделий с высокой прочностью при достаточной пластичности и вязкости, высоким сопротивлением малым пластическим деформациям, хрупкому и усталостному разрушению, применяемых в машиностроении, приборостроении и инструментальной промышленности. Сплав марки АТЗ системы Ti-Al содержит небольшие количества Cr, Fe, Si, В. Сплав АТЗ применяется в промышленности: кованные и штампованные детали, работающие при температуре до 400-450°C. Рекомендуется для изготовления штамповочных конструкций.

Сплав ВТ6 - Аналог ( $\alpha+\beta$ ) сплава Grade5 системы Ti-6Al-4V Обладает высокой технологичностью при обработке давлением, хорошими литейными свойствами. Предназначенный для изготовления поковок, штамповок, прутков, профилей и других полуфабрикатов, применяемых в авиастроении, химическом машиностроении, бытовой техники, конструкции, работающих в воде; в медицине. Сплав ВТ6С представляет собой деформируемый сплав с высокими антикоррозийными и прочностными характеристиками. Данный сплав чаще всего используется для производства баллонов, которые работают под внутренним давлением в широком диапазоне температур (-196-450°C) и прочих конструктивных элементов. Сплав ВТ3-1: Сплав системы Ti-6,3Al-2,5Mo с небольшими добавками Si, Cr и Fe. Предназначенный для изготовления детали компрессора газотурбинного двигателя (ГТД), работающие длительно до 400°C; арматура, ушковые болты, детали системы. Сплав ВТ8 - Высокое содержание алюминия и легирование кремнием обеспечивают более высокие прочностные и жаропрочные свойства. Основными видами полуфабрикатов являются прутки, поковки, штамповки и плиты. Сплав ВТ8 применяется для изготовления деталей ГТД. Сплав ВТ9 - Высокое содержание алюминия и легирование кремнием обеспечивают более высокие прочностные и жаропрочные свойства по сравнению с ВТ6. Предназначен для изготовления изделий, работа которых осуществляются при температурах 400-500°C. Сплав марки ВТ14 системы Ti-Al-Mo-V титановый сплав с ( $\alpha+\beta$ ) - структурой. Применяется для изготовления штампованных конструкций работающих при температуре до 400 °С.

Сплав марки ВТ22 системы Ti-Al-Mo-V с добавками Cr и Fe имеет высокий предел прочности как в отожженном, так и в термически упрочненном состоянии. Предназначается для изготовления высоконагруженных деталей и штампованных конструкций.

Химический состав сплавов на основе титана представлен в таблице 1.1 по ГОСТ 19807-91.



Таблица 1.1. Химический состав титановых сплавов по ГОСТ 19807-91 [7].

| Марка  | Химический состав, % |          |         |          |          |         |          |         |         |           |                |
|--------|----------------------|----------|---------|----------|----------|---------|----------|---------|---------|-----------|----------------|
|        | Основные компоненты  |          |         |          |          |         |          |         |         |           | Сумма примесей |
|        | Титан                | Алюминий | Ванадий | Марганец | Молибден | Хром    | Цирконий | Олово   | Железо  | Кремний   |                |
| BT1-00 | Основа               | -        | -       | -        | -        | -       | -        | -       | 0,15    | 0,08      | 0,10           |
| BT1-0  |                      | -        | -       | -        | -        | -       | -        | -       | 0,25    | 0,10      | 0,30           |
| BT1-2  |                      | -        | -       | -        | -        | -       | -        | -       | 1,5     | 0,15      | 0,30           |
| OT4-0  |                      | 0,4-1,4  | -       | 0,5-1,3  | -        | -       | 0,30     | -       | 0,30    | 0,12      | 0,30           |
| OT4-1  |                      | 1,5-2,5  | -       | 0,7-2,0  | -        | -       | 0,30     | -       | 0,30    | 0,12      | 0,30           |
| OT4    |                      | 3,5-5,0  | -       | 0,8-2,0  | -        | -       | 0,30     | -       | 0,30    | 0,12      | 0,30           |
| BT5    |                      | 4,3-6,2  | 1,2     | -        | 0,8      | -       | 0,30     | -       | 0,30    | 0,12      | 0,30           |
| BT5-1  |                      | 4,4-6,0  | 1,0     | -        | -        | -       | 0,30     | 2,0-3,0 | 0,30    | 0,12      | 0,30           |
| BT6    |                      | 5,3-6,8  | 3,5-5,3 | -        | -        | -       | 0,30     | -       | 0,60    | 0,10      | 0,30           |
| BT6C   |                      | 5,3-6,8  | 3,5-4,5 | -        | -        | -       | 0,30     | -       | 0,25    | 0,15      | 0,30           |
| BT3-1  |                      | 5,5-7,0  | -       | -        | 2,0-3,0  | 0,8-2,3 | 0,50     | -       | 0,2-0,7 | 0,15-0,40 | 0,30           |
| BT8    |                      | 5,8-7,0  | -       | -        | 2,8-3,8  | -       | 0,50     | -       | 0,30    | 0,20-0,40 | 0,30           |
| BT9    |                      | 5,8-7,0  | -       | -        | 2,8-3,8  | -       | 1,0-2,0  | -       | 0,25    | 0,20-0,35 | 0,30           |
| BT14   |                      | 5,3-6,3  | 0,9-1,9 | -        | 2,5-3,8  | -       | 0,3      | -       | 0,25    | 0,15      | 0,30           |
| BT20   |                      | 5,5-7,5  | 0,8-2,5 | -        | 0,5-2,0  | -       | 1,5-2,5  | -       | 0,25    | 0,15      | 0,30           |
| BT22   |                      | 4,4-5,7  | 4,0-5,5 | -        | 4,0-5,5  | 0,5-1,5 | 0,3      | -       | 0,5-1,5 | 0,15      | 0,30           |
| ПТ-7М  |                      | 1,8-2,5  | -       | -        | -        | -       | 2,0-3,0  | -       | 0,25    | 0,12      | 0,30           |
| ПТ-3В  |                      | 3,5-5,0  | 1,2-2,5 | -        | -        | -       | 0,3      | -       | 0,25    | 0,12      | 0,30           |
| AT3    |                      | 2,0-3,5  | -       | -        | -        | 0,2-0,5 | -        | -       | 0,2-0,5 | 0,20-0,40 | 0,30           |

### 1.1.3. Механические свойства титановых сплавов

Механические свойства титана и их сплавов при комнатной температуре прикреплены в таблице 1.2 [5, 8] и в таблице 1.3 [8] показаны механические свойства нескольких литейных титановых сплавов.

Таблица 1.2 - Механические свойства титановых сплавов.

| Марка  | Относительное удлинение, % | Предел прочности, МПа | Марка | Относительное удлинение, % | Предел прочности, МПа |
|--------|----------------------------|-----------------------|-------|----------------------------|-----------------------|
| BT1-00 | 25                         | 294-442               | BT3-1 | 10                         | 981-1180              |
| BT1-0  | 20                         | 393-539               | BT9   | 10                         | 981-1180              |
| OT4-0  | 20                         | 490-637               | BT14  | 10                         | 833-1030              |
| OT4-1  | 15                         | 588-735               | BT20  | 10                         | 932-1128              |
| OT4    | 10                         | 686-785               | BT22  | 8                          | 1079-1126             |
| BT5    | 10                         | 735-932               | ПТ-7М | 15                         | 490-686               |
| BT5-1  | 10                         | 785-981               | ПТ-3В | 12                         | 686-785               |
| BT6    | 10                         | 857-932               | AT3   | 15                         | 588-735               |

Таблица 1.3 - механические свойства литейных титановых сплавов.

| Марка  | Механические свойства, не менее |                  |            |              |                            |
|--------|---------------------------------|------------------|------------|--------------|----------------------------|
|        | $\sigma_{0,2}$ , МПа            | $\sigma_B$ , МПа | $\psi$ , % | $\delta$ , % | $a_H$ , МДж/м <sup>2</sup> |
| BT1Л   | 294                             | 343              | 20         | 10           | 0,49                       |
| ТЛ-3   | 539                             | 588              | 16         | 8            | 0,40                       |
| BT5Л   | 627                             | 686              | 14         | 6            | 0,30                       |
| BT20Л  | 823                             | 932              | 13         | 5            | 0,25                       |
| BT21Л  | 902                             | 981              | 8          | 4            | 0,20                       |
| BT6Л   | 804                             | 882              | 12         | 5            | 0,25                       |
| BT3-1Л | 814                             | 932              | 8          | 4            | 0,25                       |
| BT9Л   | 855                             | 932              | 8          | 4            | 0,20                       |
| BT14Л  | 785                             | 883              | 12         | 5            | 0,25                       |
| BT23Л  | 880                             | 990              | 8          | 4            | 0,25                       |
| BT18УЛ | 821                             | 905              | 24         | 12           | 0,30                       |
| BT35Л  | 980                             | 1110             | 16         | 6            | 0,25                       |
| BTЛ1   | 736                             | 835              | 12         | 5            | 0,15                       |

Особенности механических и технологических свойств титановых сплавов определены в зависимости от технологии обработки деформацией, термообработки и также легирующих элементов, и примесей в технических доступных пределах, структуры и различных сложно учитываемых факторов [9]. Титановые сплавы применяют не только при комнатной и повышенных, но и пониженных температурах. Пластичность сплавов при криогенных температурах возрастает с повышением их чистоты по примесям внедрения. Благодаря их превосходным механическим и технологическим свойствам титановые сплавы часто применяют в различных областях, в том числе космических, химической, морской промышленности, ракетостроении, энергетике, и частности биомедицине. Сегодня все больше применяют титан и его сплавы в качестве материала для изготовления изделий, назначенных в медицине. Сплавы ВТ6 стали одними из самых перспективных биосовместимых металлических материалов медицинского назначения.

#### 1.1.4. Химический состав, структура и механические свойства сплавов типа ВТ6

Относящиеся к  $\alpha+\beta$ -фазе, сплавы ВТ6 являются одним из наибольших широкоузнаемых титановых сплавов. Как двухфазный сплав, состоящий из чередующихся слоев гексагональной плотноупакованной  $\alpha$  и объемно-центрированной кубической  $\beta$ -фаз, его механические свойства очень сильно зависят от морфологии микроструктуры [10]. Сплав ВТ6 является одним из наиболее широко используемых в медицине, благодаря своей высокой прочности, относительно низкой плотности, отличной коррозионной стойкости и хорошей биосовместимостью с телом человека.

Таблица 1.4 - Химический состав сплавов типа ВТ6 (% по массе) по ГОСТ 19807-91 [11].

| Марка         | Легирующие элементы, % |         | Примеси, % (не более) |      |     |      |      |       |      |              |
|---------------|------------------------|---------|-----------------------|------|-----|------|------|-------|------|--------------|
|               | Al                     | V       | Si                    | Fe   | Zr  | C    | N    | H     | O    | Сумма прочих |
| ВТ6           | 5,3-6,8                | 3,5-5,3 | 0,10                  | 0,30 | 0,3 | 0,10 | 0,05 | 0,015 | 0,20 | 0,3          |
| ВТ6с          | 5,3-6,5                | 5,3-4,5 | 0,10                  | 0,25 | 0,3 | 0,10 | 0,05 | 0,015 | 0,15 | 0,3          |
| ВТ6ч          | 5,5-6,75               | 3,5-4,5 | 0,07                  | 0,40 | -   | 0,10 | 0,05 | 0,010 | 0,16 | 0,3          |
| ВТ6кт         | 5,5-6,5                | 3,5-4,5 | 0,05                  | 0,20 | -   | 0,05 | 0,03 | 0,06  | 0,12 | -            |
| Ti-6Al-4V     | 5,5-6,75               | 3,5-4,5 | -                     | 0,40 | -   | 0,10 | 0,05 | -     | 0,20 | 0,4          |
| Ti-6Al-4V ELI | 5,5-6,5                | 3,5-4,5 | -                     | 0,25 | -   | 0,08 | 0,05 | 0,015 | 0,13 | 0,4          |

Химический состав сплавов типа ВТ6 (% по массе) представлен в таблице 1.4 и механические свойства сплава ВТ6 приведены в табл. 1.5.

Таблица 1.5 - Механические свойства титанового сплава ВТ6 по ГОСТ 26492–85 [12].

| После отжига        |                        |                 |               |                            |                      | После закалки и старения |                 |               |                            |                      |
|---------------------|------------------------|-----------------|---------------|----------------------------|----------------------|--------------------------|-----------------|---------------|----------------------------|----------------------|
| $\sigma_B$ ,<br>МПа | $\sigma_{-1}$ ,<br>МПа | $\delta$ ,<br>% | $\psi$ ,<br>% | КСУ,<br>Дж/см <sup>2</sup> | $\tau_{ср}$ ,<br>МПа | $\sigma_B$ ,<br>МПа      | $\delta$ ,<br>% | $\psi$ ,<br>% | КСУ,<br>Дж/см <sup>2</sup> | $\tau_{ср}$ ,<br>МПа |
|                     |                        | Не менее        |               |                            |                      |                          | Не менее        |               |                            |                      |
| 900-1050            | 530                    | 10              | 30            | 40                         | 600                  | 1050–1150                | 6               | 20            | 30                         | 730                  |

Такое широкое применение сплава обуславливается его легированием различных элементов. В сплавах системы Ti-Al-V прочностные и жаропрочные свойства повышаются алюминиевым легированием, а пластичность повышается введением в него ванадия. Специфическое влияние, которое воздействует на параметры решетки  $\alpha$ -титана, обеспечивает благоприятное влияние, оказываемое легированными элементами на пластические свойства титановых сплавов. Большинство легирующих элементов, введенных в титане снижает пластичность за счёт увеличения соотношения осей  $c/a$ . Однако, соотношение осей  $c/a$  несколько уменьшается легированием Ванадия, в итоге чего приводит к повышению способности  $\alpha$ -фазы к пластической деформации.

ВТ6, самый распространенный сплав; его производство составляет более 50% всего мирового выпуска титана. В авиационной технике на его долю приходится более 80% деталей и конструкций. Предназначен для длительной эксплуатации до температуры 400°C. Сплав средней и высокой технологичности. Высокий комплекс свойств обусловлен удачным легированием. Выпускается несколько вариантов сплава, отличающихся содержанием примесей. С понижением содержания примесей внедрения уменьшается прочность и повышаются пластичность и вязкость. Сплав Ti-6Al-4V ELI с пониженным содержанием примесей внедрения предназначен для применения при криогенных температурах. Для повышения сопротивления коррозии и коррозионному растрескиванию в морской воде сплав легируют палладием или рутением.

Применяют в основном после отжига, но комплекс его свойств может быть улучшен термообработкой. Отжиг в  $\beta$ -области повышает вязкость разрушения, сопротивление ползучести и уменьшает скорость роста трещин. Рекристаллизационный отжиг, приводящий к мелкозернистой равноосной структуре, обеспечивает высокую циклическую выносливость.

Хорошо обрабатывается давлением, куется различными способами и прессуется; хорошо

формируется, причем листовая штамповка простых форм осуществляется при комнатной температуре. Сплав хорошо сваривается всеми видами сварки, включая электронно-лучевая сварка и диффузионную сварку; отличается высокими литейными свойствами.

Сплав применяется в авиации (диски, кольца и лопатки компрессора; лонжероны и другие детали планера, пилоны, роторные головки вертолетов); аэрокосмическая техника (сложнопрофильные конструкции, топливные баки, и др.); лопатки паровых турбин; установки и сооружения, работающие в морских условиях, детали крепления разного назначения; автомобилестроение (шатуны, зубчатые колеса, клапаны, пружины, втулки, теплообменники, оси, болты); мотоциклы (клапаны), имплантаты (хирургические и стоматологические), изделия бытового назначения.

## **1.2. Особенности нагрев и деформации титановых сплавов**

Деформационные характеристики титана и его сплавов в основном определяется сопротивлением пластической деформации, которое значительной степени зависит от чистоты металла (содержания примесей), температуры, степени и, наконец, скорости деформирования.

### **1.2.1. Особенности нагрев титановых сплавов**

Теплопроводность играет наиболее важную роль в выборе способа нагрева. Соответственно низкое значение теплопроводности вызывает определенное затруднение при нагреве титановых сплавов: большая длительность при поверхностном нагреве и значительные перепады температур по сечению при нагреве крупногабаритных заготовок. Поэтому для титановых сплавов рекомендуется нагревать заготовки в индукционных нагревательных установках или контактным способом, в электрических печах сопротивления, в соляных расплавах, в пламенных печах [13].

Индукционным способом целесообразно нагревать цилиндрические заготовки небольшой номенклатуры при массовом производстве. При большой номенклатуре заготовок разных диаметров и небольшом объеме производства желательно применять индукционные муфельные печи, работающие на промышленной частоте. Конструкция печей позволяет осуществлять нагрев в защитной атмосфере. В муфельных индукционных печах возможен нагрев фасонных заготовок. Прогрессивным способом нагрева заготовок под штамповку, гибку, высадку является контактный нагрев, обеспечивающий большую скорость нагрева, высокую экономичность и облегчающий условия работы. Фасонные заготовки рекомендуется нагревать в электрических печах методического типа или в двухкамерных, а также

двухкамерных муфельных печах, обогреваемых газом или мазутом. Печи, работающие на газе или мазуте, допускается применять при отсутствии других нагревательных устройств. Факел пламени при нагреве не должен быть направлен на нагреваемые заготовки.

При нагреве титановых заготовок в печи, в которой до этого была сталь и на поде осталась железная окалина, может происходить интенсивное взаимодействие металла с кислородом окалины, что приводит к изменению механических свойств материала. Для предотвращения такого взаимодействия подину покрывают кирпичом или листом коррозионностойкой стали [14-16]. При высоких температурах титан и его сплавы активно взаимодействуют с окружающей средой, что может вызвать нежелательное поверхностное или проникающее газонасыщение и даже воспламенение. Поэтому равномерный нагрев металла по всему объему в определенную длительность времени является важным фактором для обеспечения отсутствия трещин в следствии резких изменений температуры и минимального роста зерна [17]. Результаты различных исследований показали, что на поверхности титана происходит окисление интенсивнее по сравнению с титановыми сплавами за счет понижения скорости диффузии кислорода, проходящего через внешние оксидные слои. Практика показывает, что при нагреве перед обработкой давлением заготовок мелких и средних габаритных размеров толщина слоя окалины не выше 0,1 мм, а для крупных за 0,15 мм, соответственно.

Азот также растворяется в титане, однако его скорость диффузии оказывается более низкой по сравнению с кислородом, его влияние на структуру и механические свойства титана при нагреве на воздухе оказывает несущественным. Увеличение окисляемости титана в воздухе по сравнению с кислородом установлено экспериментальными данными [18]. Показывается что, повышение скорости окалинообразования вызвано наличием дефектного структурного слоя на внешнем слое окалины при его формировании с присутствием азота.

Особенности газонасыщенного слоя и степень его насыщения рассмотрены в, которые определяются температурой нагрева и время выдержки. Увеличение температуры нагрева с  $(\alpha+\beta)$  - области резко увеличивает глубину слоя. С увеличением выдержки нагрева не приводит к значительному росту газонасыщенного слоя. Увеличение температуры нагрева снижает микротвёрдость альфированного слоя, однако с повышением температуры до 1100-1200°C приводит к резкому росту микротвердости альфированного слоя.

При нагреве в  $\beta$ -области растворимость кислорода в  $\beta$ -фазе резко уменьшается, а диффузионное проникновение кислорода внутрь металла, наоборот, увеличивается. Вероятно, этим объясняется минимум твёрдости на кривых при 1000°C. Причиной появления минимума твердости при 1000°C может быть также постепенное увеличение содержания кислорода в титане и образование соединения TiO [19].

### 1.2.2. Особенности деформации титановых сплавов

При деформации заготовки в горячем состоянии влияние на течение металл оказывают многочисленные факторы, в том числе геометрические формы инструментов и заготовки, материала заготовки, температуры рабочей поверхности штампа, скорости деформации, состава и количества смазки и др. При этом совместные влияния всех этих факторов представляются сложным и их учесть трудно существующими методами. Устранение появления участков с крупнозернистой структурой при деформации титановых сплавов стало возможным при снижении температуры обработки, сокращении длительности нагрева при высоких температурах и применении заготовлений в качестве исходной заготовки, структура которых равномерна и мелкозерниста [20-23].

С увеличением температуры обработки титановых сплавов повышается их технологическая пластичность. Температура горячей деформации зависит от температуры полного полиморфного превращения сплава, при котором температура полиморфного превращения прямо пропорциональна температурному интервалу горячего деформирования. Применение нагрева при штамповке объясняется в некоторых проведенных работах [24, 25] тем, что недостаточна пластичность у некоторых сплавов, и возможно увеличить степень деформации, и также значительно уменьшается упругая отдача деформируемого материала

При горячем деформировании нагрев титановых сплавов целесообразно осуществляется до температур  $\beta$ -области. Однако, при данной диапазонной температуре приводит к образованию структуры с крупном зерном, что крайне нежелательно, так как она снижает прочностные и пластические свойства. Установлено, что характер изменения величины зерна в зависимости от температуры нагрева и практически одинаков для сплавов с  $\alpha$  - и  $(\alpha+\beta)$  -структурой. При нагреве чистого титана до температур выше  $882,5^{\circ}\text{C}$  ГП  $\alpha$ -структура, существующая при низких температурах, переходит в ОЦК  $\beta$ -структуру, которая сохраняется до температуры плавления. Поэтому для окончательного деформирования используют температуры, соответствующие  $(\alpha+\beta)$  -области, какую можно получить хорошие механические свойства [26-29].

В горячей обработке штампами титановых сплавов, необходимо знать изменение пластичности в зависимости от температуры деформации [30]. Практика показывает, что пластичность и штампуемость титановых сплавов возможно обеспечиваться обработкой при температуре выше  $900^{\circ}\text{C}$ . Часто один и тот же материал в разных местах штампуют при различных температурах. Согласно многочисленным данным различных источников штамповка сплавов на основе титана осуществляется при температуре  $860-960^{\circ}\text{C}$  (двухфазной  $\alpha+\beta$  -области) [31].

### 1.2.3. Обработка давлением титановых сплавов

Несмотря на аналогичность множества технологических параметров при обработке давлением титановых сплавов по сравнению с сталями, но при деформации сплавов на основе титана необходимо учитывать некоторые существенные особенности [32-34]. Механические свойства заготовок из титанового сплава, подвергаемого деформацией при разных температурах приведен в таблицу 1.6.

Таблица 1.6 - Механические свойства заготовок из титанового сплава, деформированных при различных температурах [35].

| Область Деформации | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\sigma_B$ , МПа | $\delta$ , % | $\psi$ , % |
|--------------------|----------------------|------------------|--------------|------------|
| $\alpha+\beta$     | 990                  | 1040             | 12           | 40         |
| $\beta$            | 950                  | 1040             | 10           | 27         |

Известно, что условия обработки давлением в горячем состоянии, такие как: температура и длительность нагрева, скорости и степень деформации, равномерность нагрева заготовок, скорости охлаждения оказывают влияние на механические свойства и структуру титановых сплавов. Пластическую деформацию осуществляют как в холодном состоянии, так и с нагревом деформируемого металла. Несмотря на то, что титан и его сплавы имеют гексагональную решетку, обладающую, как это принято считать, пониженной пластичностью при деформации, для титановых сплавов приемлемы все виды обработки давлением, которые используются для других конструкционных металлов. Структура и механические свойства титановых сплавов сильно изменяются при нагреве выше полного полиморфного превращения. Для того, чтобы выработать подходящие условия обработки давлением в горячем состоянии, деформация титановых сплавов осуществляется при температурах больше 1000°C (в  $\beta$ -области). Но при этом не обеспечивает благополучную структуру и приемлемые механические свойства. Поэтому к настоящему времени для конечной деформации применяются температуры, двухфазной ( $\alpha+\beta$ ) - области (860-960°C). При обработке в штампах в данном температурном интервале сопровождается повышению удельных усилий инструментов, и сужению диапазона деформации. Внедрения штамповки в  $\beta$  области температуры возможно применением нагревых штампов [36]. Титановые сплавы часто подвергаются горячей деформации (850-1150°C). По мере того увеличения температуры при деформации титановых сплавов их пластичность непрерывно увеличивается, обеспечивает получение деталей любых формы и размеров и сложности [37]. Режимыковки слитков и предварительно деформированных заготовок представлены в таблице 1.7.



Таблица 1.7 - Режимы ковки слитков и предварительно деформированных заготовок [32, 38].

| Марка  | Температура деформации слитков, °С |           | Степень деформации слитков за один нагрев, % | Толщина заготовки, мм | Температура деформации слитков, °С |           | Степень деформации слитков за один нагрев, % |
|--------|------------------------------------|-----------|--|-----------------------|------------------------------------|-----------|--|
|        | Начала                             | Окончания |  |                       | Начала                             | Окончания |  |
| BT1-00 | 1050                               | 750       | 20-30  | Все толщины           | 950                                | 700       | ≥40  |
| BT1-0  | 1050                               | 750       | 20-30  | Тоже                  | 950                                | 700       | ≥40  |
| OT4-0  | 950-1050                           | 750       | 30-50  | Тоже                  | 950                                | 700       | 40-70  |
| OT4-1  | 950-1050                           | 750       | 30-50  | Тоже                  | 880-950                            | 750       | 40-70  |
| BT5-1  | 1180                               | 900       | 30-50  | Тоже                  | 1100                               | 850       | 40-70  |
| BT6C   | 1100                               | 850       | 30-70  | ≤100                  | 1000                               | 800       | 40-70  |
| BT6    | 1100                               | 850       | 30-70  | ≤100                  | 1000                               | 800       | 40-70  |
| BT3-1  | 1180                               | 850       | ≥40  | ≥100                  | 1080                               | 800       | 40-70  |
| BT9    | 1180                               | 900       | ≥40  | ≤100                  | 1100-1020                          | 900-850   | 40-50  |
| BT16   | 1150                               | 850       | 30-60  | ≥100                  | 1000                               | 750       | 40-70  |
| BT20   | 1180                               | 900       | 20-30  | ≤100                  | 1080                               | 900       | ≥40  |
| BT22   | 1180                               | 850       | 30-50  | ≥100                  | 1020                               | 800       | 40-70  |

#### 1.2.4. Особенности деформации титанового сплава ВТ6

Сплавы ВТ6 являются двухфазными титановыми, при обработке давлением которых существует оптимальный технологический диапазон. На основе которых возможно изготавливать разнообразные деформированные полуфабрикатов. Он хорошо сваривается всеми видами сварки при условии защиты расплавленного металла от взаимодействия с газами атмосферы и относительно сложно обрабатывается резанием из-за плохого отвода теплоты и налипания металла на инструмент. Сплав ВТ6 подвергается хорошей деформации в горячем состоянии, температура обработки в пределах 850-1100°C [39, 40].

Таблица 1.8. Горячая обработка давлением сплава ВТ6.

| Ковка обработки   | Температура деформации, °С |           | Степень деформации за один нагрев % | Условия охлаждения |
|---|----------------------------|-----------|-------------------------------------|--------------------|
|   | Начала                     | Окончания |                                     |                    |
| Ковка слитков   | 1100                       | 850       | 30-70                               | На воздухе         |
| Ковка предварительно деформированной заготовок толщиной (в мм): |                            |           |                                     |                    |
| До 100  | 1000                       | 800       | 40-70                               | Тоже               |
| Более 100   | 1080                       | 800       | 40-70                               | Тоже               |
| Штамповка на прессе   | ≤950                       | 750       | 40-70                               | Тоже               |
| Штамповка на молоте   | ≤970                       | 800       | 40-70                               | Тоже               |

Температура деформации и степень деформации за один нагрев при горячей обработке давлением сплава ВТ6 приведены в таблице 1.8 [41, 42].

Титановые сплавы типа ВТ6 деформируются крайне неравномерно и для получения однородной структуры и высоких механических свойств металл должен подвергаться большой общей деформации. Из литературных данных следует, что рациональная степень деформации в течение одного нагрева (или подогрева) при объемной штамповке составляет 40-50% при обработке в  $(\alpha+\beta)$  -области и 70% в  $\beta$ - области, соответственно. Исследования показали, что минимально необходимые степени  $(\alpha+\beta)$  -деформации составляет всего 5-10%, а в реальных заготовках с учетом неоднородности деформации 20-30%.

### 1.3. Способы производства прутковых полуфабрикатов из титанового сплава

#### 1.3.1. Продольная прокатка

Продольная прокатка является наиболее промышленно востребованным. С его помощью

изготавливается около 75% катаных прутков. Прутки, изготавливаемые этим способом, предназначены для последующего изготовления из них широчайшего ассортимента различных деталей путем механической обработки [43].

Особенности горячей прокатки сплавов, основанных на титановой основе, определяются требованиями к качеству прутков. В настоящее время в качестве серийных материалов для изготовления деталей из титановых сплавов применяют прутки диаметром 10–100 мм. Наибольшими высокими показателями по пластичности и усталостной прочности обладает заготовка, при горячей прокатке которой не менее 40-50% деформации осуществлено при температурах  $(\alpha+\beta)$  -состояния сплава. Обработка при таких температурах вызывает значительное увеличение сопротивления деформации, удельных давлений, перегрузку двигателей агрегатов [44]. Процесс прокатки осуществляется в две стадии:

- Предварительная прокатка при температуре выше  $\alpha+\beta \rightarrow \beta$ -превращения;
- Прокатка на годный размер при температурах двухфазного  $\alpha+\beta$  состояния сплава.

Прутки, полученные продольной прокаткой заготовок из  $(\alpha+\beta)$  -титановых сплавов имеют широкий диапазон диаметров (от 8 до 100 мм) с регламентированными структурами и механическими свойствами за счет температуры, при которой осуществляется деформация в  $(\alpha+\beta)$  -области, вытяжки за один проход в пределах 1,08-1,5.

### 1.3.2. Радиально-сдвиговая прокатка (РСП)

В последние годы было проведено многочисленное количество исследований структуры металла и сплавов с применением РСП в качестве эффективного метода деформации. При РСП осуществляется два механизма течения металла: в уменьшение поперечного сечения и вращательный поток металла. Для получения высокопрочных и пластических свойств в титановых прутках, обеспечиваемого формированием глобулярной структуры необходимы интенсивная пластическая деформация при температуре деформации  $(\alpha+\beta)$  -области. Одним из решений такой проблемы является использование процессов радиально-сдвиговой прокатки. РСП имеет ряд преимуществ перед другими процессами ОМД. Деформация методом РСП позволяет получить прутки с высокой геометрической точностью, в 2-5 раз выше требований к техническим условиям. Высокая точность обусловлена наличием на валках калибрующего участка, на котором каждый элемент поверхности раската многократно обрабатывается с плавно уменьшающимися частными обжатиями. По состоянию поверхности, геометрической точности, качеству структуры, механическим свойствам достигнутые показатели полученных титановых прутков методом РСП не уступает свойствам, обеспечиваемыми продольной прокаткой, ковкой или прессованием [45 - 47].

### 1.3.3. Ковка на радиально-ковочных машин (РКМ)

В качестве оборудования для ковки широко используется РКМ. Применение которых в производстве прутков увеличит производительность в результате высокой скорости деформации, низким расходам на производство, и эксплуатацию оборудования. РКМ позволяет производить кованые титановые прутки различных сечений от 30 мм до 450 мм в диаметре и до 3000 мм длиной [48]. Получение прутков из титановых сплавов методом РКМ осуществляется в горячем состоянии [49, 50]. Преимущества технологии радиальной ковки титана:

- Получение титановых поковок с минимальными припусками приближенных по форме к готовой детали при горячем формообразовании;
- Получение деталей из титана и его сплавов с чистовыми размерами и заданными механическими свойствами при холодном формообразовании;
- Высокий коэффициент использования материала;
- Высокая точность получаемого размера титановой поковки.

### 1.4. Оборудование для горячей объемной штамповки титановых сплавов

Горячая объемная штамповка является одним из методов, относящихся к применяемым технологиям для получения полуфабриков сложной формы из титановых сплавов.

Температурные режимы для горячей штамповки некоторых титановых сплавов на разных оборудованьях показаны в таблице 1.9 [35, 51].

Таблица 1.9 - Температурные режимы горячей штамповки титановых сплавов.

| Материал | Температура штамповки, °С |                     |                 |
|----------|---------------------------|---------------------|-----------------|
|          | Штамповка в прессах       | Штамповка в молотах | Штамповка в ГКМ |
| BT1-0    | 890–650                   | 920–700             | 890–650         |
| OT4-0    | 890–650                   | 950–700             | 890–650         |
| OT4-1    | 910–700                   | 950–750             | 910–700         |
| BT5-1    | 1020–850                  | 1100–900            | 1020–850        |
| BT5      | 1020–850                  | 1100–900            | 1020–850        |
| BT3-1    | 950–800                   | 980–850             | 950–800         |
| BT9      | 980–800                   | 1000–850            | 980–800         |
| BT15     | 920–700                   | 930–800             | 920–700         |
| BT18     | 1000–900                  | 1020–950            | 1000–900        |
| BT20     | 1000–850                  | 1020–900            | 1000–850        |
| BT22     | 850–750                   | 950–800             | 850–750         |
| BT23     | 870–750                   | 880–800             | 870–750         |

При которой в результате быстрого перепада температуры острых углов поковок приводит к возникновению брака разных типов, такие как закаты, заковы или плены. В связи с этим использование заготовки с закругленными углами рекомендуется для штамповки титановых сплавов. Чистота поверхности заготовок также уделяется большому вниманию.

В зависимости от рабочих инструментов штамповку титановых сплавов проводят на различных молотах, кривошипных прессах, горизонтально-ковочных машинах, гидравлических прессах и на специальных машинах. Изготовление одинаковых деталей возможно осуществляться одним или разными агрегатами, при этом приводит к значительному изменению точности и размеров штампуемых поковок.

#### 1.4.1. Штамповка на молотах

Одним из наибольших распространенных оборудований, применяемых в производстве штамповых поковок являются штамповочные молоты, разделяющихся на штамповку в одноручьевых и многоручьевых молотах. Одноручьевые штампы часто применяют для изготовления поковок простой конфигурации из стали и алюминиевых сплавов. Поскольку применение данного способа для штамповки деталей сложной формы с резким изменением сечений по длине является невозможным, поэтому для их изготовления рекомендуются использовать многоручьевые штампы [52, 53]. Практика штамповки изделий из материала на основе титана показала, что основные участки штамповок обладают однородной структурой с мелким зерном и удовлетворяют требованиям, предъявляемым к качеству деталей [54]. В ходе исследования механических свойств отрезанных образцов их штамповочных шатунового типа было замечено несущественное отличие от свойств исходных заготовок. Производственный опыт показывает, что при штамповке деталей из титановых сплавов нуждается целесообразное увеличение массы падающих частей молота на 30-40% по сравнению с требуемой для стальных штамповок в одинаковых условиях обработки. При штамповке на молотах многократные легкие удары приводит к уменьшению местного перегрева штамповок. При горячей деформации титановых сплавов штамповкой на молотах температура в средней части поковок формы выше на 100°C чем в периферийной зоне за счёт теплового эффекта деформации. И также замечается ухудшение по полученной структуре, пластичности, и выносливости в зонах затрудненной деформации. Помимо этого для того, чтобы обеспечивать образование альфированные слои на поверхности поковок и технологическую пластичность металла для деформации необходимо их перегреть.

#### 1.4.2. Штамповка на прессах

Применение кривошипных горячештамповочных на прессах (КГШП) встречается в производстве крупногабаритных штамповок сложной конфигурации крупносерийного масштаба. Основные особенности штамповки на прессах характеризуются тем, что металл течет продольно по направлению движения пуансона. Скорость деформация металла при штамповке на кривошипных прессах низка, за счет чего обеспечиваются благоприятные условия для деформации труднодеформируемых сплавов. По сравнению с вышесказанным методов, которые штамповка осуществляется в молотах КГШП имеет ряд преимуществ с низкой скоростью пуансона, жесткой характеристикой хода, возможностью выталкивания деталей из штампа и также непрерывным электроподогревом во время обработке, снижением опасности перегрева металла. Кроме этого, стойкость рабочих инструментов повышается в результате снижения удельного усилия [55].

Помимо кривошипных горячештамповочных на прессах широкое применение винтовых фрикционных на прессах для штамповки найдется в производстве мелкогабаритных поковок в одноручьевых штампах с толкателями. Применение данных оборудований для штамповки позволяет уберечь расход металла на 30%, за счет чего повышется коэффициент весовой точности в 1,5-2 раза, в итоге увеличивается производительность. Его возможно применять для изготовления штамповок разных материалов, в том числе сталей, медных, алюминиевых и титановых сплавов.

Распространенное применение гидравлических прессов находится в штамповке крупногабаритных поковок из стали, сплавов. Штамповка на гидравлических прессах позволяет осуществлять равномерную деформацию, увеличение пластичность титановых сплавов на 10-20%, и имеет большие припуски, выше на 50-70% чем в штамповке на горизонтально-ковочных машинах [56]. К преимуществу гидравлических прессов относится различная скорость движения рабочего инструмента, которая обеспечить гибкое усилие. Поэтому применение гидравлических ковочных на прессах, с рабочим усилием от 500 до 150000 кН, часто находится в свободной ковке заготовок различных видов.

#### 1.4.3. Штамповка на горизонтально - ковочных машинах

В производстве поковок различной конфигурации одним из самых высокопроизводительных и экономичных способов является горячая штамповка на горизонтально-ковочных машинах (ГКМ). ГКМ являются одними из разновидности кривошипных прессов, которые главный и зажимный ползуны перемещаются в горизонтальной плоскости. На ГКМ преимущественно изготавливают симметричные поковки в виде стержней с

одним или несколькими утолщениями (головками) различной формы и с отверстиями, полые поковки со сквозными или глухими отверстиями, фланцами и выступами. Можно штамповать и более сложные поковки с головками несимметричной формы, с боковыми выступами и т.п. Примерами простейших поковок могут служить поковки типа клапанов, втулок, колец, шестерен, фланцев [57]. К преимуществам штамповки на ГKM относятся высокая производительность, возможность штамповки без или с весьма незначительным заусенцем, возможность получать поковки типа колец без отходов на прошивку, хорошая макроструктура поковок и др. Ввиду высокой стоимости машины и оснастки целесообразно применять её лишь при крупносерийном производстве. Из-за склонности титановых сплавов к схватыванию уклоны для поковок следует принимать большими, чем для других сплавов. Если же необходимо получить утолщения с большим объёмом материала, то целесообразно применять высадку на ГKM или заменить высадку выдавливанием. Наиболее распространённая и характерная для ГМК операция - высадка. Электроконтактный нагрев обеспечивает высокую скорость нагрева. При изготовлении поковок методом высадки количество отходов уменьшается до 1-2%.

ГKM применяют не только для высадки и прошивки или комбинации этих операций, но и для изготовления полых заготовок сложной формы. Получение заготовок с глубокими полостями без облоя, с уменьшенными штамповочными уклонами делает перспективным применение ГМК для изготовления различной номенклатуры титановых заготовок разнообразной конфигурации. Для набора материала перспективно также применение электровысадочных машин, обеспечивающих набор значительного объёма за один переход [58].

#### 1.4.4. Смазка и схватывание

В горячей деформации титановые сплавы склонны к налипанию на поверхность инструмента. Деформация титановых сплавов, осуществляемая при температуре 900 °C сопровождается снижением коэффициента трения, которое может объясняться тем, что окалина и альфированный слой образуются при температуре выше аллотропического превращения [59]. В многочисленных проведенных исследованиях посвящены вопросы о металлических связях на поверхностных контактах между металлами в процессе их деформации было установлено, что отсутствие на поверхностях пленок приводит к схватыванию металла на них [60]. Схватывание металла возможно избежать с наличием масляных и других адсорбированных граничных плёнок, в том числе окисных и иных неметаллических пленок на поверхности контакта заготовки с инструментом. Кроме этого, для уменьшения схватывания применяются термическая и термохимическая обработка.

Подходящими средствами, применяемыми в качестве смазочных покрытий для титановых

сплавов, являются стеклянные смазки, свойства которых отлично в расплавленном состоянии [61, 62]. Избежание от насыщения газами и образования альфированного слоя при нагреве, устойчивость покрытий при деформирования штампами в несколько переходов возможно обеспечиваться путем правильного подбора состава стеклянной смазки.

Было замечено, что при обработке заготовок из титановых сплавов температур заготовок с покрытиями выше, чем заготовки, на которых отсутствуют смазочные покрытия до 100°C [63]. Кроме этого, защитные покрытия смазками позволяют снизить температуру инструмент и в результате чего увеличить стойкость штамповой оснастки на 20-30 %. Равномерность течения металла и уменьшение удельных усилий штамповки обеспечиваются температурной равномерностью нагрева заготовок на их поверхности и в серединной части. Распространенные материалы, применяемые для нанесения покрытий на заготовку при штамповке были перечислены в работах [64].

## **1.5. Водородная технология титановых сплавов**

### **1.5.1. Термоводородная обработка (ТВО)**

ТВО является основной операцией, во многом определяющей реализацию других направлений водородной технологии, а также создание новых сплавов с уникальными свойствами. ТВО может быть также самостоятельным технологическим процессом, позволяющим существенно повысить эксплуатационные свойства промышленных сплавов, в том числе титановые сплавы [65, 66]. Благодаря своим рядом преимуществ по полученным структурам, технологическим свойствам деталей, термоводородная обработка позволяет совершенствовать технологические процессы производства полуфабриков, основанных на титановых сплавах. Скорость насыщения водородом изделий из титановых сплавов меняется в прямой зависимости от температуры наводороживающего отжига, оптимальные значения которой приблизительно к 750-850 °С. При оптимальной температура наблюдается начальный этап насыщения водородом, с увеличением температуры снижается скорость за счёт увеличения равновесного водорода в деталях. А наоборот, при низких температурах диффузионное поглощение водорода титановым сплавом снижается. Вакуумный отжиг применяется в процессе обработки полуфабриков из титановых сплавов как заключительный этап, позволяет снизить содержание водорода до безопасных концентраций для избежания от водородной хрупкости в эксплуатации.

Температура вакуумного отжига находится в пределе между температурой растворения оксидной пленки, мешающей водорододиффузии к поверхности (550-600°C), и ниже Ac3, при которой происходит полиморфное превращение. Это связано с образованием β- превращенной



пластинчатой структуры в процессе охлаждения из  $\beta$ - области, которое снижает пластичность и сопротивление усталости [67]. Одним важнейшим параметром при термообработке, в частности вакуумном отжиге является время выдержки при температуре его проведения, определение которого в значительной степени зависит от исходной концентрации водорода, геометрических и габаритных параметров отжигаемого детали и т. д.

Применение ступенчатого вакуумного отжига или удаление водорода в потоке аргона позволяет избежать от неблагоприятных осложнений при обработке [68]. Вакуумный отжиг, применяемый после термоводородной обработки не только поможет снизить водородную концентрацию в титановых изделиях, но и влияет на образование структуры обрабатываемых полуфабрикатов. При этом, перераспределение легирующих элементов в сплавах не произойдет полностью и в результате чего образуются структуры, получение которых традиционными методами обработки является невозможным.

#### 1.5.2. Водородное пластифицирование

В основу водородного пластифицирования заложен принцип обратимого легирования титановых сплавов эффективным  $\beta$ -стабилизатором - водородом. Вследствие высокой диффузионной подвижности водород можно легко вводить в сплавы в заданных концентрациях, а затем удалять обезводоряживающим вакуумным отжигом во избежание проявления водородной хрупкости в готовых поковках.

Обработка давлением с использованием обратимого легирования водородом основана на водородном пластифицировании, включающем в себя снижение сопротивления пластической деформации и повышение критических степеней деформации до появления первых трещин. Эффективность водородного пластифицирования во многом зависит от фазового состава сплавов, количества и свойств  $\alpha$ - и  $\beta$ -фаз, динамических упрочняющих и разупрочняющих процессов. Для оценки фазового состава наводороженных сплавов при пластической деформации особую важность приобретают диаграммы фазового сплава в координатах температура-содержание водорода. Изменение фазового состава сплавов в результате наводороживания играет в этом случае определяющую роль в процессах, обуславливающих сопротивление деформации. Эффекты водородного пластифицирования во многом определяются перераспределением легирующих элементов между фазами, поскольку от состава фаз зависят их свойства, в том числе и их способность к деформации. Наконец, структурой и свойствами полуфабрикатов и деталей, полученных с использованием водородного пластифицирования, можно управлять регламентированными режимами охлаждения после деформации или дополнительной термоводородной обработкой [65].

Использование эффекта водородного пластифицирования позволяет снизить температуру горячей обработки жаропрочных титановых сплавов на 80-200°C, осуществлять их пластическую деформацию без разрушения при 700-800°C вместо 1000-1150°C, уменьшить деформирующие усилия. Было установлено, что введение в них водорода в количестве выше 0,1 масс. % приводит к заметному повышению пластичности и заметному снижению сопротивления горячей пластической деформации [69].

Применение водородного пластифицирования позволяет решить проблемы низкой технологической пластичности титановых сплавов, что приводит к снижению предела текучести, усилий и температур деформирования при горячей пластической деформации.

### 1.5.3. Механоводородная обработка

Благоприятное влияние легирования титановых сплавов водородом на их обрабатываемость резанием было обнаружено в работах [70]. Обнаруженные эффекты благоприятного влияния водорода на обрабатываемость титановых сплавов механической обработкой послужили основой одного из направлений водородной технологии - механоводородной обработки (МВО) титановых сплавов.

МВО включает в себя:

- наводороживание металла до определенных концентраций;
- собственно механическую обработку;
- вакуумный отжиг для снижения содержания водорода в металле до концентраций.

Для совершенствования технологии механической обработки титановых сплавов МВО технологию можно применить в двух направлениях:

- во-первых, титановые сплавы с грубой пластинчатой структурой обрабатываются резанием значительно труднее, чем при глобулярной мелкозернистой структуре. Поэтому обрабатываемость резанием сплавов с грубой пластинчатой структурой можно улучшить ТВО, преобразующей пластинчатую структуру в глобулярную.

- во-вторых, обрабатываемость титановых сплавов резанием можно улучшить, используя активное влияние водорода на свойства титановых сплавов, определяющие условия резания: отношение предела текучести к временному сопротивлению разрыву сплавов, прочность и твердость, теплопроводность, коэффициент трения в паре титановый сплав инструмент. В этом случае водород действует как активный участник процессов, происходящих непосредственно при механической обработке и определяющих такие параметры резания, как усилия резания, температура в зоне резания, износ инструмента. При строгой терминологии именно этот второй случай и составляет предмет механоводородной обработки.

В работе [71] были изложены закономерности, которые характерны для работ по установлению влияния водорода на обрабатываемость титановых сплавов резанием. К тому же после механической обработки наводороженного металла его можно подвергнуть ТВО с целью получения улучшенного комплекса механических свойств.

МВО может применяться как самостоятельный технологический прием или в сочетании с другими направлениями водородной технологии (водородным пластифицированием, термоводородной обработкой, компактоводородными процессами).

### **1.6. Применение компьютерное моделирования процессов деформации**

В настоящее время все большее распространение получает компьютерное моделирование, что позволяет значительно упростить и удешевить разработку и расчет различных технологических процессов, которые обычно требует многочисленных экспериментов, что дорого и занимает длительное время. Для решения сложных температурно-деформационных задач при обработке металлов далением разработались различные современные высокоэффективные программные приложения, и системы с высокой производительностью, которые служат для моделирования процессов проходящих при деформации материалов, и позволяют давать различные прогнозы при исследовании и также в производстве.

В тенденции общего развитии технологии, применение компьютерного моделирования, основанных на методе конечных элементов в процессах ОМД встречается все чаще. Процесс горячей штамповки, в частности не является исключением.

Компьютерное моделирование с использованием программы обеспечения дает ряд преимуществ, которые заключают в сокращении большого количества систематических исследований, увеличении эффективности исследования процессов, уменьшении капитальных расходов, и времени на производство экспериментальной оснастки, возможности углубленного изучения процесса, легкой оптиматизации процесса в любой благодаря способности быстрого варьирования различных технологических параметров, присутствию больших ресурсов библиотек стандартных моделей и материалов. Помимо этого, строгие требования, относящиеся к прочности, рентабельности, технологичности в производстве штамповых инструментов могут удовлетворяться с помощью компьютерных САПР, CAD/CAM/CAE систем проектирования, механической обработки. В связи с этим компьютерное моделирование играет важную роль в изучении и анализе процессов горячей штамповки, и также определении рациональных технологических параметров, режимов деформации, снижения времени и экономических затрат на эксперименты [72].

## 1.7. Биосовместимые материалы

Биосовместимость - способность материала встраиваться в организм пациента, не вызывая побочных клинических проявлений и индуцировать клеточный или тканевой ответ, необходимый для достижения оптимального терапевтического эффекта:

- не вызывать местной воспалительной реакции;
- не оказывать токсического и иммуногенного действия;
- не быть канцерогенным и генотоксичным;
- не провоцировать развития инфекции [73, 74].

Кроме необходимых функциональных, физико-химических и технологических свойств, биосовместимость с тканями и организмом применяемых материалов, назначенных в медицине должна быть полной.

Круг используемых материалов, выполняющихся требованиям биосовместимости в человеческом теле ограничен (рисунок 1.6).

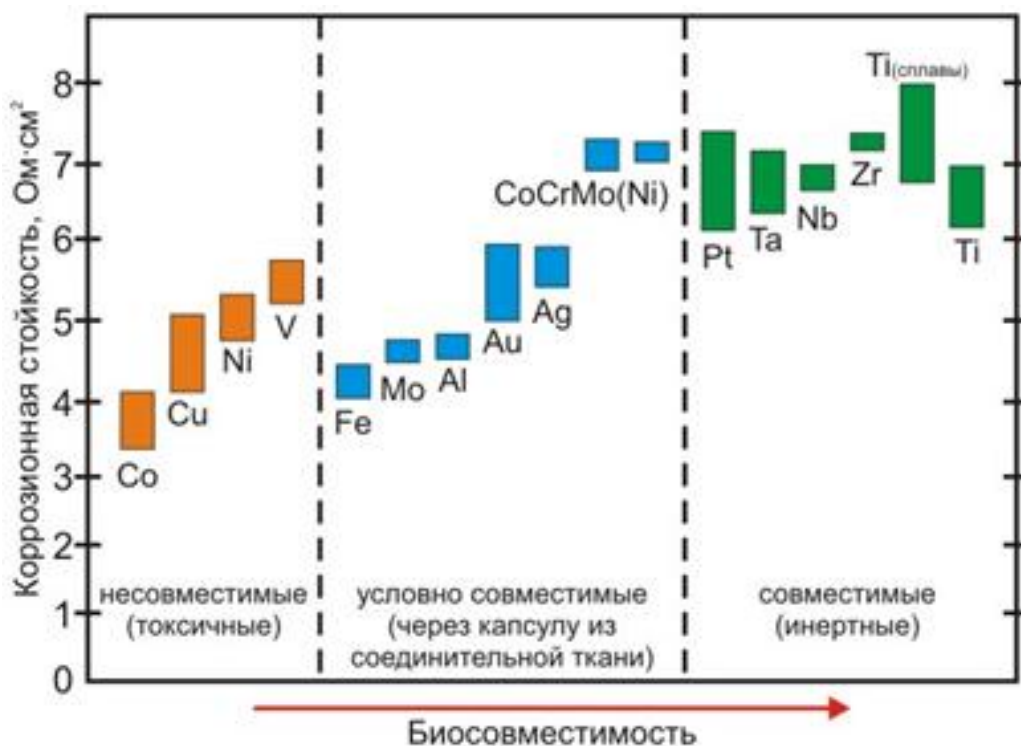


Рисунок 1.6 - Биологическая совместимость материалов.

Из всех имплантационных материалов титан и его сплавы имеют наиболее близкий к костной ткани модуль упругости и хорошую биосовместимость, поэтому они широко применяются в медицине. При этом ряд механических свойств титановых сплавов значительно превосходит другие материалы, широко применяемыми в медицине [75, 76]. Помимо всего

прочего титановые сплавы не вызывают свёртываемость крови. Таким образом, при выполнении требований механической совместимости, их ресурса работы титановые сплавы, в частности сплава ВТ6 применяют для изготовления изделий медицинского назначения: эндопротезов тазобедренного сустава [77].

## 1.8. Эндопротез тазобедренного сустава и существующие технологии его изготовления

### 1.8.1. Эндопротез тазобедренного сустава

Возможные разновидности эндопротезов представлены на рисунок 1.7.



Рисунок 1.7 - Разновидности эндопротезов.

Медицинское применение эндопротезов часто применяется для полного замещения пораженного тазобедренного сустава. Замена тазобедренного сустава часто выполняется хирургическим вмешательством. Процедура часто проводится для облегчения боли и улучшения, восстановления функциональности и подвижности терпевших пациентов.

К разновидностям эндопротезов тазобедренного сустава относятся тотальные, предназначенные для замены тазобедренного сустава полностью, и восстановления его функций, его применение значительно позволяет улучшить состояние пациентов; и

искусственный и частичные, замена сустава которыми является неполным.

Эксплуатационные характеристики эндопротезов в значительной степени определяются свойствами конструкционных материалов. Особую опасность представляют продукты износа эндопротезов. Их распространение по всей контактной поверхности кость - имплантат и последующая клеточная реакция на них приводит к нестабильности, как ножки, так и головки эндопротеза.

Эндопротезы тазобедренного сустава, согласно конструктивному выполнению, повторяют компоненты, а также геометрию природного биологического сустава. Ножки эндопротеза тазобедренного сустава претерпели наибольшие изменения, которые приводит к изменению их длины, формы, сечения, способа фиксации в бедренном канале, а также материалов (нержавеющая сталь, полимеры, комохром и титановые сплавы) [78, 79].

Ножки эндопротезов изготавливают с целью повторения формы канала бедра в виде конической, цилиндрической и клиновидной формы. Их поверхность была гладкой, матовой, шероховатой, ребристой, с резьбой и т.д. Оптимальная длина ножки, подобранная с учётом анатомических и хирургических аспектов в пределах 115-145 мм в зависимости от размера бедра [80, 81].

#### 1.8.2. Существующие технологии изготовления заготовок ножек эндопротезов

а) Технология фасонного литья: Технологического процесса производства ножек эндопротезов из технология фасонного литья состоял из следующих основных операций: Фасонное литье заготовок→Высокотемпературная газостатическая обработка→Входной контроль→Предварительная механическая обработка (пескоструйная)→Термическая обработка (отжиг) заготовок→Финишная механическая обработка поверхности (пескоструйная проксимальной части, полирование дистальной части)→Ионное азотирование → Контроль качества (приемо-сдаточные испытания).

Процессов фасонного литья, раскроя и механической обработки плит, а также выбора рациональных схем и режимов модифицирования поверхности ножек ионным азотированием с целью реализации высокого комплекса эксплуатационных свойств [82, 83].

б) Технология механической обработки из горячекатанной плиты: Технологического процесса производства ножек эндопротезов из горячекатанной плиты состоял из следующих основных операций: Вырезка заготовок из горячекатанной плиты→Термическая обработка (отжиг) заготовок→Входной контроль структуры и механических свойств→Предварительная

механическая обработка→Термоводородная обработка→Чистовая механическая обработка →  
Финишная механическая обработка поверхности (полирование)→Ионное азотирование→  
Контроль качества (приемо-сдаточные испытания).

Резка может осуществляться как в продольном, так и в поперечном направлениях. Возможна также резка с помощью гильотины в виде круглой, квадратной или угловой детали. Обрезка деталей на фрезерных станках применяется, как правило, при изготовлении небольших партий штамповок [84].

Приведенные результаты исследований показывают, что термоводородная обработка заготовок является основой, ядром комплексных технологий производства ножек бедренных компонентов эндопротезов тазобедренного сустава. Однако для эффективного использования разработанных схем и режимов ТВО в серийном производстве необходимо рассмотреть вопросы совершенствования и оптимизации технологических процессов получения самих заготовок ножек, подвергаемых ТВО.

## **1.9. Заключение по главе 1**

Обзор научно-технической литературы позволил проанализировать информации о титановых сплавах их свойствах, составе, структуре и областях применения, нагреву и деформации титановых сплавов, и способы производства прутковой заготовки, в том числе и сплавов типа ВТ6. Анализ научно-технической литературы по оборудованию и технологии для обработки давлением титановых сплавов. Анализ основных, существующих технологий изготовления заготовок эндопротезов. Анализ научно-технической литературы показывает, что одним из наибольших рациональных методов для эффективного производства эндопротезов тазобедренного сустава из титанового сплава ВТ6 для медицинского назначения может быть технология горячей объемной штамповки. На основании результатов литературного обзора сформулированы цели и задачи исследования, направленные на решение поставленных во введении целей.

## **Глава 2. Методика проведения исследований и исследуемые материалы**

В качестве основного метода исследования формообразования в процессе горячей объёмной штамповки был выбран метод компьютерного моделирования, позволяющий снизить затраты на производство. Для проверки достоверности результатов моделирования и снижения затрат на разработку инструмента проводилось физическое моделирование на модельном материале в лабораторных условиях.

Моделирование процесса формоизменения и течения сплава в процессе горячей объёмной штамповки осуществлено в среде DEFORM-3D, QFORM-3D, других прикладных программ, разработанных на основе метода конечных элементов [85, 86], с помощью которых возможно провести исследования деформационные характеристики в объеме трехмерной-модели. Как вышесказанно, с помощью подобных программы обеспечения откроются широкие возможности для исследования за счёт присутствия огромной базы данных различных материалов, их широкие диапазоны граничных и начальных условий.

В работе, проведено физическое моделирование горячей штамповки с использованием штампов и термопласта. Физическое моделирование с использованием технологической оснастки позволяет оценить особенности течения металла при горячей штамповке, полноту формообразовании поковки и правильность выбора объема заготовки, а также оценить результаты компьютерного моделирования этих параметров. При этом стоимость и время подготовки физического моделирования многократно меньше по сравнению с использованием металлической оснастки. Для обработки данных моделирования использовали прикладные программы, такие как Word, Excel, Adobe Photoshop, Graphics suite, Matlab и т.д.;

Последующим этапом для моделирования технологии горячей штамповки эндопротезов из титанового сплава ВТ6 был выбор формы заготовок. Выбор технологии производства заготовок и изучение возможности применения ТВО. Исследованы макро и микроструктуры заготовок до и после горячей деформации.

### **2.1. Исследуемые материалы**

#### **2.1.1. Исследуемые материалы для физического моделирования**

В качестве модельных материалов при физическом моделировании использовались: пластилин обыкновенный, пластилин легкий, глина каолиновая и термопласт [87]. По результатам исследований, ранее приведенных видно, что сходимость и аналогичность по реологическим свойствам между модельными материалами при комнатной температуре и двухфазными титановыми сплавами при горячем деформировании.



После первых же испытаний выявилось ряд недостатков у некоторых используемых материалов: Первый исследуемый материал - пластилин легкий, сильно прилипает к поверхности штампа во время прессования, что делает практически невозможным извлечение полученной поковки из штампа без сильной ее деформации. Даже при использовании смазки, легкий пластилин вызывает массу трудностей при извлечении из штампа. Вторым исследуемым материалом - каолиновая глина - на практике оказалась малопластичной, для того чтобы проводить прессование. После затвердевания на воздухе глина не стала менее хрупкой, а, наоборот стала крошиться еще сильнее, что заметно усложнило изучение и снятие геометрических размеров полученной поковки.

В результате экспериментальных исследований показано, что наиболее подходящим материалом для физического моделирования является термопласт - материал, затвердевающий после тепловой обработки, и позволяющий легко извлечь поковку из штампа. В качестве модельного материала при физическом моделировании использовалась термопласт - отверждаемый пластилин фирмы ООО «Артефакт» (ТУ-2389-001-54236012-2000) [88]. Особенность этого пластилина в том, что после выдержки слепка в сушильном шкафу при температуре 100-130°C в течение 10-25 минут (в зависимости от размеров) он принимает твердость пластика. После такой обработки слепок можно брать в руки и снимать геометрические размеры, не боясь испортить поверхность модели. По итогам полученной информации нами было принято решение использовать термопласт [89].

Форма и размеры заготовок, используемые в физическом моделировании, были выбраны на основе результатов компьютерного моделирования, с учетом выявленных недостатков. Свойства модельного материала представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.1 - Свойства модельного материала.

| Материал   | Состав                      | Температура затвердевания, °С | Время выдержки, с | Нормативный документ      |
|------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------|---------------------------|
| Термопласт | Глина, воск, церезин, масло | 100-130                       | 600-1500          | ТУ-2389-001-54236012-2000 |

МДФ (Medium Density Fiberboard) - древесноволокнистая плита средней плотности. Изготавливаются плиты МДФ путём горячего прессования мелкодисперсной древесной массы, смешанной со связующим веществом. При нагревании древесины плавится лигнин, содержащийся в древесных волокнах, именно он и становится связующим веществом. По механическим характеристикам плиты МДФ превосходят натуральное дерево, притом, что стоимость их по сравнению с древесиной ниже на 60%.

По физико-механическим свойствам цельно прессованные плиты МДФ соответствуют данным в таблице 2.2.

Таблица 2.2 - Технические характеристики МДФ.

| Наименование показателя                  | Нормы для плит МДФ |
|--|--------------------|
| Плотность, кг/м <sup>3</sup>             | 800 - 950          |
| Прочность при изгибе, МПа                | 20 - 37            |
| Прочность на разрыв, МПа                 | 0,8 - 1,2          |
| Модуль упругости, МПа                    | 2200               |
| Разбухание по толщине плиты, %           | 9 - 20             |
| Сопротивление выдергиванию шурупов, Н/мм | 49 - 79            |

#### 2.1.2. Исследуемые материалы для горячей деформации

Таблица 2.3 - Химический состав сплава ВТ6 (% массе) по ГОСТ 19807-91 и по результатам анализа образцов.

| Марка сплава        | Легирующие элементы |         | Примеси |       |      |       |       |       |       | Сумма прочих |
|---------------------|---------------------|---------|---------|-------|------|-------|-------|-------|-------|--------------|
|                     | AL                  | V       | Fe      | Si    | Zr   | O     | C     | N     | H     |              |
| ВТ6                 | 5.3-6.8             | 3.5-5.3 | 0,30    | 0,10  | 0,3  | 0,20  | 0,10  | 0,05  | 0,015 | 0,3          |
| РСП                 | 6,2                 | 5,0     | 0,17    | 0,07  | 0,13 | 0,159 | 0,011 | 0,003 | 0,06  | 0,23         |
| Продольная прокатка | 6,5                 | 5,2     | 0,16    | 0,016 | 0,01 | 0,166 | 0,009 | 0,002 | 0,003 | 0,2          |
| Кованный            | 6,1                 | 4,9     | 0,18    | 0,06  | 0,11 | 0,17  | 0,01  | 0,003 | 0,008 | 0,21         |

Анализируя образцов, полученные результаты по химическим составам приведены в таблице 2.3. Работа посвящена горячей штамповке заготовок эндопротеза, который изготавливается из сплава ВТ6, использование которого в ортопедии и травматологии связано с хорошей биосовместимостью металла, низким модулем упругости и плотностью, а так же высокой удельной прочностью. В данной работе для исследования в качестве исходной заготовок использованы полуфабрикаты на основе титанового сплава ВТ6, полученные различными

методами: РСП, продольной прокатки, ротационной ковкой [90-93].

По результатам анализа химического состава образцов, видно, что содержания элементов в составе похожи и их химический состав соответствует титановому сплаву ВТ6.

Механические свойства прутков ВТ6 при комнатной температуре, которые определяются на вырезанных образцах в разных направлениях приведены в таблице 2.4 по различным Российским стандартам в продольном и поперечном направлениях испытаний.

Таблица 2.4 - Механические свойства прутков ВТ6.

| Нормативные документы | Направления испытываемых образцов | Диаметр прутка, мм | Временное сопротивление, МПа (кгс/мм <sup>2</sup> ) | Относительное удлинение, % | Относительное сужение, % | Ударная вязкость КСУ, Дж/см <sup>2</sup> |
|-----------------------|-----------------------------------|--------------------|---|----------------------------|--------------------------|--|
| ОСТ1 90006-86 [90]    | Продольное                        | 10 - 12            | 885 (90)  | 8                          | 20                       | -  |
|                       |                                   | 12 - 100           | 885 (90)  | 8                          | 20                       | 25 (2,5)                                 |
| ГОСТ 26492-85 [92]    | Продольное                        | 10 - 12            | 905-1050 (92-107)                                   | 10                         | 30                       | 40 (4)                                   |
|                       |                                   | 12 - 60            | 905-1050 (92-107)                                   | 10                         | 30                       | 30 (3)                                   |
| ГОСТ 26492-85         | Поперечное                        |                    |   | -20%*                      | -20%*                    |  |
| ОСТ1 90266-86 [93]    | Продольное                        | 65 - 80            | 1080 (110)  | 6                          | 20                       | 25 (2,5)                                 |
|                       |                                   | 90 - 150           |   |                            |                          |  |
| ОСТ1 90266-86 [93]    | Поперечное                        |                    |   | -20%*                      | -20%*                    |  |

\* По отношению к свойствам образцов, вырезанных в продольном направлении

## 2.2. Оборудование и методика исследовательских работ

### 2.2.1. Методика математического моделирования

Схема алгоритма компьютерного моделирования приведена на рисунок 2.1.



Рисунок 2.1 - Схема алгоритма компьютерного моделирования.

Для проектирования штамповой оснастки, выбора исходной заготовки и определения энергосиловых параметров, интенсивности деформаций и температурно-скоростных условий процесса штамповки использовался метод компьютерного моделирования процессов ОМД. Этот метод основан на разбиении сплошной среды на конечные элементы и расчёте процессов

формоизменения деформируемой заготовки уравнениями механики сплошных сред и теории пластического течения.

Постановка задачи для компьютерного моделирования базируется на геометрических размерах рабочих инструментов и заготовок. Свойства моделируемого материала были экспортированы из базы данных используемой программы для проведения моделирования процессов.

## 2.2.2. Оборудование и оснастки для физического моделирования

Оборудование для физического моделирования представлен на рисунок 2.2.



Рисунок 2.2 - Машина ZD 10/90.

Моделирование штамповки производилась на испытательной машине ZD 10/90, установленной на кафедре ОМД МИСиС.

Скорость движения верхней части штампа 10 мм/с, такая же, как и при компьютерном моделировании. В процессе штамповки в некоторых случаях машину останавливали и осматривали штамп на предмет равномерного сближения двух половинок оснастки, изгиба и

поведения смазки на начальных этапах моделирования. Технические характеристики машины для испытаний на растяжение-сжатие ZD 10/90 для проведения испытаний на растяжение - сжатие - изгиб на материалах и конструкционных деталях с максимальным усилием 10 МПа; скорость хода 0-10 мм/с, максимальная высота рабочей зоны 300 мм.

Оснастка для физического моделирования была изготовлена по трёхмерным моделям штамповых вставок, которые были использованы на стадии компьютерного моделирования. Вырезка штампов для физического моделирования производилась на фрезерно-гравировальной машине с числовым программным управлением (ЧПУ). В качестве материала штамповых вставок для физического моделирования штамповки были выбраны плиты МДФ толщиной 15 мм;

### 2.2.3. Методы и оборудования для исследования микроструктуры

При исследовании эволюции структуры заготовок эндопротезов полученных различными методами, а также образцов, вырезанных из полученных до и после горячей штамповки изделий для металлографии, использовалось различное оборудование.

К этапам изготовления и подготовки образцов для металлографических анализов относятся вырезка образца на отрезном станке; далее шлифовка и полировка отрезанных образцов, и их травление химическими растворами для выявления микроструктуры при рассмотрении на микроскопе.

Резка образцов ВТ6 проводилась на станке Brilliant 250 (рисунок 2.3), предназначенный для влажной резки образцов с максимальным диаметром 110 мм.

Шлифовка отрезанных образцов осуществлялась на шлифовально-полировальной машине SAPHIR 360, которая представляет собой двухдисковый с диаметром 200 -300 мм, представленной на рисунок 2.4.

Образцы подвергались шлифовкой с использованием шкур, зернистость которых от P320 до P2400 по порядку (рисунок 2.5). Наличие присутствующих дефектов, такие как поры и трещины, нематаллическиз включений могут изучены при рассмотрении нетравленного шлифа. Но для выявления микро и макроструктуры нужно их потравить химическими растворами. В данной работе в качестве химического травителя использован раствор  $1\text{HF}:3\text{HNO}_3:6\text{H}_2\text{O}_2$  (рисунок 2.6). Структурый анализ проведен в микроскопе Versamet-2 7452 (рисунок 2.7), который предназначен для исследования микроструктуры металлов и сплавов.



Рисунок 2.3 - Отрезной станок  
BRILLANT 250.



Рисунок 2.4 - Шлифовально-полировальная  
машина SAPHIR 360.



Рисунок 2.5 - Шлифовальные шкурки.

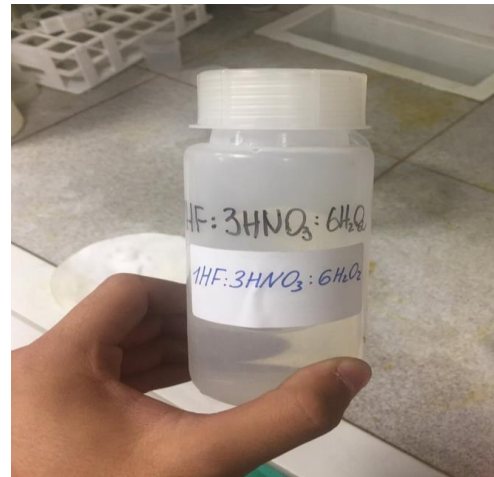


Рисунок 2.6 - Раствор  
 $1\text{HF}:3\text{HNO}_3:6\text{H}_2\text{O}_2$



Рисунок 2.7 - Металлографический микроскоп Versamet -2 7452.



#### 2.2.4. Оборудования и оснастки для термоводородная обработка

Насыщение образцов водородом проводили в установке Сивертса (рисунок 2.8) до концентраций водорода 0,45-0,5% при температуре 850°C, с длительностью выдержки  $\tau_b = 1$  час.

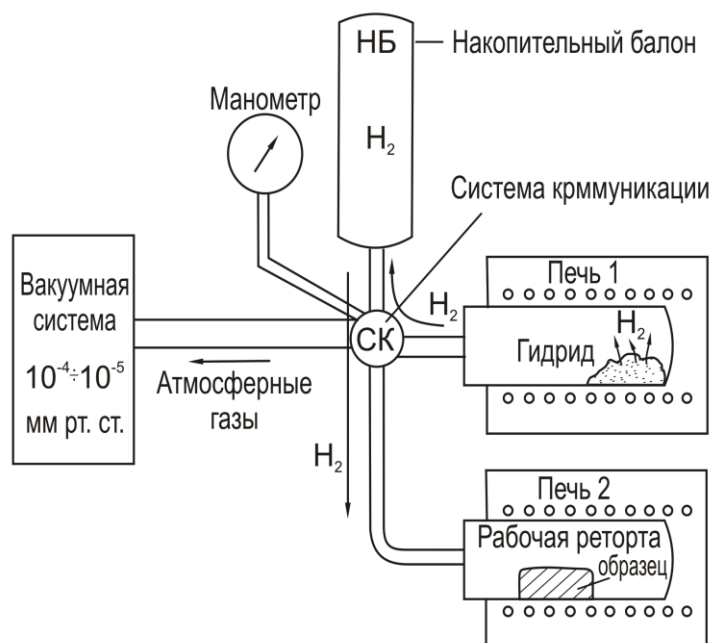


Рисунок 2.8 - Схема вакуумно-водородной печи.

Схема работы установки Сивертса представлена на рисунке 2.8. Работа данной установки основана на разложении при высокой температуре порошка гидрида титана в вакуумной реторте, выделившийся из неё молекулярный водород собирается в баллон до достижения давления, определяемого требуемой концентрацией в образцах.

Для осуществления отжига в вакуумном пространстве, необходимо вакуумировать камеру с образцами до допустимого давления ( $5 \cdot 10^{-5}$  мм.рт. ст.). С использованием ртутного манометра можно непосредственно контролировать процесс поглощения водорода исследуемыми образцами при отжиге. Завершение процесса сорбции водорода возможно оценить установкой давления в замкнутой системе и контролем изменения массы рассматриваемых образцов, используя точные электронные весы A&D HR - 150 AG в лабораторных условиях. После чего, как образцами поглощается заданное количество водорода, они направлены к охлаждению вентилятором на воздухе. Охлаждение образцов проводится со скоростью 1 К/с, на потоке воздуха, обеспечиваемом вентилятором реторты. Конечную концентрацию водорода в детали можно рассчитывать таким образом:

$$C_K = \frac{m_{обр.}^{конечная} - m_{обр.}^{начальная}}{m_{обр.}^{конечная}} \times 100\%, \quad (2.1)$$

где:

$C_K$  - Доля конечной концентрации водорода по массе, [масс. %];

$m_{обр.}^{конечная}$  - масса рассматриваемого образца после проведенного наводороживающего отжига.

$m_{обр.}^{начальная}$  - масса рассматриваемого образца до осуществления наводороживания;

Отжиг рассматриваемых изделий проведен во вакуумной среде с использованием нагреваемой печи модели «ВЕГА-3М» [94]. Длительность выдержки в печи устанавливается таким образом, чтобы водородная концентрация в процессе дегазации снизилось до безопасной величины ( $\leq 0,006\%$ ).

Концентрация водорода, содержащегося после вакуумного отжига определялось с использованием спектрального метода на спектрографе ИСП-51 с электронной аналитической приставкой МОРС-1/2048/РС1 и специализированного программного приложения.

### 2.2.5. Оборудование и оснастки для горячей штамповки



Рисунок 2.9 - Электроэрозионный станок AGIETRON 100C.

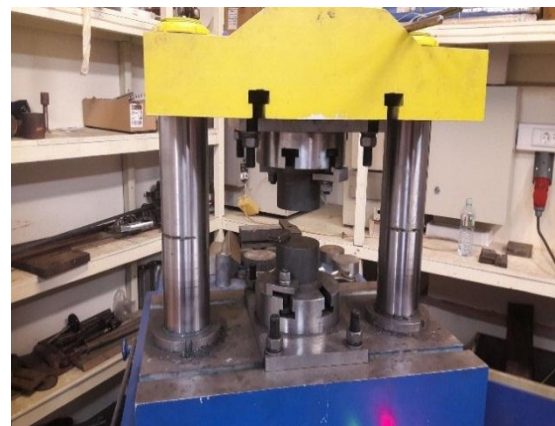


Рисунок 2.10 - Вертикальный гидравлический пресс «ПВ-100».



Рисунок 2.11 - Нагревательная печь СНОЛ 4.



Рисунок 2.12 - Молот ковочный арочного типа М1345.

Штамповую вставку изготовили с использованием электроэрозионного станка AGIETRON 100С представлен на рисунок 2.9 и далее гравюру штампа доводили с использованием ручного инструмента.

Проводилась горячая осадка образцов из прутков ВТ6 с целью осуществлять моделирование процесса штамповки, полученных по различным технологиям. Для осадки образцов использовали вертикальный гидравлический пресс «ПВ-100» (рисунок 2.10). Осадка образца, проходила с одного нагрева. Нагрев образцов до температуры 950°С, проводился с помощью нагревательной печи СНОЛ 4 (рисунок 2.11).

Изготовление опытной партии эндопротезов осуществляли на паровоздушном ковочном молоте двойного действия (арочного типа) М1345 представлен на рисунок 2.12. Масса удара (Номинальный вес падающих частей) 3150 кг, Энергия удара 80 кДж, Масса молота с шаботом 70700 кг.

## Глава 3. Компьютерное моделирование процесса штамповки эндопротезов

### 3.1. Выбор схемы штамповки

Современные компьютерные технологии позволяют полностью воспроизвести процесс горячей штамповки, начиная с нагрева заготовки и укладки её в штамп до обрезки обля и термообработки. На основе чертежа типового эндопротеза «Эльза», был разработан чертёж поковки, который представлен на рисунок 3.1.

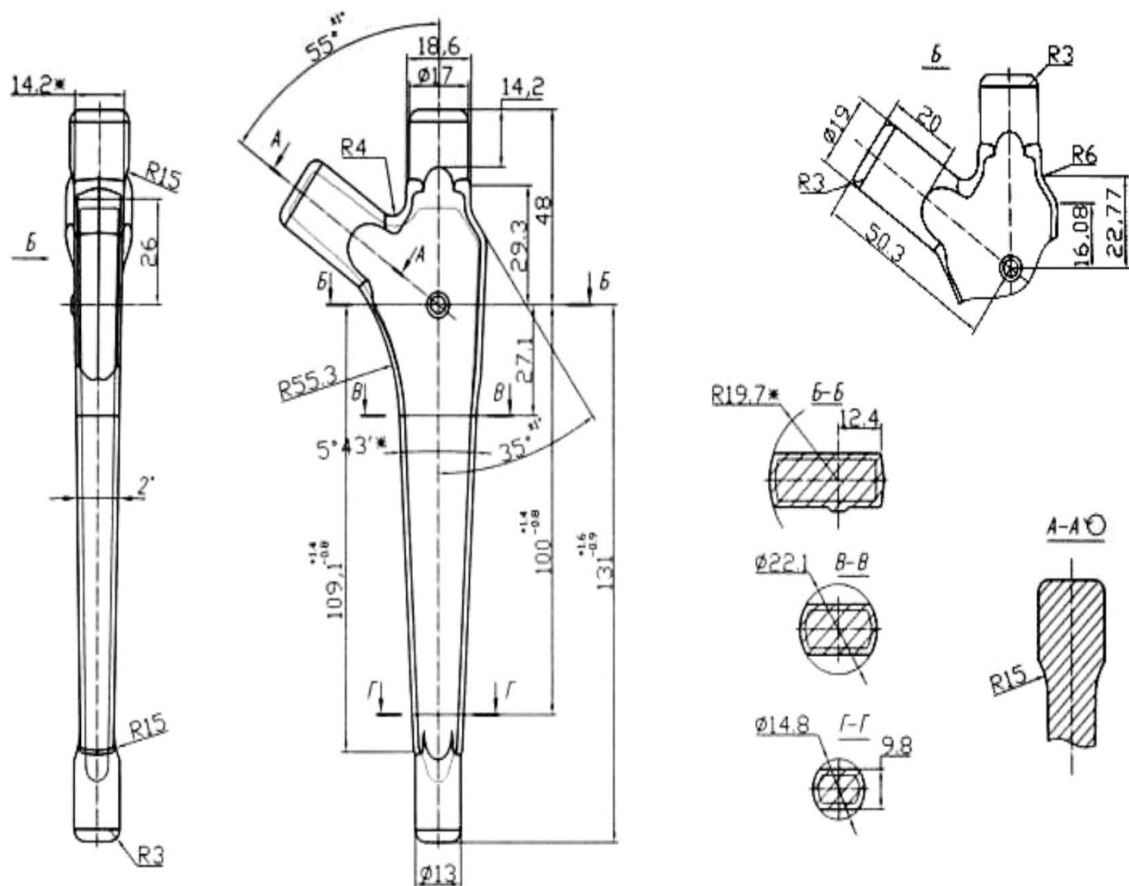


Рисунок 3.1 - Чертеж поковки эндопротеза «Эльза»

Для проектирования заготовки и штампов применялась система твердотельного параметрического моделирования программа SolidWorks 2014, т.к. в данной программе существует:

- Возможность получения 3D модели;
- Возможность изготовления чертежа, удовлетворяющего условиям ГОСТ 2.109-73 [95].
- Возможность дальнейшего использования 3D модели в качестве исходной при моделировании и математическом расчете в среде Qform 3D, Deform 3D.

В начале отдельно создается каждый компонент установки, согласно заданным

размерам, и сохраняется в файл детали. После создаётся файл сборки, в котором собирается окончательная модель, из всех импортируемых сохраненных ранее деталей.

Таким образом, изменения, вносимые в геометрию модели в системе проектирования, сразу же отображаются на импортированной модели, при этом автоматически обновляются и элементы сборки. Это позволяет сэкономить время в случае, если при проектировании в модели сборки возникли геометрические недочеты, которые требуют отладки. По чертежу поковки, при помощи программы SolidWorks, была построена компьютерная модель эндопротеза и различные исходные заготовки представлен на рисунок 3.2.

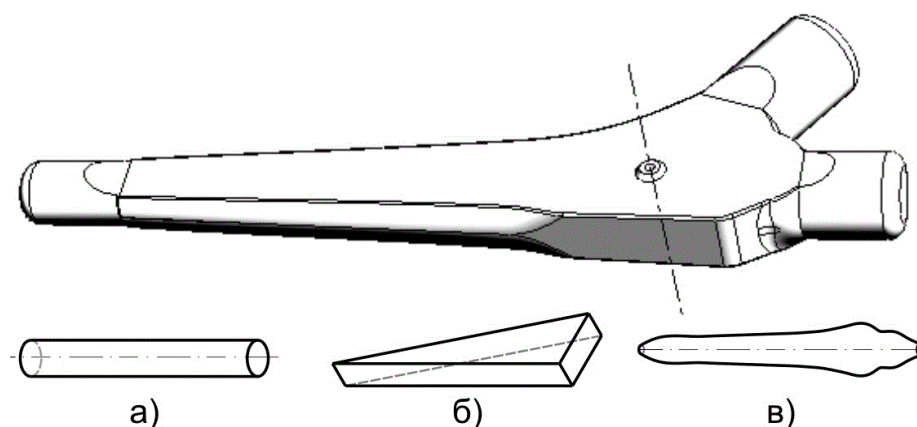


Рисунок 3.2 - Компьютерная модель эндопротеза и различные исходные заготовки.

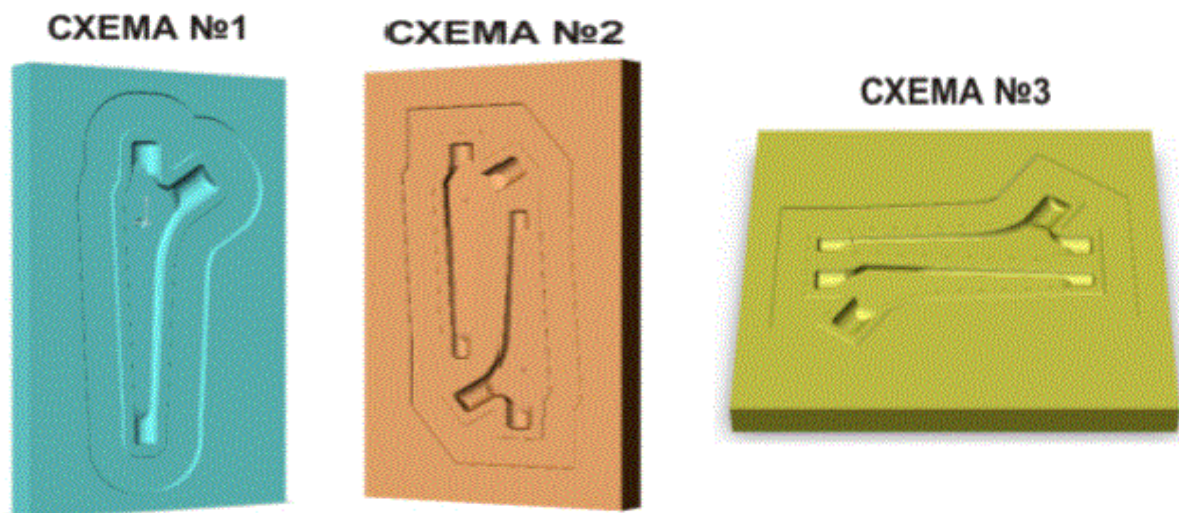


Рисунок 3.3 - Трёхмерные модели вкладышей штамповых вставок (Схема №1 - единичная, схема №2 - спаренная с внутренним расположением бобышек, схема №3 - спаренная с внешним расположением бобышек).

На основе компьютерной модели было выбрано три схемы штамповки: единичная, спаренная с внутренним расположением бобышек и спаренная с внешним расположением бобышек. Для этих схем были построены трёхмерные модели вкладышей штамповых вставок, которые представлено на рисунке 3.3.

### 3.2. Определение коэффициента трения

Для определения коэффициента трения применяется осадка.

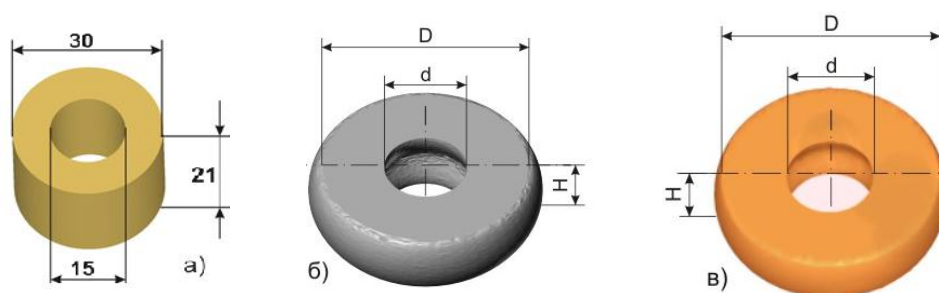


Рисунок 3.4 - Заготовка для определения коэффициента трения.

- а) исходная заготовка.
- б) заготовка после компьютерного моделирования.
- в) заготовка после физического моделирования.

Для проведения эксперимента по физическому моделированию штамповки эндопротеза необходимо было подобрать смазку так, чтобы коэффициент трения был максимально приближен к тому, который использовался при компьютерном моделировании ( $\mu = 0,15$ ). С помощью компьютерного моделирования был определен коэффициент трения при физическом моделировании, как с применением смазки, так и без нее. Для определения коэффициента трения использовался метод осадки колец [96]. Предварительно на компьютере была смоделирована свободная осадка колец с размерами, указанными на рисунок 3.4 с разными коэффициентами трения ( $\mu = 0,1 \div 0,6$ ).

Осадки колец производили на испытательной машине. С полученных в итоге осажённых колец снимались геометрические размеры и строилась кривая зависимости внешнего и внутреннего диаметров от коэффициента трения. При моделировании использовались реологические параметры пластилина, полученные в работе [97].

После чего были изготовлены образцы аналогичного кольца из пластилина и осажены на обратной стороне штамповых вставок с различными видами смазок, а так же без смазки.

Таблица 3.1 - Геометрические замеры образцов после осадки.

| Коэффициент трения $\mu$          | Геометрические размеры образцов, мм<br>(См. Рисунок 3.5) |      |    |
|-----------------------------------|--|------|----|
|                                   | D  | d    | H  |
| Компьютерное моделирование        |  |      |    |
| 0                                 | 41,4   | 20,6 | 11 |
| 0,1                               | 39,9   | 18,3 | 11 |
| 0,2                               | 38,6   | 16,3 | 11 |
| 0,3                               | 37,5   | 15,0 | 11 |
| 0,4                               | 36,7   | 14,5 | 11 |
| 0,5                               | 35,9   | 14,3 | 11 |
| 0,6                               | 35,2   | 14,1 | 11 |
| Физическое моделирование          |  |      |    |
| Без смазки                        | 37,5   | 14,0 | 11 |
| Трансмиссионное масло<br>«Лукойл» | 39,0   | 16,5 | 11 |

Результаты геометрических замеров образцов после компьютерного и физического моделирования занесены в таблице 3.1. По полученным в результате компьютерного моделирования данным был построен график изменения геометрических размеров кольца (внешнего и внутреннего диаметров) в зависимости от коэффициента трения. Снятые геометрические параметры с пластилиновых образцов были нанесены на кривые изменения геометрических размеров компьютерных моделей и спроецированы на ось значений коэффициентов трения. Результаты определения коэффициентов трения при штамповке с маслом и без смазки показаны на рисунок 3.5.

Наиболее приемлемые результаты трения показала смазка из отработанного трансмиссионного масла «Лукойл», содержащего частицы металла (20W-50), которая и была в дальнейшем использована при реализации физического эксперимента [98]. Во время физического моделирования, эта смазка наносилась равномерным слоем на поверхность заготовки и штампа, после чего заготовка прессовалась на испытательной машине, таким образом, нами был смоделирован процесс штамповки поковки эндопротеза с использованием смазки. Для проверки достоверности результатов моделирования и снижения затрат на разработку инструмента проводилось физическое моделирование на модельном материале в лабораторных условиях, на кафедре ОМД МИСиС.

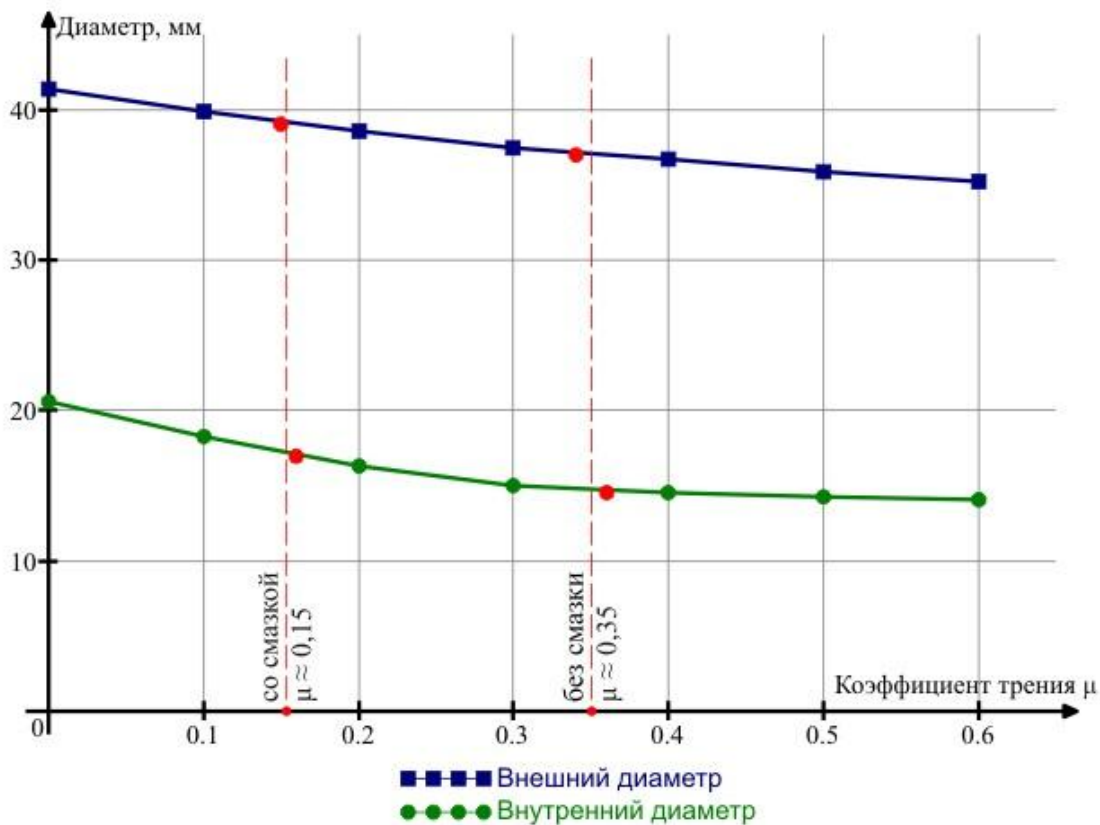


Рисунок 3.5 - График зависимости внешнего и внутреннего диаметров кольца от коэффициента трения.

Моделирование проводили при помощи вычислительной системы на основе конечных элементов. Полученные результаты послужили основанием для разработки рекомендаций по изготовлению штамповых вставок из МДФ для физического моделирования процесса с использованием модельных материалов [99].

### 3.3. Выбор формы, типа и размеров заготовок

Для моделирования штамповки был выбран эндопротез «Эльза» с наиболее востребованным типоразмером: длиной 179 мм и массой 200 грамм. На основе чертежа существующей детали по отраслевому стандарту [100] был разработан чертёж поковки, который использовали для построения трёхмерной модели и проектирования штамповой оснастки. Особенность поковки эндопротеза заключается в том, что она является симметричной относительно плоскости, параллельной линии обля. Поэтому выбор заготовки для данного процесса представлял некоторые трудности. Совершенно очевидно, что использование схемы штамповки с симметричным расположением двух поковок решило бы



проблему равномерного заполнения гравюры штампа при штамповке эндопротеза, но небольшое число годовой партии необходимых изделий, ограниченное усилие оборудования для штамповки и стремление к уменьшению отходов на облой вынудило искать другие пути решения проблемы.

Типы и размеры заготовок для моделирования штамповки эндопротеза подбирались исходя из объёма поковки, геометрических размеров гравюры штампа, и доступным ассортиментом заготовок из выбранного титанового сплава ВТ6. После анализа рынка сбыта металлов и возможностей заготовительного производства [101] для каждой схемы штамповки было выбрано три вида исходных заготовок: 1-из прутка; 2-из плиты; 3- профилированные заготовки.

Первый тип заготовок дешевле из-за простой схемы подготовительных операций по разделке прутка на мерные длины. Но ввиду сложной конфигурации поковки с боковым бобышком необходимо более полное закрывание гравюры исходной заготовкой, в связи, с чем в рассмотрение были включены заготовки, вырезаемые из плит.

Из плиты заготовка вырезалась в форме треугольника. Таким образом, из одного прямоугольника получались две заготовки, обеспечивая более «экономный» раскрой, нежели при фигурной резке по контуру облойной канавки.

Профилированные заготовки предположительно имеют лучшие характеристики по заполнению гравюры, поэтому данный тип заготовок было решено так же включить в процесс моделирования штамповки, в том числе и как запасной вариант в случае неудовлетворительном результатов при деформации заготовок первых двух типов.

Размеры цилиндрических заготовок определяли исходя из объёма поковки и длины гравюры штампа. Объём заготовки и поковки принимали одинаковыми. После выбора длины заготовки, обеспечивающей лучшее удержание в гравюре штампа, определяли диаметр прутка: Размеры заготовок из плит определяли исходя из объёма поковки, а также длины и ширины гравюры штампа. Выбрав рациональную длину и ширину заготовки, обеспечивающие удобное расположение в гравюре штампа, определялась высота заготовки по объёму поковки. После выбора длины заготовки, обеспечивающей лучшее удержание в гравюре штампа, диаметр прутка определялся по формуле:

$$D = \sqrt{\frac{4V_n}{\pi \cdot L_{gp}}} \quad (3.1)$$

где:  $V_n$  - объём поковки, мм<sup>3</sup>;

$L_{gp}$  - рациональная длина заготовки в гравюре штампа выбранной схемы штамповки, мм.

Размеры заготовок из плит определяли исходя из объёма поковки, а также длины и ширины гравюры штампа. Выбрав рациональную длину и ширину заготовки, обеспечивающие удобное расположение в гравюре штампа, определялась высота заготовки по формуле:

$$H = \frac{V_n}{B_{гр} \cdot L_{гр}} \quad (3.2)$$

где:  $V_n$  - объём поковки, мм<sup>3</sup>;

$B_{гр}$  - рациональная ширина заготовки в гравюре штампа выбранной схемы штамповки, мм;

$L_{гр}$  - рациональная длина заготовки в гравюре штампа выбранной схемы штамповки, мм.

Определение формы и размера профилированной заготовки проводили методом сечений диаметров:

1) Модель поковки с 50% заполнением облойной канавки рассекалась плоскостями с равным интервалом (на 20 отрезков) представлен на рисунок 3.6.

2) Определялась площадь каждого полученного сечения поковки;

3) Площадь сечения приравнивалась к площади круга, и находился приведённый диаметр будущего сечения профилированной заготовки;

4) По полученным диаметрам строилась компьютерная модель профилированной заготовки.

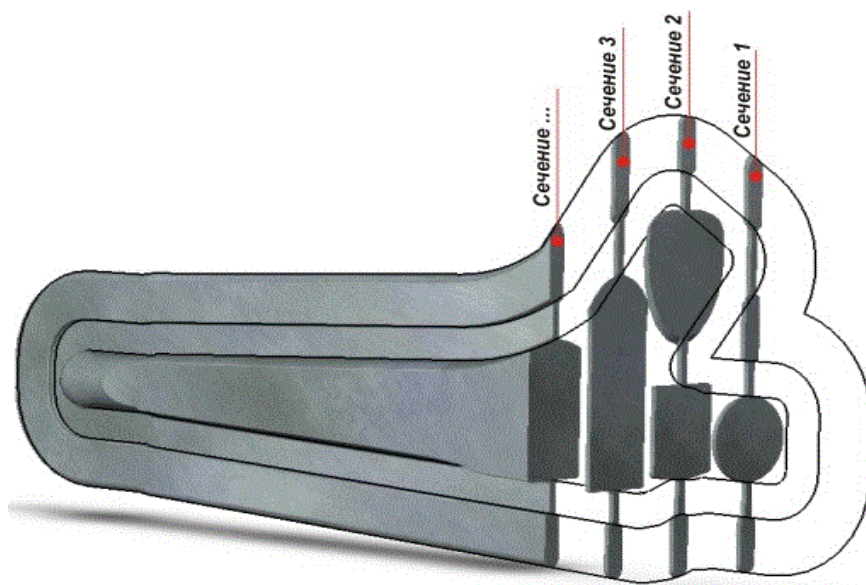


Рисунок 3.6 - Примеры секущих плоскостей модели поковки с 50 %-м заполнением облойной канавки.

Типовой пример построения профилированной заготовки для одинарной схемы штамповки представлен на рисунок 3.7 - 3.9, а на рисунок 3.10 изображены различные варианты заготовок для каждой схемы штамповки с размерами.

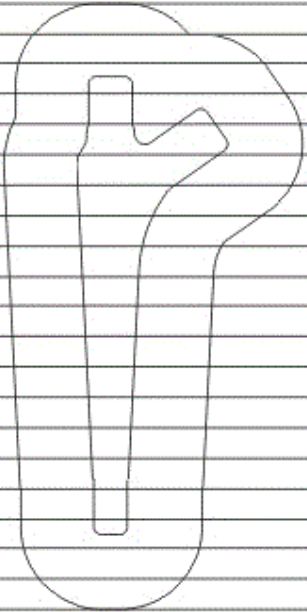
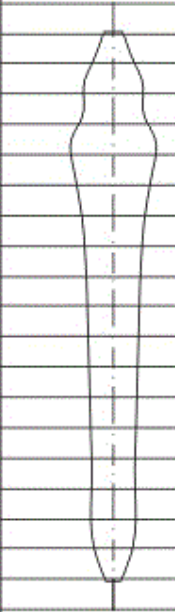
| L, мм  | Поковка  | S, мм  | R, мм | Заготовка  |
|--------|--|--------|-------|--|
| 0      |  | 38,5   | 3,5   |  |
| 10,75  |  | 165,9  | 7,3   |  |
| 21,5   |  | 415,37 | 11,5  |  |
| 32,25  |  | 428,52 | 11,7  |  |
| 43     |  | 840,74 | 16,4  |  |
| 53,75  |  | 747,54 | 15,4  |  |
| 64,5   |  | 562,16 | 13,4  |  |
| 75,25  |  | 438,95 | 11,8  |  |
| 86     |  | 377,81 | 11,0  |  |
| 96,75  |  | 342,68 | 10,4  |  |
| 107,5  |  | 320,37 | 10,1  |  |
| 118,25 |  | 300,29 | 9,8   |  |
| 129    |  | 281,97 | 9,5   |  |
| 139,75 |  | 264,93 | 9,2   |  |
| 150,5  |  | 248,73 | 8,9   |  |
| 161,25 |  | 233,01 | 8,6   |  |
| 172    |  | 217,52 | 8,3   |  |
| 182,75 |  | 230,98 | 8,6   |  |
| 193,5  |  | 230,98 | 8,6   |  |
| 204,25 |  | 151,54 | 6,9   |  |
| 215    | 24,5   | 2,8    |       |  |

Рисунок 3.7 - Построение профилированной заготовки для одинарной схемы штамповки.

| L, мм | Поковка   | S, мм   | R, мм | Заготовка   |
|-------|---|---------|-------|---|
| 0     |  | 178,57  | 7,5   |  |
| 14,8  |   | 323,45  | 10,1  |   |
| 29,6  |   | 297,5   | 9,7   |   |
| 44,4  |   | 554,86  | 13,3  |   |
| 59,2  |   | 1073,21 | 18,5  |   |
| 74    |   | 726,09  | 15,2  |   |
| 88,8  |   | 718,58  | 15,1  |   |
| 103,6 |   | 649,45  | 14,4  |   |
| 118,4 |   | 623,14  | 14,1  |   |
| 133,2 |   | 617,26  | 14,0  |   |
| 148   |   | 615,41  | 14,0  |   |
| 162,8 |   | 617,26  | 14,0  |   |
| 177,6 |   | 623,14  | 14,1  |   |
| 192,4 |   | 649,45  | 14,4  |   |
| 207,2 |   | 718,58  | 15,1  |   |
| 222   |   | 726,09  | 15,2  |   |
| 236,8 |   | 1073,21 | 18,5  |   |
| 251,6 |   | 554,86  | 13,3  |   |
| 266,4 |   | 297,5   | 9,7   |   |
| 281,2 |   | 323,45  | 10,1  |   |
| 296   | 178,57  | 7,5     |       |   |

Рисунок 3.8 - Построение профилированной заготовки для двойной схемы штамповки бобышками внутрь.

| L, мм | Поковка | S, мм   | R, мм | Заготовка |
|-------|---------|---------|-------|-----------|
| 0     |         | 363,58  | 10,76 |           |
| 10    |         | 388,06  | 11,11 |           |
| 20    |         | 412,54  | 11,46 |           |
| 30    |         | 633,55  | 14,20 |           |
| 40    |         | 649,71  | 14,38 |           |
| 50    |         | 1012,10 | 17,95 |           |
| 60    |         | 1038,67 | 18,18 |           |
| 70    |         | 830,52  | 16,26 |           |
| 80    |         | 727,80  | 15,22 |           |
| 90    |         | 650,96  | 14,39 |           |
| 100   |         | 621,26  | 14,06 |           |
| 110   |         | 616,60  | 14,01 |           |
| 115,5 |         | 616,00  | 14,00 |           |
| 121   |         | 616,60  | 14,01 |           |
| 131   |         | 621,26  | 14,06 |           |
| 141   |         | 650,96  | 14,39 |           |
| 151   |         | 727,80  | 15,22 |           |
| 161   |         | 830,52  | 16,26 |           |
| 171   |         | 1038,67 | 18,18 |           |
| 181   |         | 1012,10 | 17,95 |           |
| 191   |         | 649,71  | 14,38 |           |
| 201   |         | 633,55  | 14,20 |           |
| 211   |         | 412,54  | 11,46 |           |
| 221   | 388,06  | 11,11   |       |           |
| 231   | 363,58  | 10,76   |       |           |

Рисунок 3.9 - Построение профилированной заготовки для двойной схемы штамповки бобышками наружу.

| Штамповка единичной поковки                  |               |                  |            |
|--|---------------|------------------|------------|
|  | Цилиндр       | Плита            | Профиль    |
|  | <br>175x23 мм | <br>175x45x20 мм | <br>215 мм |
| Штамповка спаренной поковки бобышками внутрь |               |                  |            |
|  | Цилиндр       | Плита            | Профиль    |
|  | <br>170x34 мм | <br>150x50x20 мм | <br>190 мм |
| Штамповка спаренной поковки бобышками наружу |               |                  |            |
|  | Цилиндр       | Плита            | Профиль    |
|  | <br>180x36 мм | <br>160x50x22 мм | <br>240 мм |

Рисунок 3.10 - Типы и размеры заготовок.

### 3.4. Проектирование конструкции штамповых вставок

Как было указано в 3.1 (Выбор схемы штамповки), был разработан чертёж поковки, который использовали для построения трёхмерной модели и проектирования штамповой оснастки. По рассчитанному объёму поковки и геометрическим размерам исходных заготовок были построены соответствующие объёмные модели. Указанные модели оснастки и заготовок были импортированы в специализированную вычислительную систему, где и осуществлялась окончательная сборка модели технологической схемы.

Проектирование конструкции штамповых вставок производилась также с использованием технологии 3D - моделирования. По чертежу горячей поковки с размерами по отрицательному допуску в тело эндопротеза по системе вал была построена 3D-модель.

Для нормализованного штампового блока произвели выбор размеров типовых вставок с уменьшенной высотой для экономии дорогостоящего штампового материала - сплава 5ХНМ. Для этого была разработана 3D - модель холодной поковки в SolidWorks и определён её объём и вес. После этого с учетом выбора способа штамповки и вида заготовки произвели расчет объёма поковки и в SolidWorks.

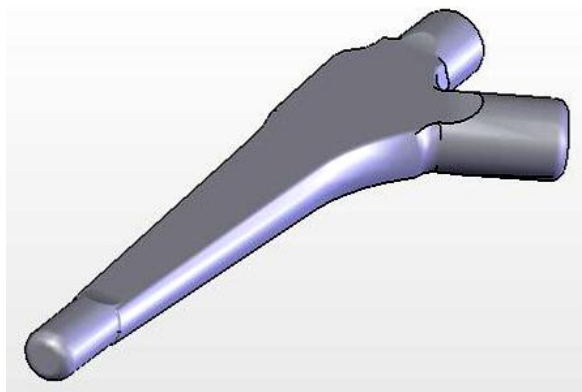


Рисунок 3.11 - Поковка эндопротеза разработанная в среде Solid Works.

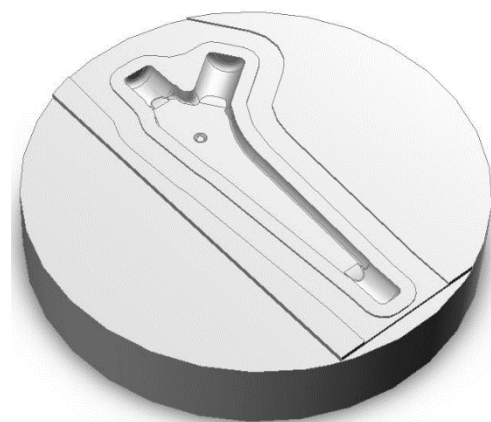


Рисунок 3.12 - Типовой пример построения 3D-модель штамповой вставки.

Для этого добавили объем на угар металла (0,5% при индукционном нагреве заготовки), объем на облой и на зачистку заусенцев после обрезки облоя лазерной резкой. Для выбора вида полуфабриката плиты или прутка в качестве заготовки нужно еще добавить объем на резку (пилами, плазмой, лазером, в штампах и т.д.). Модель представлена на рисунок 3.11.

После расчета размеров нужной нам поковки; получаемой из соответствующих заготовок, разработали чертеж штамповой вставки, и построили 3D-модель штамповой вставки - Типовой пример построения 3D-модель штамповой вставки представлен на рисунок

3.12. Для штамповки на молоте был разработан чертеж штамповой вставки и поковки, чертежи и 3D- модели которых показаны на рисунок 3.13.

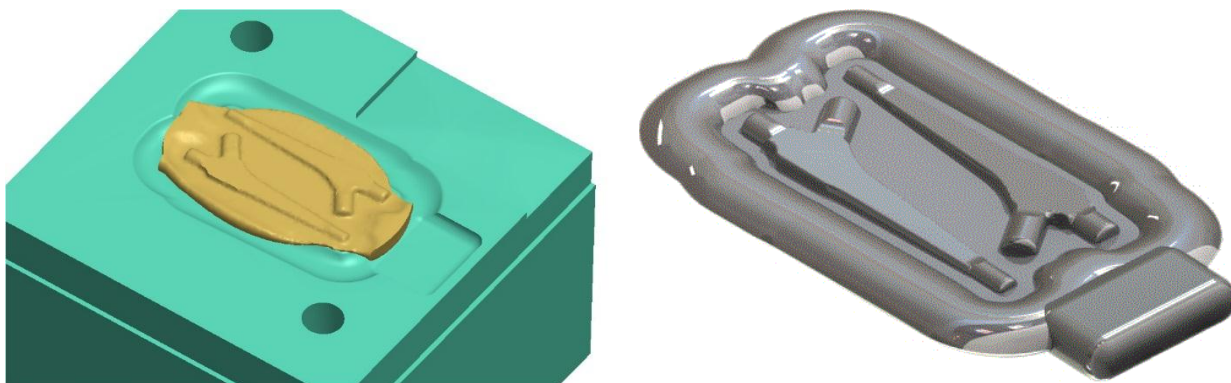


Рисунок 3.13 - 3D модель поковки рассчитанной с помощью компьютерного моделирования.

### 3.5. Компьютерное моделирование процесса горячей штамповки эндопротезов

Методы компьютерного моделирования процессов ОМД использовали для проектирования штамповой оснастки, выбора исходной заготовки и определения энергосиловых параметров и температурно-скоростных условий процесса штамповки. Такие методы основаны на разбиении сплошной среды на конечные элементы и расчёте процессов формоизменения деформируемой заготовки уравнениями механики сплошных сред и теории пластического течения [102].

Таблица 3.2 - Параметры процесса, используемые для расчета в программе Deform 3D.

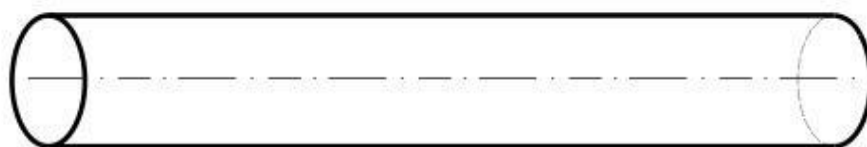
| Параметр                                     | Значение параметра |
|--|--------------------|
| Движение инструмента, мм/с                   | 10                 |
| Температура заготовки перед штамповкой T, °C | 900                |
| Коэффициент трения                           | 0,15               |
| Количество элементов, шт                     | 80000              |
| Материал                                     | Сплав ВТ6          |

Формоизменение металлов при обработке давлением возможно описать математическим уравнениями, на основе которых методом конечных элементов возможно определить различные характеристики напряженно-деформированного состояния исследуемых объектов. Базируясь на их корректности и значимости внедряются ряды

специализированных прикладных программ с целью облегчения в расчетах и исследованиях технологических параметров при обработке металлов давлением.

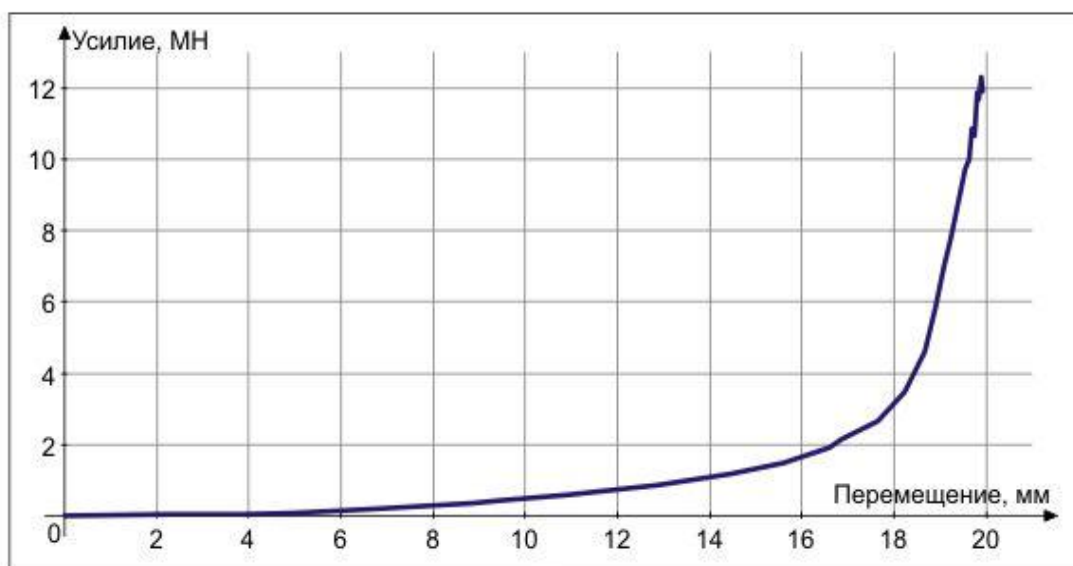
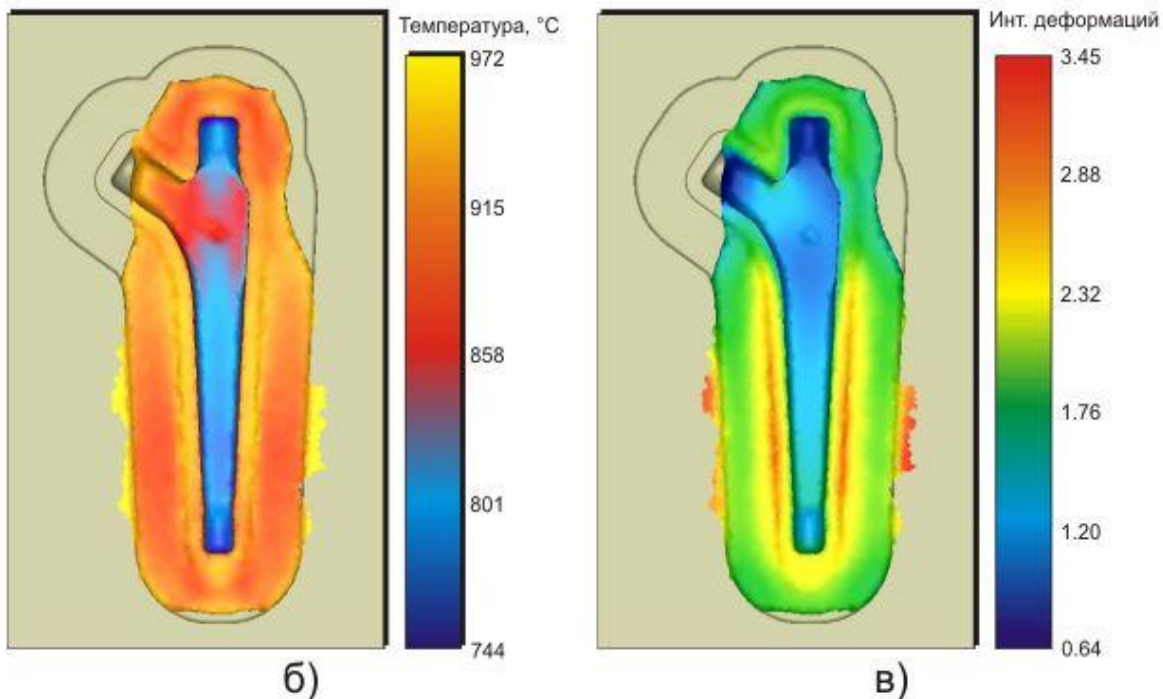
В качестве исходного материала для математического моделирования был взят, как натуральный материал сплав ВТ6. Полученные данные, а также данные необходимые для проведения эксперимента были введены в программу Deform 3D таблица 3.2.

На основе кривых деформационного упрочнения и диаграммы состояния сплава ВТ6 были выбраны и введены в программу расчёта температурно-скоростные условия процесса штамповки. Температура начала штамповки заготовки составила 900°C, штамповой оснастки 600°C, окружающей среды 20°C. Осевое усилие обеспечивалось движением верхнего инструмента со скоростью 10 мм/с. Реологическая модель поведения титанового сплава ВТ6 при деформировании была рассчитана по данным, полученным из технической и научной литературы. Время расчёта одной задачи составило 7 часов. В результате моделирования получили поля распределения температуры и напряжённо-деформированного состояния в объёме поковки на протяжении всего процесса штамповки, а также график зависимости осевого усилия от хода верхнего инструмента.



L = 175 мм, D = 23 мм

а)



г)

Рисунок 3.14 - Моделирование штамповки эндопротеза с единичной заготовкой.

- а) исходная заготовка;      б) распределение температуры;  
в) интенсивность деформаций;    г) усилие процесса штамповки



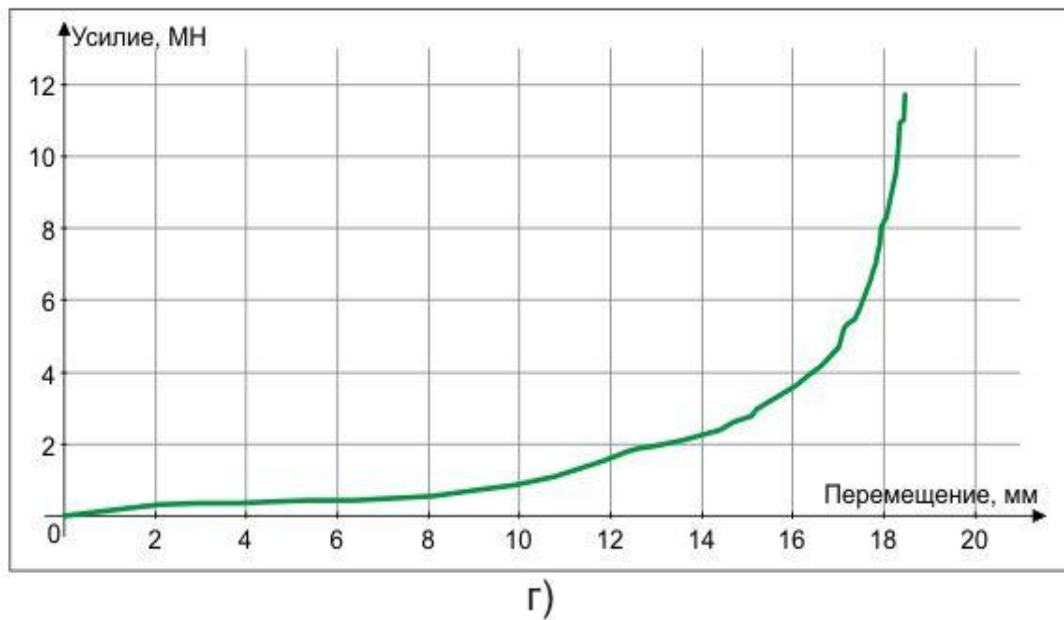
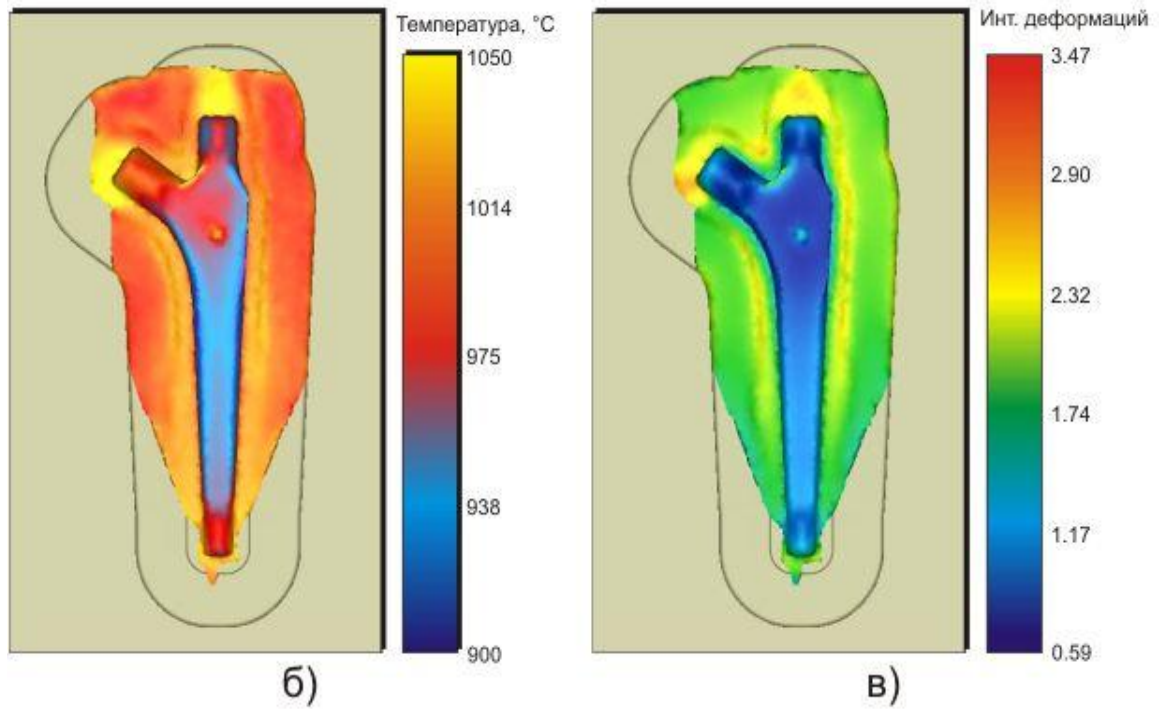
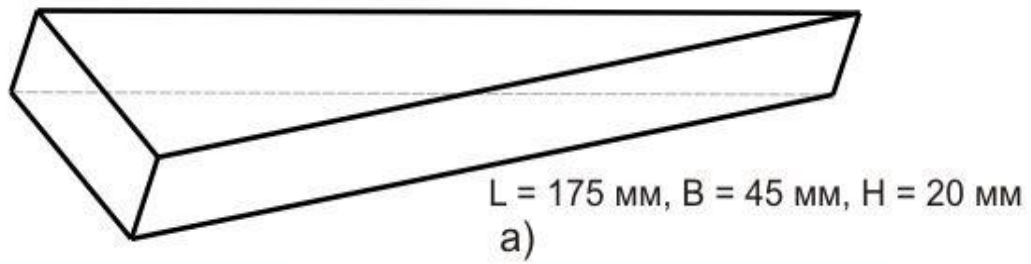
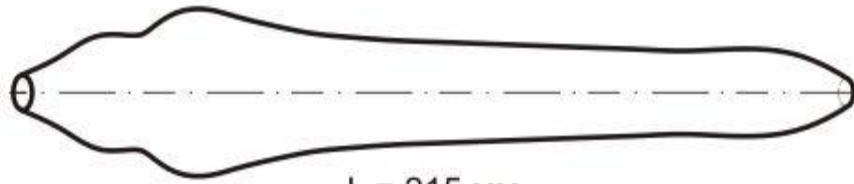


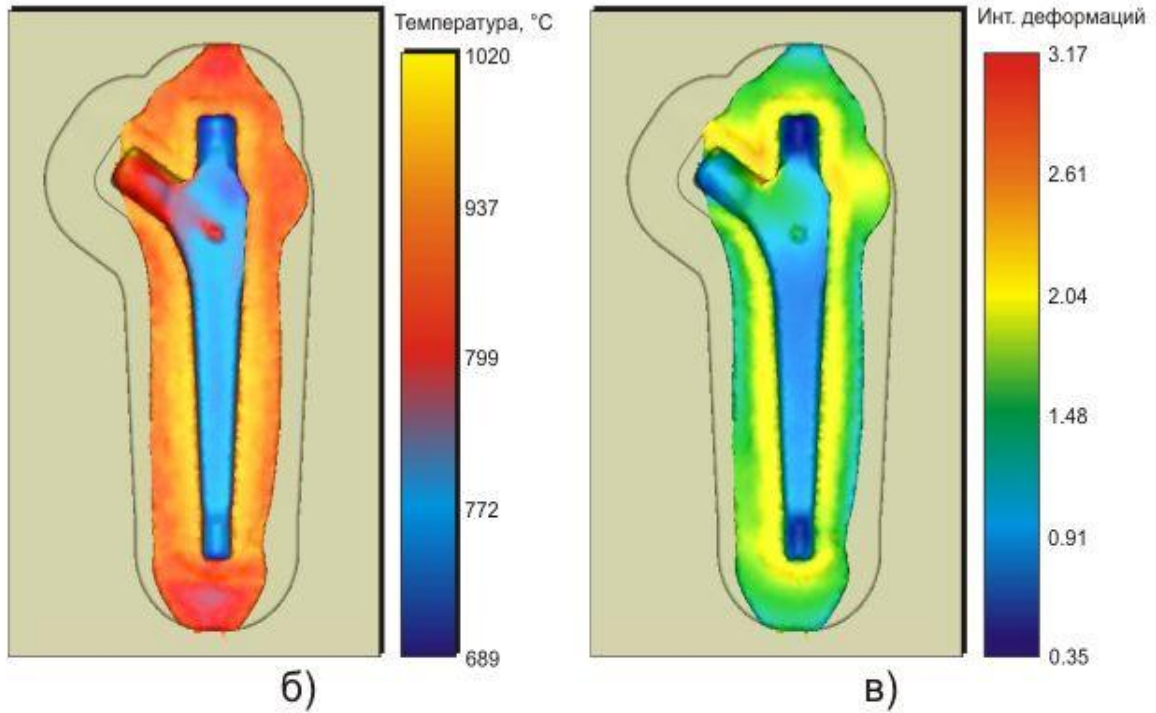
Рисунок 3.15 - Моделирование штамповки эндопротеза с единичной заготовкой.

- а) исходная заготовка;      б) распределение температуры;  
в) интенсивность деформаций;    г) усилие процесса штамповки



L = 215 мм

а)



г)

Рисунок 3.16 - Моделирование штамповки эндопротеза с единичной заготовкой.

- а) исходная заготовка;      б) распределение температуры;  
в) интенсивность деформаций;    г) усилие процесса штамповки

### 3.5.1. Моделирование штамповки с единичной заготовкой

а) Цилиндрическая заготовка: При окончании штамповки цилиндрической заготовки температурный интервал по сечению поковки составил 744-858°C (рисунок 3.14, б), температура в зоне перехода облойной канавки в магазин доходила до 950°C. При штамповке цилиндрической заготовки произошло преждевременное заполнение гравюры в области ножки и металла не хватило для заполнения боковой бобышки. Корректирование диаметра цилиндрической заготовки дало возможность заполнить необходимые элементы гравюры штампа, но усилие при этом выросло, а температура металла в зоне облоя превысила 1100°C.

На графиках изменения усилия было выделено две области штамповки постепенное нарастание усилия примерно до 1,5-2 МН, и резкое увеличение после заполнения формы поковки в области ножки. Усилие на верхнем инструменте в конце операции для цилиндрической заготовки составило 12 МН - самое большое усилие по сравнению с остальными схемами из-за указанного выше преждевременного заполнения облоя в области ножки (рисунок 3.14, г). При анализе схема штамповки с единичной заготовкой, с точки зрения коэффициента использования металла можно сказать, что значение этого параметра у цилиндрической заготовки максимальный, он составил 0,67. При анализе интенсивности деформации при различных типах заготовки, можно сказать, что значение этого параметра также отличается: При использовании цилиндрической заготовки: КИМ 0,64-1,76 (рисунок 3.14, в).

б) Заготовка из плиты: При штамповке заготовки из плиты температурный интервал поковки составил 900-975°C, температура в зоне перехода 970°C (рисунок 3.15, б).

Моделирование штамповки заготовки в форме треугольника, вырезанного из плиты, показало хорошее заполнение всех элементов гравюры. В некоторых случаях, когда заготовка укладывалась со смещением к утолщённой части поковки, в нижней части в зоне нижней бобышки происходило сворачивание острого угла, в результате чего образовывался зажим, и облой не успевал полностью оформиться. Увеличение угла устраняло данный дефект, но резко возрастали отходы на облой. Указанного заворота так же удавалось избежать при раскросе плиты не на треугольники, а на трапеции с прямым углом, но в этом случае увеличивался расход металла на облой, вследствие чего падал коэффициент использования металла, повышался износ виртуальных штампов, и возрастало усилие штамповки. При штамповке треугольной плиты усилие составило 11 МН, в зависимости от расположения заготовки на гравюре штампа (рисунок 3.15, г). Во втором случае (при использовании заготовка из плиты, раскросенной на треугольники) показал, что коэффициент использования металла составил

0,62; а интенсивности деформации при использовании плиты: 0,59-1,74 (рисунок 3.15, в).

в) Профилированная заготовка: Температурный интервал поковки из профилированной заготовки в конце операции составил 689-799°C, в зоне облойной канавки температура достигала 970°C (рисунок 3.16, б). Усилие при моделировании штамповки профилированной заготовки было наименьшим - около 6 МН, т.к. облой не успел окончательно оформиться, и операция доштамповки ещё не началась (рисунок 3.16, г). При анализе схемы штамповки из единичной профилированной заготовки, коэффициент использования металла составил 0,66; а интенсивности деформации при использовании профилированной заготовки составило: 0,35-1,48 (рисунок 3.16, в). После анализа формозаполнения профилированной заготовкой гравюры штампа было решено увеличить диаметр утолщения, отвечающий за заполнение боковой бобышки. В результате, в самом начале операции, из-за несимметричности гравюры штампа возникал крутящий момент и заготовка, зажатая утолщённой частью, поворачивала свободный конец на 5-6°. Свободный конец заготовки при смыкании верхнего и нижнего штампов оказывался зажатым в облойной канавке, тем самым нарушая схему течения и резко увеличивая усилие штамповки в самом начале операции (рисунок 3.17).

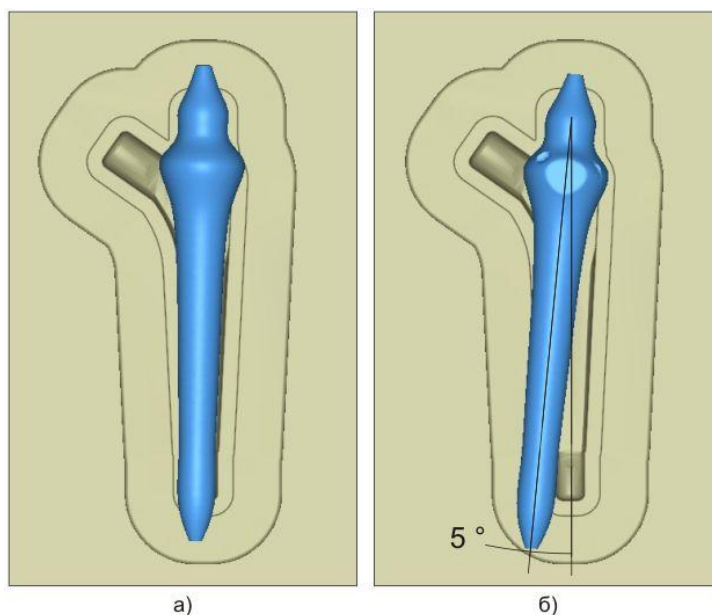


Рисунок 3.17. Перекос профилированной заготовки в начале процесса.

а) заготовка, уложенная в нижнем штампе;

в) перекос заготовки в начале операции штамповки.

Анализ распределения температуры и сопоставление его со свойствами сплава ВТ6 показало, что штамповка всех трех заготовок, протекают в температурном интервале, благоприятном для деформации сплава ВТ6, а в зоне облойной канавки возможно начало полиморфного превращения [103].

Таким образом, проанализировано влияние формы и типа исходной заготовки на технологические параметры процесса горячей объемной штамповки. Показано, что моделирование штамповки прутковых и профилированных заготовок показало неудовлетворительные результаты по заполнению боковой бобышки эндопротеза, но хорошее заполнение остальных основных элементов поковки, но так как боковая бобышка является важным элементом конечной детали, то данные схемы были признаны непригодными для штамповки единичной поковки. Было показано, что единичные штамповки лучше получать из профилированной заготовки или прутка, что дает максимальные значения коэффициента использования металла при рациональных показателях интенсивности деформаций, усилия штамповки и распределения температуры.

### 3.5.2. Моделирование штамповки со спаренной заготовкой бобышками внутрь

Как и при единичной штамповке, характер распределения температуры в поковке приблизительно одинаковый во всех трех случаях, но значения параметров отличаются.

а) Цилиндрическая заготовка: В первом случае, когда исходной заготовкой служил цилиндр, значения температуры находились в интервале 850-910°C (рисунок 3.18, б). При анализе интенсивности деформации можно сказать, что распределение накопленной деформации по объему поковки одинаковое, но значения параметров отличается: при использовании цилиндрической заготовки: 1,05-2,61 (рисунок 3.18, в).

Усилие на верхнем инструменте в конце операции для цилиндрической заготовки составило 12 МН (рисунок 3.18, г). Коэффициент использования металла в схеме штамповки со спаренной заготовкой бобышками внутрь: заготовка цилиндрической составил 0,63.

б) Заготовка из плиты: Во втором случае, когда исходной заготовкой была плиты, значения температуры находились в интервале: 910-955°C (рисунок 3.19, б). При анализе интенсивности деформации при различных типах заготовки, следует отметить, что значения этого параметра также отличается: при использовании в качестве заготовки-плиты, интенсивность деформации значительно понижается 0,53-1,78 (рисунок 3.19, в).

Усилие на верхнем инструменте в конце операции штамповки заготовки из плиты, составило 20 МН (рисунок 3.19, г). Коэффициент использования металла в схеме штамповки со спаренной заготовкой бобышками внутрь заготовки из плиты составил 0,65.

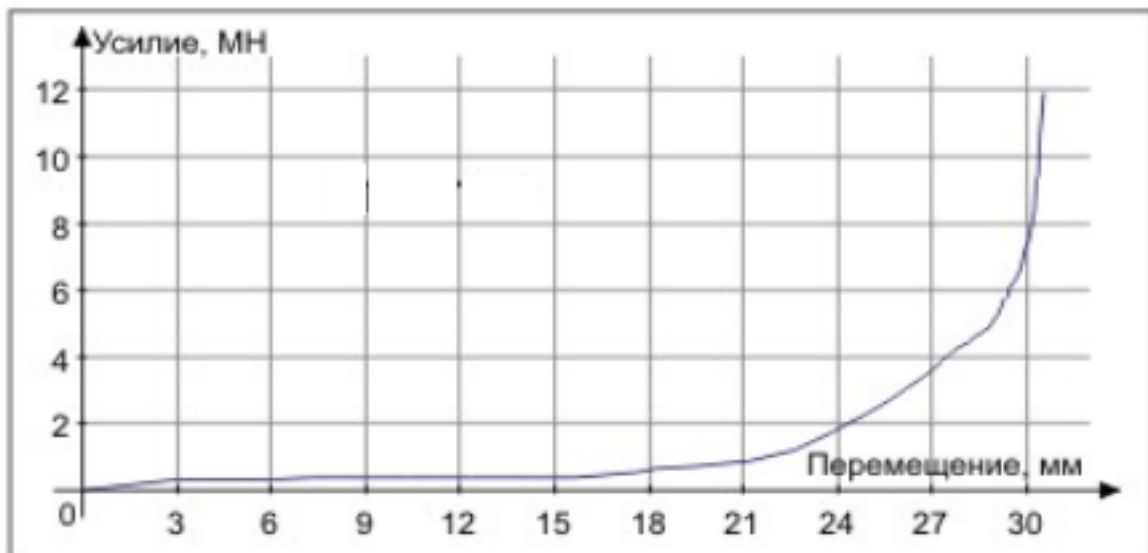
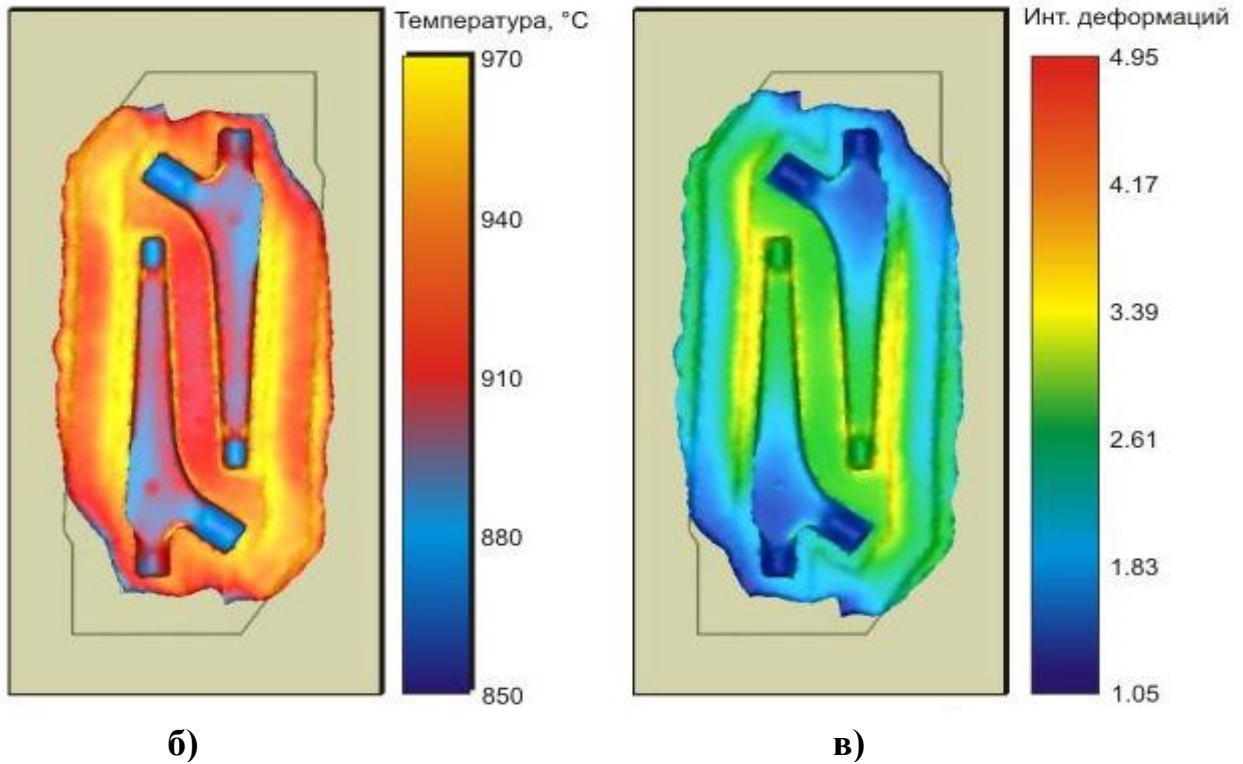
в) Профилированная заготовка: При использовании профилированной заготовки для спаренной штамповки бобышками внутрь, температура колеблется в пределах 895-973°C

(рисунок 3.20, б). Наиболее нагретыми участками являются: верхняя бобышка эндопротеза и нижняя часть ножки эндопротеза, также больше нагревается боковая полость эндопротеза расположенная ближе к центру штампа. Значение интенсивности деформации для профилированной заготовки: 1,12-2,66 (рисунок 3.20, в). Усилие при моделировании штамповки профилированной заготовки было около 9 МН (рисунок 3.20, г). Коэффициент использования металла при штамповки из профилированной заготовки составил 0,69.

Проанализировано влияние формы и типа исходной заготовки на технологические параметры процесса горячей объемной штамповки. Показано, что минимальные усилия деформации и рациональное заполнение гравюры штампа для штамповки 2-х эндопротезов с бобышками внутрь для профилированной заготовки.



а)  $L = 170$  мм,  $D = 34$  мм



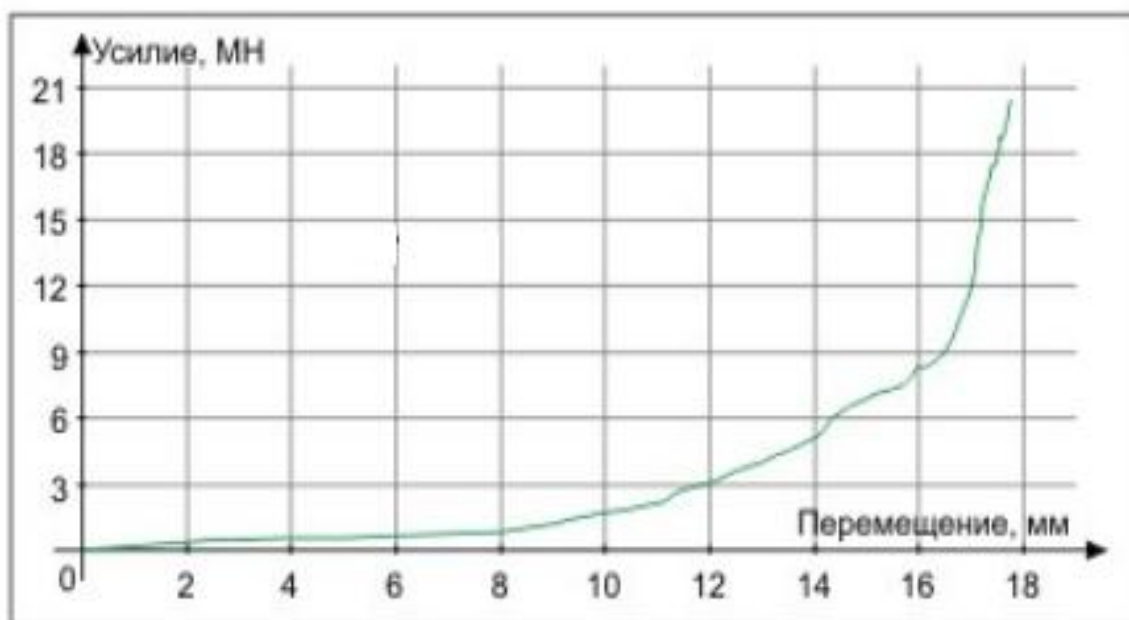
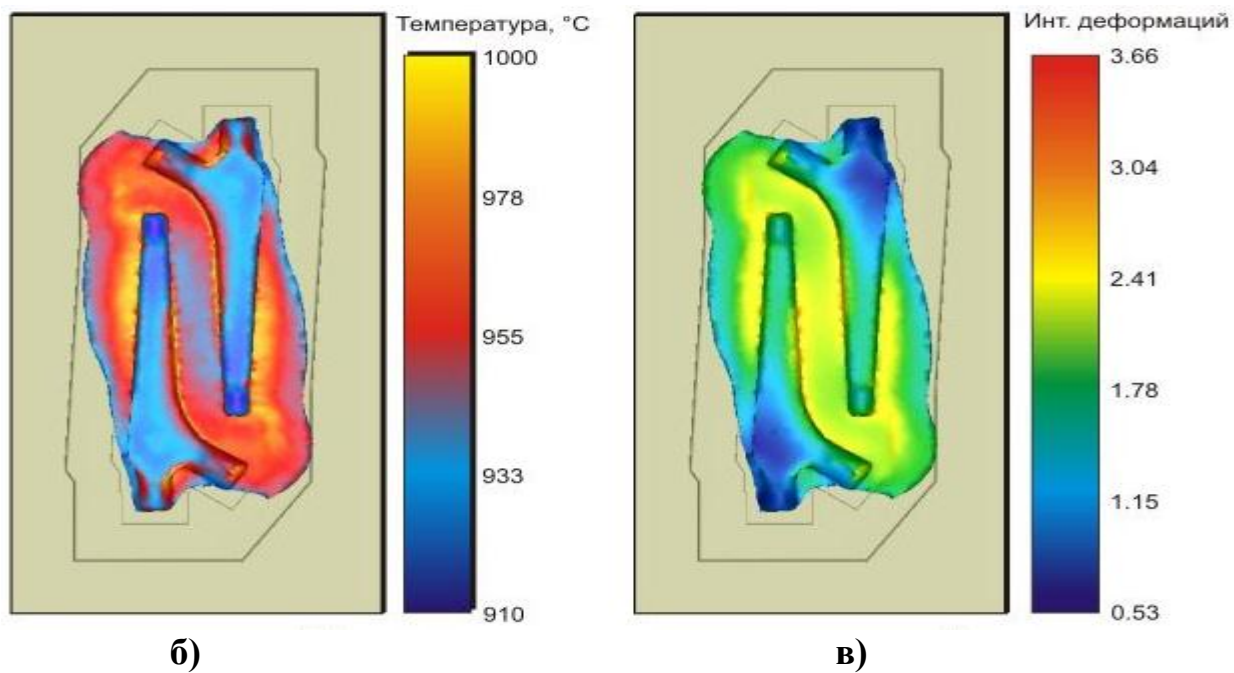
г)

Рисунок 3.18 - Моделирование спаренной схемы штамповки с бобышками внутри.

- а) исходная заготовка;      б) распределение температуры;  
в) интенсивность деформаций;    г) усилие процесса штамповки



а)  $L = 150 \text{ мм}$ ,  $B = 50 \text{ мм}$ ,  $H = 20 \text{ мм}$



г)

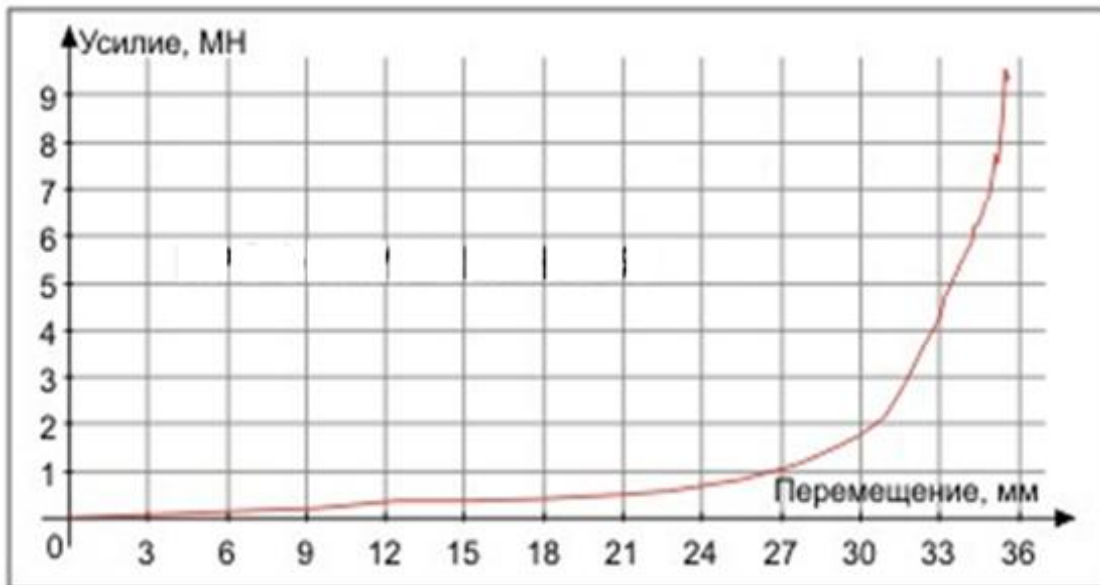
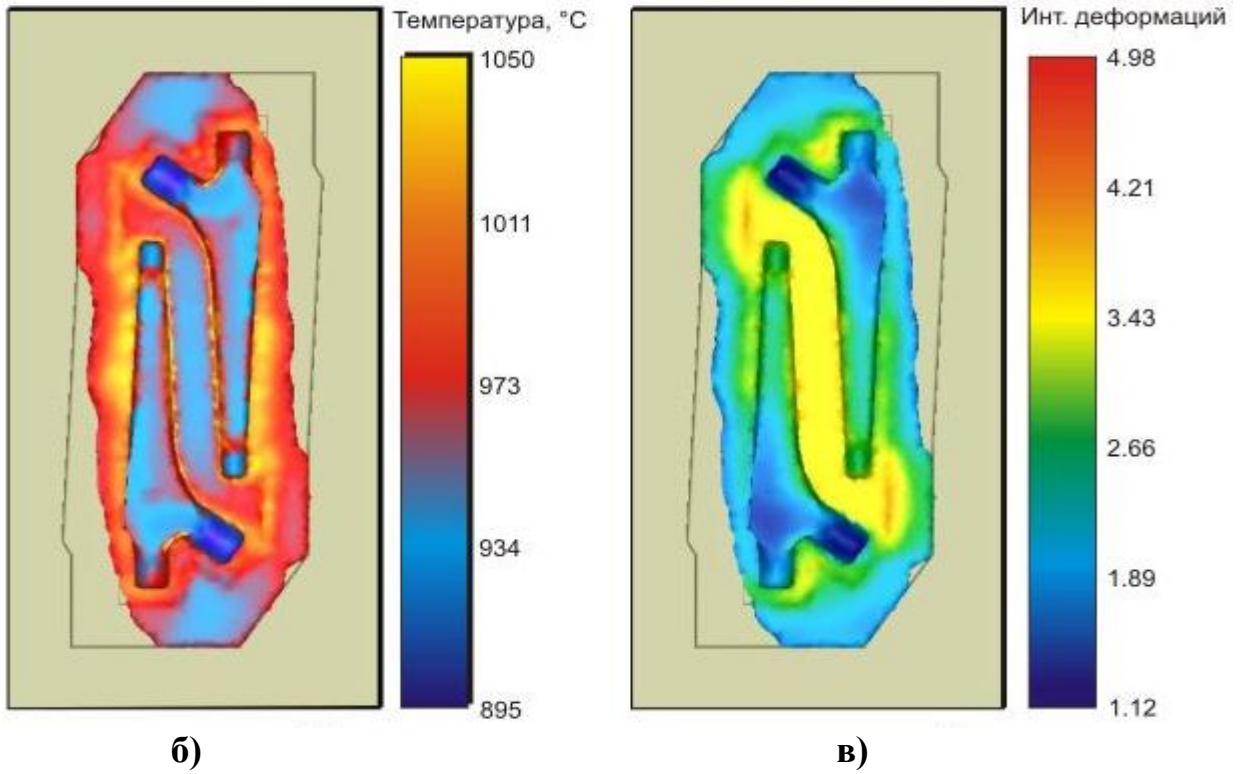
Рисунок 3.19 - Моделирование спаренной схемы штамповки с бобышками внутри.

- а) исходная заготовка;      б) распределение температуры;  
 в) интенсивность деформаций;    г) усилие процесса штамповки





а) L = 190 мм



г)

Рисунок 3.20. Моделирование спаренной схемы штамповки с бобышками внутри.

- а) исходная заготовка;      б) распределение температуры;  
в) интенсивность деформаций;    г) усилие процесса штамповки

### 3.5.3 Моделирование штамповки со спаренной заготовкой бобышками наружу

а) Цилиндрическая заготовка: При использовании цилиндрической заготовки температура имеет следующие значения: 900-950°C (рисунок 3.21, б).

Усилие на верхнем инструменте в конце операции для цилиндрической заготовки составило 22 МН (рисунок 3.21, г). Результаты интенсивности деформации: в первом случае (цилиндр), характер распределения интенсивности деформации: 0,95-2,29 (рисунок 3.21, в). По сравнению со спаренной штамповкой бобышками внутрь, коэффициент использования металла меньше: заготовка цилиндрической составил 0,53.

б) Заготовка из плиты: В случае использования в качестве исходной заготовки плиты: температура колеблется в интервале 730-855°C (рисунок 3.22, б).

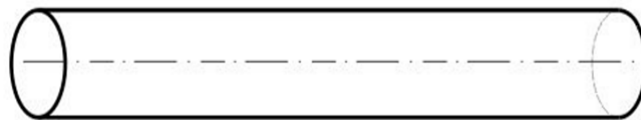
Усилие на верхнем инструменте в конце операции при штамповке заготовка из плиты усилие чуть меньше 10 МН (рисунок 3.22, г). Результаты распределения интенсивности деформации: при использовании плиты: 0,40-1,36 (рисунок 3.22, в); Коэффициент использования металла больше: заготовка из плиты составил 0,55.

в) Профилированная заготовка: В случае использования в качестве исходной профилированной заготовки: температура колеблется в пределах 900-945°C (рисунок 3.23, б). В этом случае поковка охладилась значительно, чем в предыдущих вариантах. Как и во всех экспериментах, наиболее нагретой частью является боковая бобышка, т.к. здесь во всех случаях наибольшая интенсивность деформации, по сравнению с остальной частью поковки.

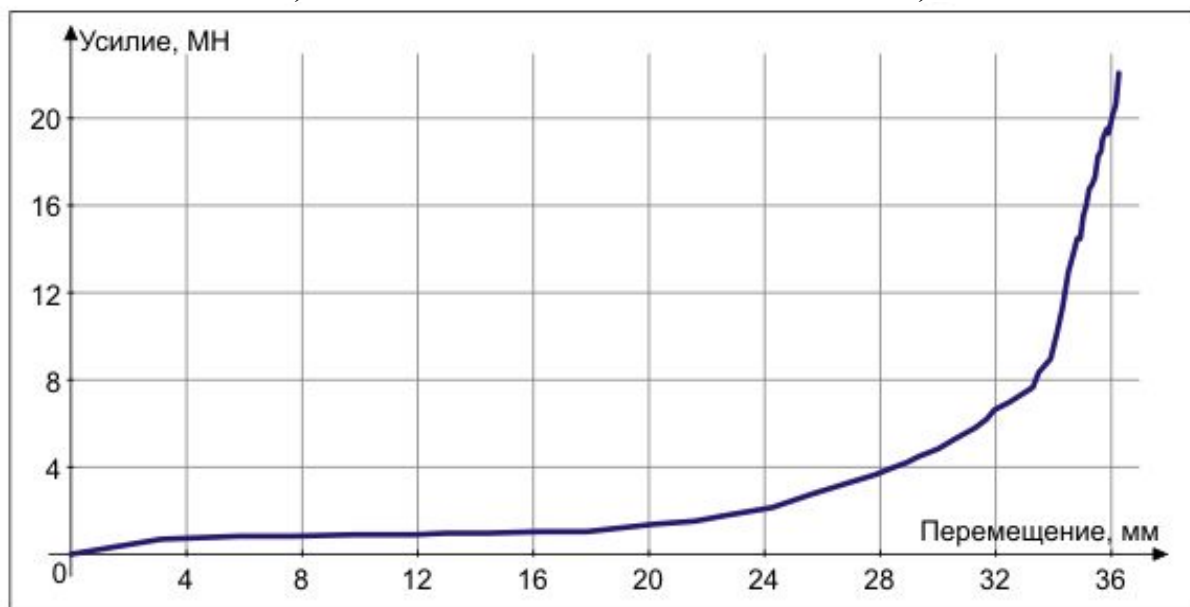
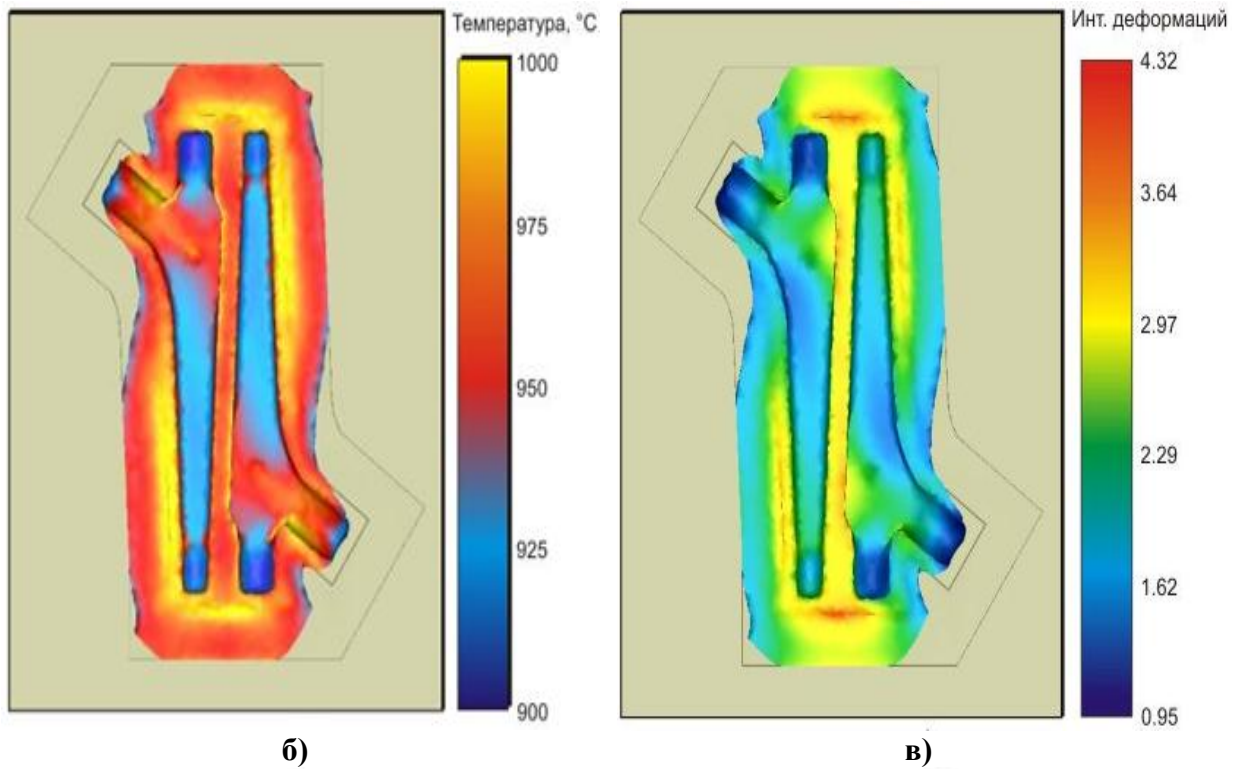
Характер распределения накопленной интенсивности деформации в первых двух опытах схожи, в отличие от использования в качестве исходной профилированной заготовки. В этом случае распределение интенсивности деформации составило 0,80-2,07 (рисунок 3.23, в).

Усилие при моделировании штамповки из профилированной заготовки было около 22 МН (рисунок 3.23, г); Коэффициент использования металла в случае профилированной заготовки составил 0,60.

Проанализировано влияние формы и типа исходной заготовки на технологические параметры процесса горячей объемной штамповки. Показано, что минимальные усилия деформации и рациональное заполнение гравюры штампа для штамповки 2-х эндопротезов с бобышками наружу из заготовки в виде плиты.



а)  $L = 180$  мм,  $D = 36$  мм



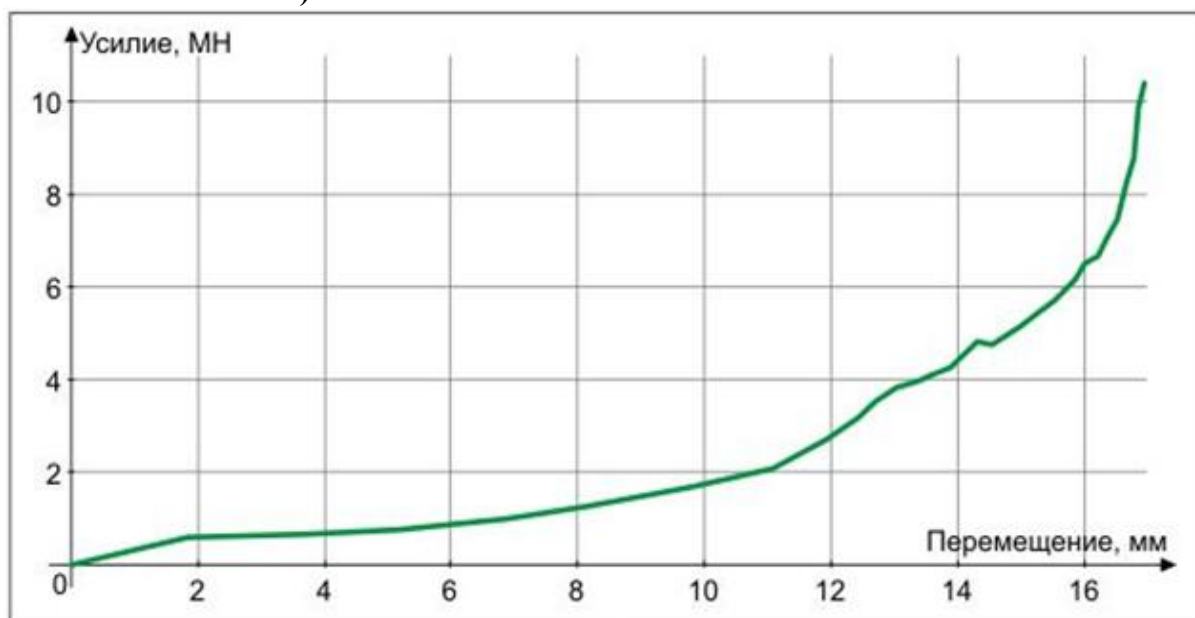
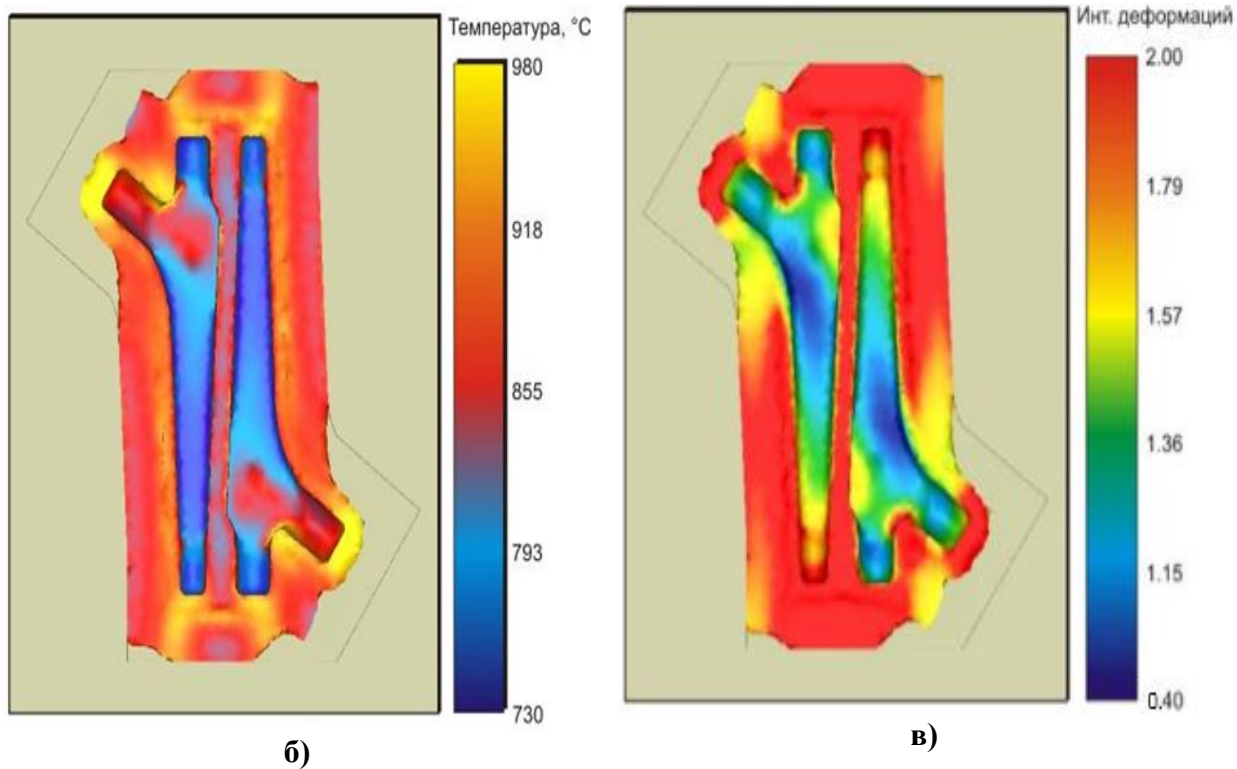
г)

Рисунок 3.21 - Моделирование спаренной схемы штамповки бобышками наружу.

- а) исходная заготовка;      б) распределение температуры;  
в) интенсивность деформаций;    г) усилие процесса штамповки.



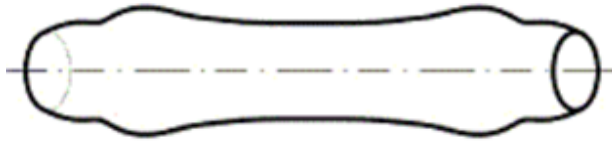
а)  $L = 160$  мм,  $B = 50$  мм,  $H = 22$  мм



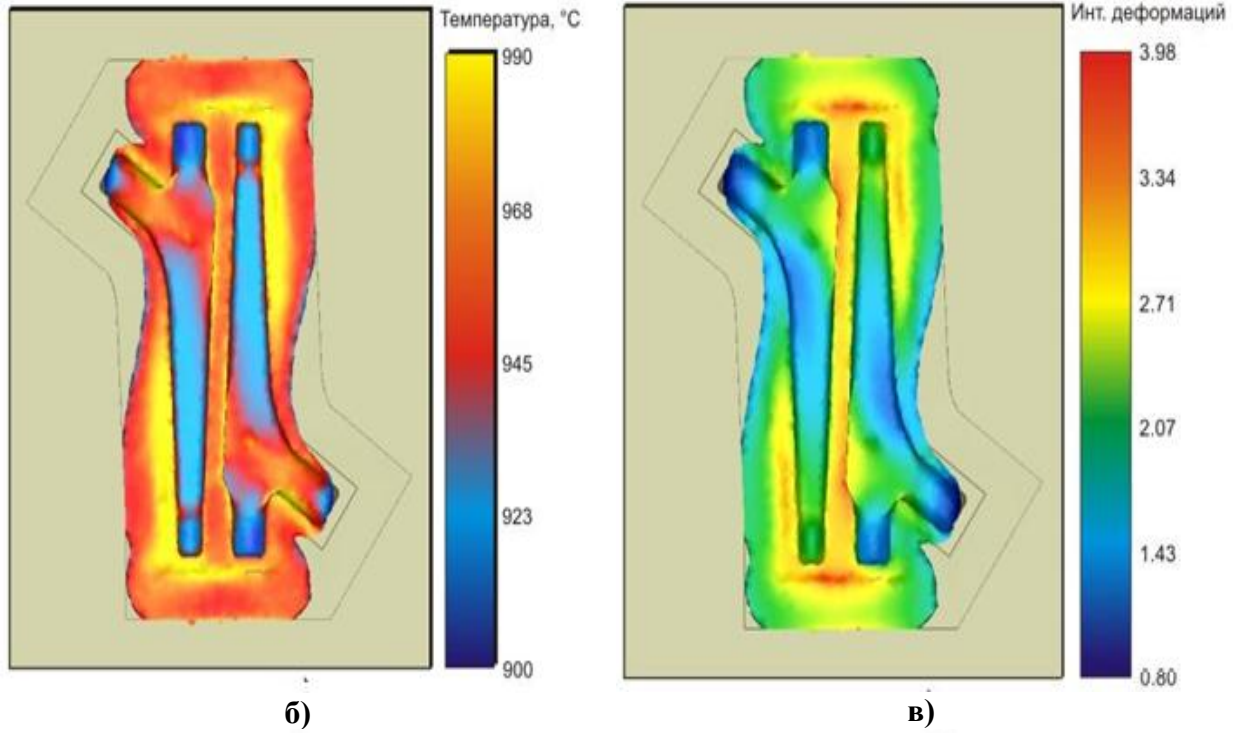
г)

Рисунок 3.22 - Моделирование спаренной схемы штамповки бобышками наружу.

- а) исходная заготовка;      б) распределение температуры;  
в) интенсивность деформаций;    г) усилие процесса штамповки.

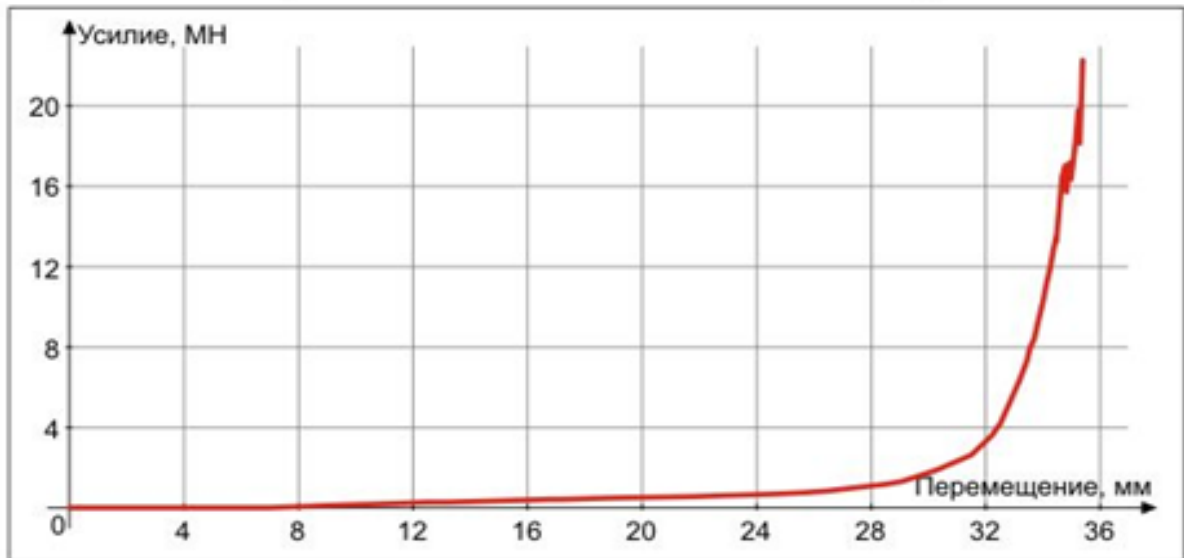


а)  $L = 240$  мм



б)

в)



г)

Рисунок 3.23. Моделирование спаренной схемы штамповки бобышками наружу.

- а) исходная заготовка;
- б) распределение температуры;
- в) интенсивность деформаций;
- г) усилие процесса штамповки.

### 3.6. Заключение по главе 3

Усилия металла, действующие на инструметов для всех проведенных экспериментов, и также коэффициент использования металла (КИМ) были определены с целью выбрать наиболее рациональную схему штамповки. В таблице 3.3 показаны параметры различных исходных заготовок, усилие и КИМ при проведении моделирования штамповки.

Таблица 3.3 - Параметры исходных заготовок, усилие и КИМ при штамповке.

| <b>Схема штамповки единичная</b>                     |                         |            |                    |      |
|--|-------------------------|------------|--------------------|------|
| Заготовка  | Номинальные размеры, мм | Усилие, МН | Масса заготовки, г | КИМ  |
| Цилиндрическая                                       | L = 175; D = 23         | 12         | 327,9              | 0,67 |
| Плита  | L = 175; H = 20; B = 45 | 11         | 355,2              | 0,62 |
| Профиль  | L = 215                 | 6,0        | 332,0              | 0,66 |
| <b>Схема штамповка, спаренная с бобышками внутрь</b> |                         |            |                    |      |
| Заготовка  | Номинальные размеры, мм | Усилие, МН | Масса заготовки, г | КИМ  |
| Цилиндр  | L = 170; D = 34         | 12         | 696,1              | 0,63 |
| Плита  | L = 150; H = 20; B = 50 | 20         | 676,5              | 0,65 |
| Профиль  | L = 190                 | 9          | 635,0              | 0,69 |
| <b>Схема штамповка спаренная с бобышками наружу</b>  |                         |            |                    |      |
| Заготовка  | Номинальные размеры, мм | Усилие, МН | Масса заготовки, г | КИМ  |
| Цилиндр  | L = 180; D = 36         | 22         | 826,3              | 0,53 |
| Плита  | L = 160; H = 22; B = 50 | 10         | 793,8              | 0,55 |
| Профиль  | L = 240                 | 22         | 727,6              | 0,60 |

Таким образом, по результатам проведённых испытаний можно сделать следующие выводы [104]:

1. Проанализировано влияние формы и типа исходной заготовки на технологические параметры процесса горячей объемной штамповки. Показано, что минимальные усилия деформации и рациональное заполнение гравюры штампа для единичной схемы штамповки эндопротезов из профилированной заготовки;

2. Оценка усилия деформирования при штамповке спаренной заготовки показало, что при расположении в заготовке бобышками наружу наименьшие усилия при штамповке из плиты, а при расположении бобышками внутрь при штамповке из профилированной заготовки;

3. Разработаны эскиз штамповки и штамповые вставки для изготовления поковок эндопротезов;

4. Анализ данных позволил выбрать температуру заготовки перед штамповкой 900°C. Рассчитана величина накопленной деформации для различных типов заготовок;

5. На основе проведённых исследований был разработан технологический процесс штамповки эндопротезов и установлено, что наиболее рациональным для эффективного производства эндопротезов тазобедренного сустава из титанового сплава ВТ6 может быть технология горячей объемной штамповки;

6. Применение профильной заготовки слишком дорого. По экономическим причинам, для практического использования целесообразно применять в производстве заготовки из плит или прутка.

## Глава 4. Физическое моделирование процесса штамповки эндопротезов

Физическое моделирование в отличие от математического - замена изучения интересующего нас действия, протекающего в природе, исследованием подобного действия на модели, как правило, меньшего либо большего объема и как правило в специализированных, лабораторных условиях. Главный смысл такого моделирования состоит в том, чтобы по результатам опытов с моделями, которые можно изготовить с меньшими затратами средств и времени, а так же возможно было определить оптимальные свойства натурального продукта (процесса), а в некоторых случаях попросту определить неизвестные ранее закономерности.

Физическое моделирование - метод экспериментального изучения различных физических объектов или явлений, основанный на использовании модели, имеющей ту же физическую природу, что и изучаемый объект [105].

Установление искомых закономерностей с помощью физического моделирования зачастую является единственно возможным способом экспериментального изучения и решения важных и нужных практических задач. Для проверки достоверности результатов моделирования и снижения затрат на разработку инструмента проводилось физическое моделирование на модельном материале в лабораторных условиях.

При физическом моделировании задача о силовых режимах штамповки не ставилась, а оценивалось только формоизменение заготовки в открытых штампах и заполнение гравюры.

### 4.1. Подготовка заготовок и штампы для физического моделирования

Как было указано, форма и размеры заготовок, используемые в физическом моделировании, были выбраны на основе результатов компьютерного моделирования, с учетом выявленных недостатков.

Таблица 4.1 - Исходные данные для физического моделирования.

| Единичная схема штамповки |                                  |
|---------------------------|----------------------------------|
| Исходная заготовка        | Размеры                          |
| Цилиндр                   | L = 175 мм, D = 23 мм            |
| Треугольная плита         | L = 175 мм, B = 45 мм, H = 20 мм |
| Спаренная схема штамповки |                                  |
| Цилиндр                   | L = 180 мм, D = 36 мм            |
| Плита                     | L = 160 мм, B = 50 мм, H = 22 мм |



Материалом для заготовок был термоупрочняемый пластилин - термопласт информации, о котором представлена в таблице 4.1.

Цилиндрические заготовки раскатывались на доске до нужного диаметра, после чего отрезалась лишняя часть. Для изготовления прямоугольных и треугольных заготовок раскатывался «блин» нужной высоты, после чего на него наносился контур нужных размеров, и обрезались излишки. Калибровка заготовок производилась по бумажному чертежу. Это позволяло получить заготовки с точностью  $\pm 0,5$  мм.

Для получения слоистой треугольной заготовки раскатывалось несколько слоёв разного цвета примерно равной толщины, укладывались друг на друга, и «слоёный блин» раскатывался до необходимой толщины. После чего, аналогично обычным моделям, на поверхность наносился эскиз будущей заготовки, и обрезалась лишняя часть.

В ходе штамповки проверялось параллельность смыкания штампов, а так же равномерное распределение облоя на промежуточных этапах, после чего оснастка разбиралась, снимался верхний штамп и проводился анализ окончательного заполнения гравюры. В ходе физического моделирования процесса штамповки проводился анализ внешнего формоизменения заготовок и характера заполнения критических областей гравюры штампа, а так же сопоставление с результатами компьютерного моделирования. При визуальном осмотре полученных поковок делались выводы о пригодности выбранной формы заготовки или схемы штамповки в целом.

На готовую заготовку и штамповые вставки наносилась смазка, заготовка укладывалась в нижний штамп, прижималась верхним штампом, и вся оснастка скреплялась направляющими.

Чертежи штамповых вставок для физического моделирования представлены на рисунок 4.1 - 4.3.

Для проектирования заготовки и оснастка (штамповой вставки) применялась система моделирования программа SolidWorks. Оснастка для физического моделирования была изготовлена по трёхмерным моделям штамповых вставок, которые были использованы на стадии компьютерного моделирования. Разработка конструкции штамповых вставок для физического моделирования производили также с использованием технологии 3D - моделирования. По чертежу была построена 3D-модель. Типовой пример построения 3D-модель штамповой вставки для физического моделирования представлен на рисунок 4.4.

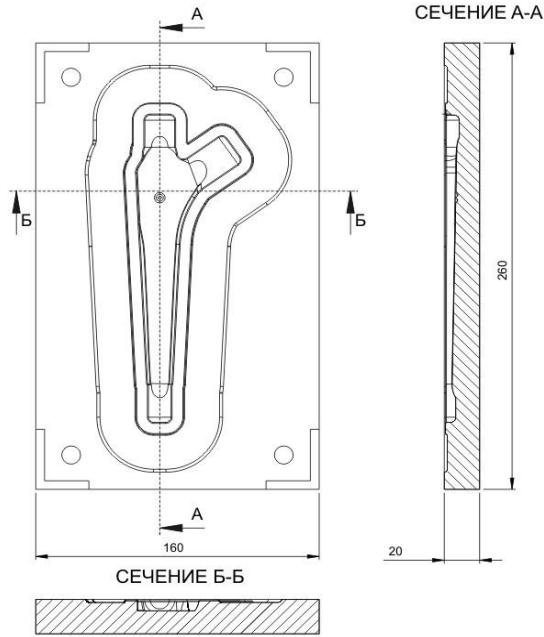


Рисунок 4.1 - Чертёж штампа с единичной схемой штамповки.

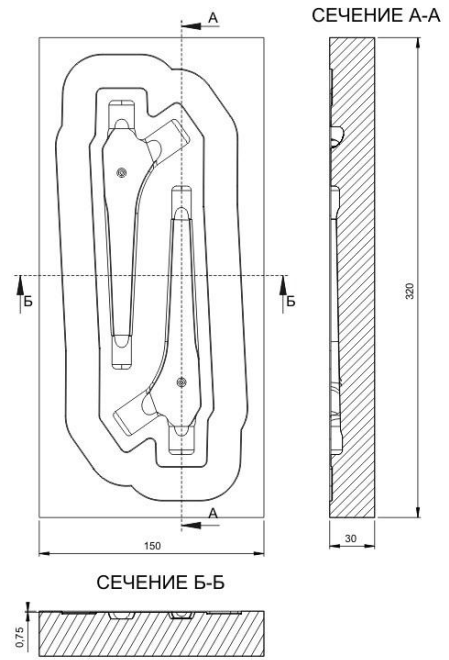


Рисунок 4.2 - Чертёж штампа со спаренной схемой штамповки бобышками внутри.

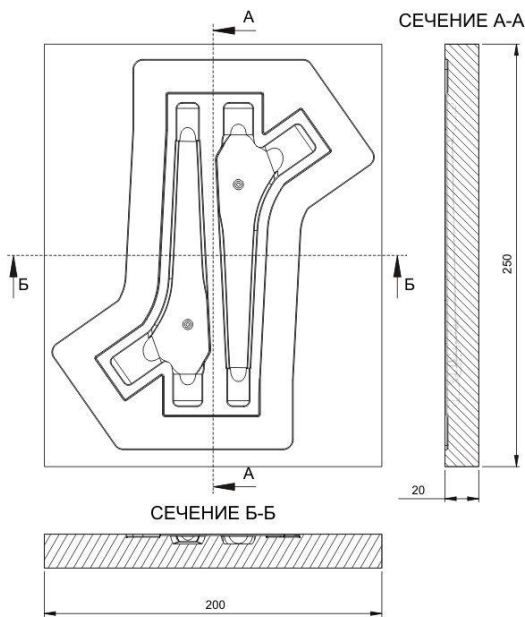


Рисунок 4.3 - Чертёж штампа со спаренной схемой штамповки бобышками наружу.

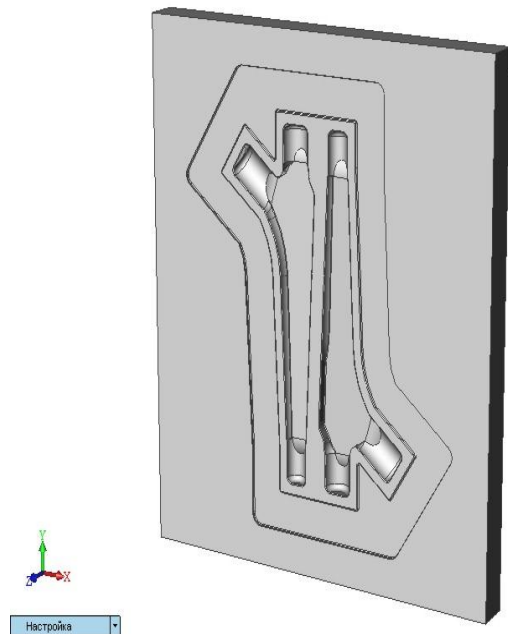


Рисунок 4.4 - Типовой пример построения 3D-модель штамповой вставки.

Фотографии изготовленных моделей штампов для физического моделирования объемной штамповки представлены на рисунок 4.5.



Рисунок 4.5 - Штампы для физического моделирования штамповки эндопротеза.

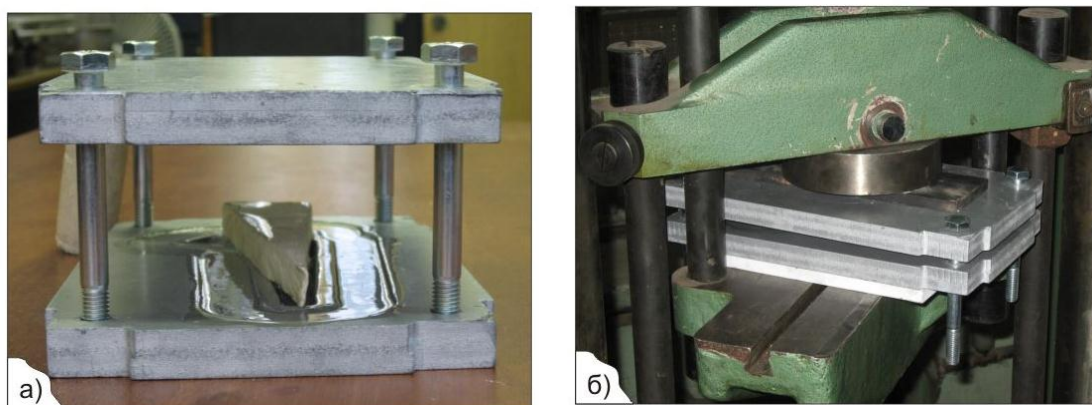


Рисунок 4.6 - Физическое моделирование штамповки эндопротеза.

а) заготовка в штампе

б) процесс штамповки на испытательной машине

В качестве материала штамповых вставок для физического моделирования штамповки были выбраны плиты МДФ двух типоразмеров:

- 1) Для схемы с единичной заготовкой - толщиной 15 мм;
- 2) Для схемы со спаренной заготовкой - толщиной 25 мм.

Выбор материала был сделан из соображений финансовых затрат на моделирование. Стоимость изготовления моделей из плит МДФ в 20 раз дешевле аналогичных из алюминиевого сплава. В связи с этим был выбран и модельный материал для заготовок - пластика. Модельная оснастка в сборе и процесс штамповки показаны на рисунок 4.6. На готовую заготовку и штамповые вставки наносилась смазка, заготовка укладывалась в нижний штамп, прижималась верхним штампом, и вся оснастка скреплялась направляющими. В ходе штамповки проверялось параллельное смыкание штампов, а так же равномерное распределение облоя на промежуточных этапах, после чего оснастка разбиралась, снимался верхний штамп и проводился анализ окончательного заполнения гравюры.

## 4.2. Физическое моделирование с помощью слоистой заготовки

Физическое моделирование рассматривается как метод исследования образцов для проведения экспериментальных испытаний, а также теоретический метод исследования с целью извлечения правдивых результатов и систематических законов, и рекомендаций с целью постановки конкретных практических задач. Формирование искомым закономерностей с поддержкой физического моделирования зачастую считается исключительно возможным методом экспериментального исследования и решения необходимых фактических задач. Физическое моделирование позволяет ускорять процессы, происходящие в течение длительного времени и, в противоположном случае, замедлить процессы, быстро протекающие с очень высокой скоростью. Вследствие чего делает исследование более полным эффективным.

Чтобы проанализировать течение внешних и внутренних слоёв заготовки была использована слоистая модель.

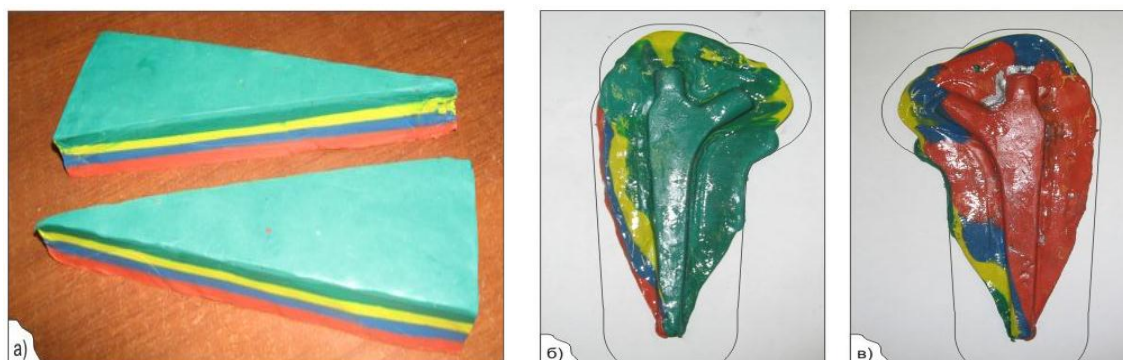


Рисунок 4.7 - Анализ течения поверхностных слоёв треугольной заготовки при моделировании схемы штамповки с единичной заготовкой.

а) многослойные заготовки для физического моделирования.

б) течение верхних слоёв

в) течение нижних слоёв

Для лучшего изучения формоизменения при деформации треугольной заготовки была проведена штамповка слоистой модели. Для изучения течения внутренних и внешних слоёв в теле эндопротеза применялся метод слоистых моделей [106]. Исходную заготовку выполняли из нескольких разноцветных слоёв модельного материала. Готовую поковку разрезали поперёк, и дополнительно вдоль оси разрезали боковую бобышку. Сопоставление исходной толщины слоёв и конечной толщины этих же слоев, но в каждой поперечном разрезе позволяло получить распределение деформации каждого слоя по всей длине поковки. Анализ течения поверхностных слоёв треугольной заготовки представлен на рисунок 4.7.

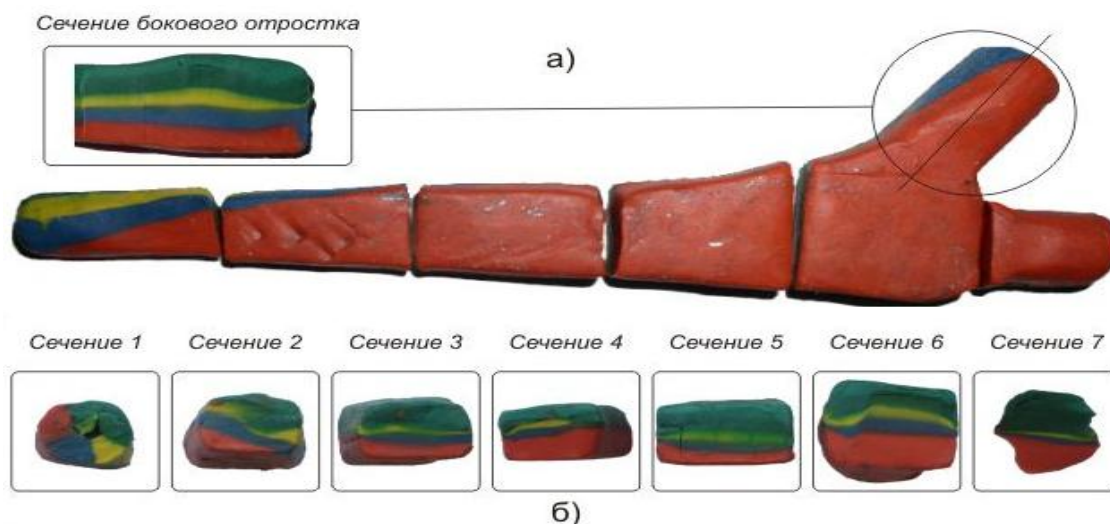


Рисунок 4.8 - Анализ течения внутренних слоёв треугольной заготовки при моделировании схемы штамповки с единичной заготовкой.

а) схема рассечения; б) общий вид рассечённой поковки и её сечения.

Результаты анализа показали, что верхний слой модели течет в сторону боковой бобышки, а нижний - в обратную сторону, при этом центральные слои практически полностью уходят в облой. Особое внимание стоит обратить на концевые части поковки, т.к. в предыдущем эксперименте именно в ней произошел зажим. В этот раз зажима не произошло, но на слоистой заготовке хорошо видно спиралевидное течение металла, что приводит к образованию брака, как и предполагалось ранее. Для анализа течения внутренних слоёв модели при штамповке кроме выявления основных направлений течения материала была рассчитана логарифмическая степень деформации каждого слоя по длине поковки. Полученную модель поковки разрезали на несколько частей и произвели замеры толщины каждого слоя во всех сечениях. Результат представлен на рисунок 4.8.

В таблице 4.2 представлено определение логарифмической степени деформации слоистой модели эндопротеза. Логарифмическая степень деформации в каждом сечении определялась по формуле:

$$\varepsilon_i = \ln\left(\frac{h_0}{h_i}\right) \quad (4.1)$$

где:  $h_0$  – исходная толщина слоя, мм;

$h_i$  – измеренная толщина слоя в указанном сечении, мм.

Таблица 4.2 - Определение логарифмической степени деформации слоистой модели эндопротеза.

|        |                      | Расстояние до сечения, мм                       |      |      |      |      |      |       |                 |       |
|--------|----------------------|---|------|------|------|------|------|-------|-----------------|-------|
|        |                      | Вдоль оси модели                                |      |      |      |      |      |       | Боковой бобышек |       |
|        |                      | 0   | 31   | 62   | 93   | 124  | 155  | 179   | 139             | 179   |
| № слоя | Исходная толщина, мм | Толщина слоя после штамповки $h_i$ , мм         |      |      |      |      |      |       |                 |       |
| 1      | 5,5                  | 5   | 4    | 4    | 3,5  | 5,5  | 4    | 7     | 5               | 7     |
| 2      | 4,5                  | 3   | 2    | 1    | 1,5  | 2    | 2    | 1     | 1,5             | 1,5   |
| 3      | 5                    | 5   | 2    | 1,5  | 2    | 2    | 2,5  | 1     | 2               | 2,5   |
| 4      | 5                    | 4,5   | 2,5  | 3    | 5    | 3    | 5,5  | 5,5   | 3               | 5     |
| № слоя | Исходная толщина, мм | Логарифмическая степень деформации $\epsilon_i$ |      |      |      |      |      |       |                 |       |
| 1      | 5,5                  | 0,10  | 0,32 | 0,32 | 0,45 | 0,00 | 0,32 | -0,24 | 0,10            | -0,24 |
| 2      | 4,5                  | 0,41  | 0,81 | 1,50 | 1,10 | 0,81 | 0,81 | 1,50  | 1,10            | 1,10  |
| 3      | 5                    | 0,10  | 1,01 | 1,30 | 1,01 | 1,01 | 0,79 | 1,70  | 1,01            | 0,79  |
| 4      | 5                    | 0,20  | 0,79 | 0,61 | 0,10 | 0,61 | 0,00 | 0,00  | 0,61            | 0,10  |

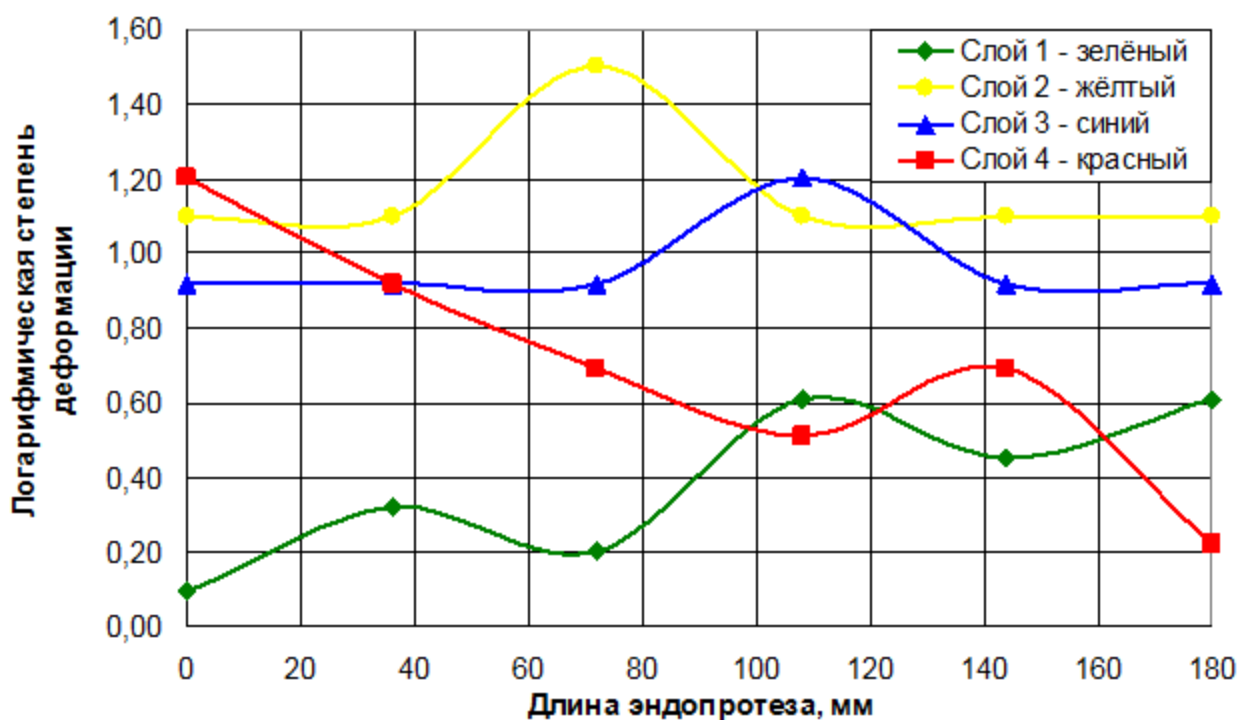


Рисунок 4.9 - График распределения логарифмической степени деформации по длине эндопротеза.

По полученным данным был построен график распределения логарифмической степени деформации по длине эндопротеза представленный на рисунке 4.9.

Анализ диаграммы показал, что внутренние слои получили большую степень обжатия, чем внешние. При этом обжатие верхнего слоя больше в концевой части поковки, а обжатие нижнего слоя - в области боковой бобышки.

#### **4.3. Физическое моделирование процесса штамповки эндопротезов**

Физическое моделирование процессов горячей штамповки, прокатки, а также прессования на образцах из модельных материалов получило распространение в качестве одного из основных способов экспериментальных исследований, обеспечивающих требование геометрического подобия при соблюдении сходства реологических характеристик модельного также натурального материалов также близких условиях контактного трения. С целью правильного физического моделирования следует, во-первых, определить требование подобия двух явлений - в модели и в натуральных испытаниях и, во-вторых, установить, как их использовать с целью проектирования реальных деформационных процессов [107].

##### **4.3.1. Физическое моделирование штамповки с единичной заготовкой**

Схема укладки цилиндрической заготовки в штамп и результаты формоизменения показаны на рисунок 4.10. Схема укладки треугольной заготовки, вырезанной из плиты, в штамп и результаты формоизменения представлен на рисунок 4.11.

В результате физического моделирования единичной штамповки из цилиндрической заготовкой, было получено удовлетворительное заполнение гравюры штампа, однако при этом наблюдается риск не заполнения боковая бобышка поковки, что собственно и произошло при компьютерном моделировании. Чтобы гравюра штампа заполнилась полностью, пришлось увеличить объем заготовки, т.е. увеличить расход металла, а это уже требует дополнительных финансовых затрат (если речь идет о производстве эндопротезов).

При этом стоит понимать, что боковая бобышка поковки является наиболее ответственной частью будущего эндопротеза, т.к. именно на неё приходится основная нагрузка. Поэтому не заполнение гравюры штампа или другой брак в этой части поковки недопустим.

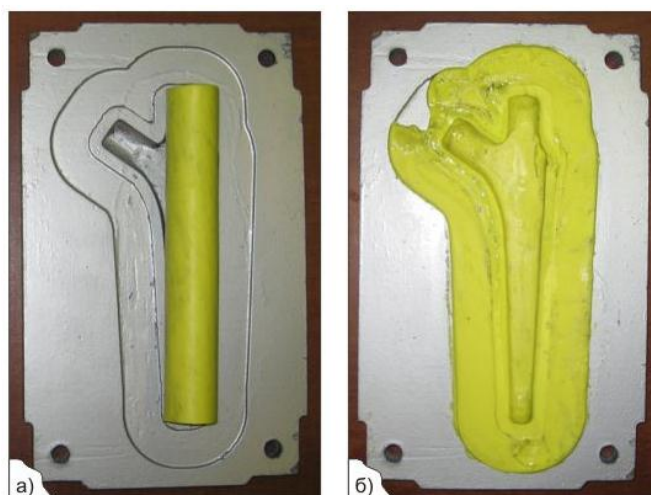


Рисунок 4.10 - Схема штамповки с цилиндрической заготовкой.

а) заготовка в штампе; б) отштампованная поковка.

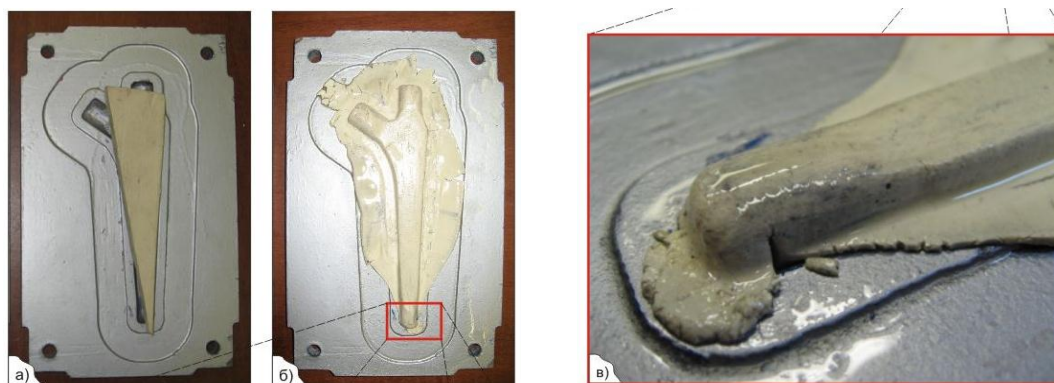


Рисунок 4.11 - Схема штамповки с треугольной заготовкой.

а) заготовка в штампе

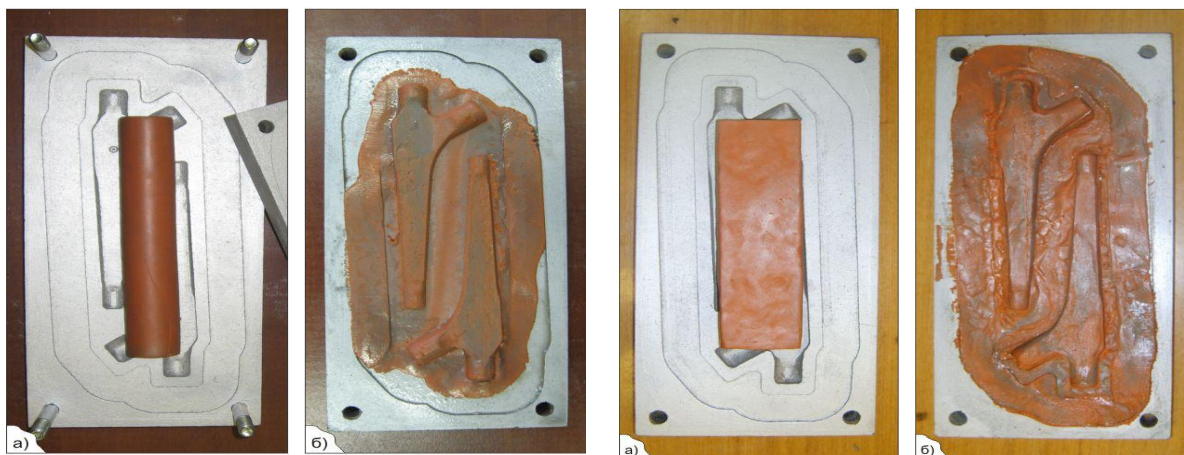
б) отштампованная поковка

По результатам физического моделирования можно сделать вывод: заполнение удовлетворительное. Боковая бобышка поковки эндопротеза заполнен полностью, однако, в месте концевой бобышки произошел зажим концевой части заготовки, что означает большую вероятность появления брака в этой области поковки. Но повышенное качество концевой части поковки и не нужно, поскольку она будет удалена при последующей механической обработке. По результатам компьютерного моделирования, было установлено, что при использовании трёх типов исходных заготовок: цилиндрической (вырезанной из прутка), профилированная и прямоугольной (вырезанной из плиты) для практического использования наиболее целесообразно применять первый и третий тип, для которых было проведено физическое моделирование.



#### 4.3.2. Физическое моделирование штамповки со спаренной заготовкой

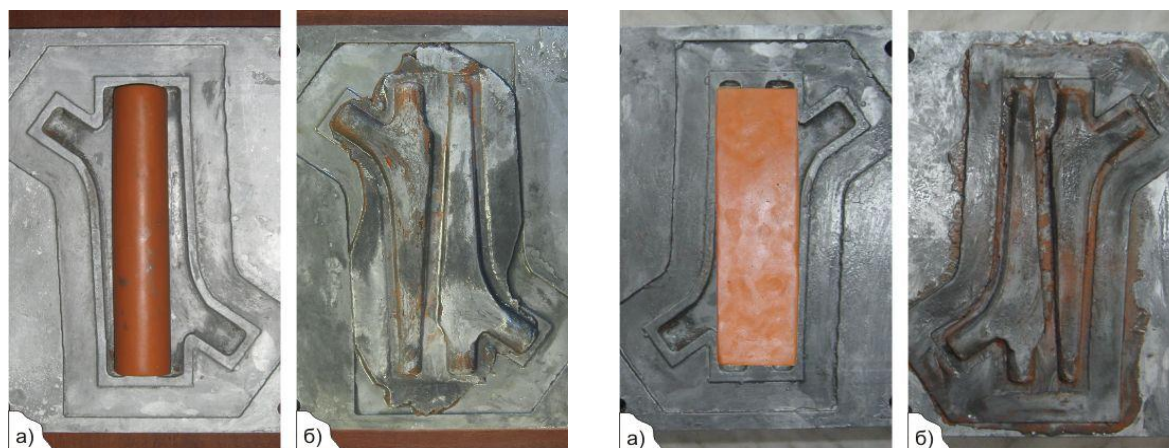
Результаты формоизменения при моделировании штамповки со спаренной заготовкой бобышками внутрь представлен на рисунок 4.12 и формоизменения заготовки при штамповки со спаренной заготовкой бобышками наружу представлен на рисунок 4.13.



С цилиндрической заготовкой

С заготовкой из плиты

Рисунок 4.12 - Схема штамповки со спаренной заготовкой бобышками внутрь.



С цилиндрической заготовкой

С заготовкой из плиты

Рисунок 4.13 - Схема штамповки со спаренной заготовкой бобышками наружу

а) заготовка в штампе.

а) заготовка в штампе.

б) отштампованная поковка.

б) отштампованная поковка.

Результаты штамповки цилиндрической заготовки показали хорошее заполнение гравюры штампа, с хорошим КИМ, а стоимость заготовки минимальной. Результаты физического моделирования спаренной штамповки показали, что наиболее рациональной является заготовка, вырезанная из плиты, поскольку в этом случае обеспечивается хорошее

заполнение гравюры штампа, максимальное использование материала и при этом изготовление такой поковки не будет дорогостоящим.

С целью снижения усилия штамповки в условиях реального производства, было принято решение изменить технологию штамповки поволоков эндопротеза и ввести промежуточную стадию штамповки для разделения потоков материала, что позволило снизить в два раза энергосиловые параметры процесса. В случае промышленного производства это должно привести к повышению стойкости штампов и снижению себестоимости. Результаты штамповки прямоугольной заготовки, показали очень хорошее заполнение гравюры штампа, но усилие деформации для этого варианта было почти в два раза большее, чем для прутковой заготовки. Поэтому, для снижения энергосиловых параметров процесса, была вновь использована промежуточная операция штамповки по разделению потоков материала. Как и в предыдущем эксперименте, мы получили снижение усилия штамповки и качественное заполнение материалом гравюры штампа. Разумеется, и в этом случае предполагается повышение стойкости штампов.

#### **4.4. Заключение по главе 4**

В ходе исследовательской работы был смоделирован процесс штамповки титановых эндопротезов в открытых штампах и изучены варианты заполнения гравюры штампа. На этом этапе исследовательской работы использовалось лишь физическое моделирование, однако, возможен и другой вариант построения эксперимента: совмещение компьютерного и физического моделирования.

Представлены результаты физического моделирования для различных схем, форм и типов заготовок. Позволили уточнить размеры исходных заготовок и их позиционирование относительно гравюры штампа для её полного заполнения на конечной стадии.

1. В ходе исследовательской работы был смоделирован процесс штамповки титановых эндопротезов в открытых штампах и особенности заполнения гравюры штампа.

2. Сравнение характера образования и формы облоя, а так же стадии формоизменения заготовки при штамповке позволило сделать заключение о хорошей сопоставимости результатов компьютерного моделирования с натурным экспериментах на модельных материалах.

3. По результатам физического моделирования, показано, что для повышения стойкости оснастки и снижения энергосиловых параметров процесса, следует ввести промежуточную операцию по разделению потоков материала.

4. Результаты физического моделирования штамповки единичной поковки показали, что

наиболее эффективным, с точки зрения максимального использования материала является использование треугольной или прутковой заготовки.

5. Результаты физического моделирования спаренной штамповки показали, что наиболее рациональной является заготовка из прутка, поскольку в этом случае обеспечивается хорошее заполнение гравюры штампа, максимальное использование материала и при этом изготовление такой поковки не будет слишком дорого, а размеры заготовки контролировать проще и риск появления дефектов меньше.

## Глава 5. Выбор технологии производства заготовок и её влияние на структуру поковки эндопротеза

### 5.1. Выбор рациональной заготовки под штамповка

Целью работы являлась разработка универсальной технологии штамповки для любого типа и качества исходной заготовки с целью минимизации расходов на производство и получения удовлетворительного и стабильного качества изделий. Поэтому следует использовать наиболее простую и дешевую технологию получения заготовки для последующей штамповки изделий из титановых сплавов, которая обеспечит требуемый набор эксплуатационных характеристик.

Как было установлено по результатам компьютерного и физического моделирования, для получения поковки эндопротеза в качестве заготовки для штамповки, с практической точки зрения цена/качество/трудоемкость/КИМ, лучше подходят прутковые заготовки. После анализа рынка сбыта титановых полуфабрикатов и возможностей имеющегося оборудования, в качестве предмета исследований для исходных заготовок были выбраны три заготовки из прутков диаметром 30 мм полученных разными способами.

Прутки были полученные тремя способами [90-93]: РСП, продольной прокаткой, ротационной ковкой и исследовались для сравнения их исходных микро и макроструктуры в продольном и поперечном направлении.

Радиально-сдвиговая прокатка (РСП) - позволяет получить прутки различного диаметра и небольшими партиями. Стоимость передела по этой технологии невелика. В работе использовался пруток лученный на производственном участке ОМД МИСиС.

Продольная прокатка - наиболее распространенный метод прокатки, при которой заготовка деформируется по высоте и принимает форму калибра между валками. Для исследований взяли пруток изготовленный на ПАО «ВСМПО-АВИСМА» по ОСТ1 90006-86 [90], который используется для изготовления особо ответственных изделий (в частности лопаток ГТД) в аэрокосмической технике и прекрасно подходит для производства эндопротезов [108, 109]. Получение прутков лопаточного качества продольной прокаткой является сложным технологическим процессом, кроме этого, требуется большой затрат для фундаментальных монтажных партий. В результате это подорожает цена выпускаемых изделий, несмотря на их отличное качество, и снижает конкурентность.

Ковка на радиально-ковочных машинах (РКМ) - позволяет обеспечить высокие степени обжатий, невысокие затраты на изготовление и эксплуатацию оборудования и инструмент. Несмотря на низкую производительность ротационнойковки по сравнению с прокаткой, но

ротационной ковкой возможно выпускать полуфабрикатов мелкого масштаба. Однако, ими полученные заготовки уступают по качеству выпускаемым другими методами [110].

Полученные заготовки исследовались на наличие структурной анизотропии, размерам макро и микрзерна и его параметров, на основе разделения, предложенного С.Г.Глазуновым [7-9] по структурным типу и баллу. Макроструктура титановых сплавов характеризуется десятибалльной системой 1-10. Микроструктура двухфазных титановых сплавов разделяется на 9 типов. Для обеспечения получения высококачественных изделий из титановых сплавов представляется необходимость стремиться к минимизации макро- и микроструктуры и повышению однородности по всему сечению полуфабриката. Микроструктура 1-3 типов обеспечивает более высокие значения пластичности, предела выносливости и наименьшую чувствительность к надрезу. Структуры образцов из сплава ВТ6 в зависимости от способа получения полуфабрикатов показаны в таблице 5.1.

Таблица 5.1 - Структуры образцов из сплава ВТ6 в зависимости от способа получения полуфабрикатов.

| Способы получения прутка                             | Макроструктуры, балл |            | Микроструктуры, тип |      |
|--|----------------------|------------|---------------------|------|
|  | Поперечная           | Продольная | Центр               | Край |
| РСП<br>Макро: 6 балл<br>Микро:4-5 тип                |                      |            |                     |      |
| Продольная прокатка<br>Макро:3 балл<br>Микро:2-3 тип |                      |            |                     |      |
| Ковка<br>Макро:8-10 балл<br>Микро:8-9 тип            |                      |            |                     |      |

Из данных, представленных в таблице 5.1 видно, что структура у продольно катанной заготовки изготовленной по ОСТ1 90006-86 является наиболее лучшей с мелкими и однородными зернами. Макроструктура которого однородна, соответствует 3 баллу. Исходя чего можно увидеть, что микроструктуры образцов, полученных данной технологией, относятся к 2 и 3 типам, с мелкими и однородными зернами, и глобулярной формой. Но эта технология достаточно сложная и многопереходная.

Микроструктуры прутка в продольном и поперечном направлении, полученного

способом РСП были изготовлены в соответствии ОСТ1 90173 [91] имеют удовлетворительную структуру. Макроструктуры соответствуют 6 баллу с небольшой неоднородностью структуры. Микроструктуры прутка соответствуют типам 4-5, обладает строением типа корзиночного плетения

Наихудшая структура замечается в кованных прутках с крупными и неоднородными зернами в центральной части прутка, соответствует 8-10 баллу. Такая структура носит пониженные значения пластичности, длительной прочности и выносливости. Микроструктуры полученного ковкой полуфабриката, относятся к 8 и 9 типам, имеют резкие очерченные границы и грубо игольчатые строение. Подобную структуру исправить путём термической обработки не возможно, для её устранения можно лишь применять повторным горячем деформированием в  $(\alpha + \beta)$  -области.

На представленных макроструктурах видно их отличие по свойствам за счёт неоднородной структуры исходной заготовки в зависимости от направлений прокатки и сечения. Одним из важнейших свойств материала, применяемых для изготовления эндопротезов является изотропность. При горячей штамповке вызывается необходимость учитывать изотропность материала, так как рассматриваемые прутковые заготовки, полученные прокаткой, имеют анизотропию структуры вдоль и поперек направления прокатки, следовательно приводит к отличию по механическим свойствам.

Температура заготовок принята равной 900-920°C для исследования их формоизменения при ковке. В качестве заготовок для осадки выбран прутки из титанового сплава ВТ6, диаметр которого равен 30 мм, являющимся оптимальным для хорошего заполнения гравюры штампа. При этом высота штамповок эндопротеза в соответствии с расчетами равна 13 мм [111- 113]. Степень деформации рассчитывается по формуле:

$$\varepsilon = \frac{H_0 - H_1}{H_0} \cdot 100\% \quad (5.1)$$

Где:  $\varepsilon$  - степень деформации, %

$H_0$  - высота заготовки до осадки, мм

$H_1$  - высота заготовки после осадки, мм

Рассчитываем степень деформации по формуле

$$\varepsilon = \frac{30 - 13}{30} \cdot 100\% = 56,7\%$$

Режим и степень деформации были выбраны по принципу подобия с данными математического моделирования и реального производства. Величина степени деформации

больше 50% удовлетворяет условиям, требуемым к структуре.

Фотографии структуры титанового сплава ВТ6 полученная после горячей штамповки образцов представлены в таблице 5.2. Микроструктура поковки эндопротеза, определяет весь комплекс свойств изделия поэтому, получив удовлетворительные параметры структуры, мы сможем гарантировать высокие эксплуатационные характеристики.

После горячей осадки во всех случаях наблюдается образование более однородной структуры, чем в исходных заготовках. Например, можно увидеть, что на заготовке из кованного прутка макроструктура с крупном зерном и неоднородна, нет четкости в периферийной зоне, но её качество соответствует 4-5 баллам по классификации. Микроструктура заготовки оценивалась в соответствии 4-5 типам по предложенной классификации, т.е. с значительным уменьшением размера зерна по сравнению с исходной заготовкой, практически в 2 раза.

В заготовке, полученной методом РСП после горячей деформации также, получилась более однородная и мелкозернистая структура, чем в исходном прутке. Их макроструктура относится к 3 баллу, уменьшается в 2 раза по сравнению с исходной заготовки до деформации, с отсутствием периферийной зоны. Размеры микрзерна после деформации замечены меньше, чем в исходном состоянии, и соответствуют 3-4 типу, с более глобулярной и однородной структурой. Обладая такой структуры, полуфабрикаты имеют высокие жаропрочностные и ползучестные характеристики при сочетании пластичности, выносливости и термической стабильности.

Полученные структуры после горячей деформации титанового сплава ВТ6 на продольно катанном прутке по ОСТ1 90006–86, как и ожидалось, имеют самую однородную структуру, а размер зеренной структуры уменьшился по сравнению с исходной заготовкой. На макроструктуре после осадки видна не большая периферийная зона, макроструктуры соответствуют 1 и 2 баллу, получены равноосная микроструктура по всему сечению заготовки, размер зерна практически одинаковый и соответствуют 1 типу. Обладая подобной структурой, одними из наилучших свойств изделий являются высокие пластичности, и предел выносливости, и наименьшая наклонность к надрезу. В таблице 5.3 представлены макроструктура и микроструктура заготовок после штамповки. Исходя чего замечается структурная однородность заготовок после штамповки различных направлениях, как в продольном, так и в поперечном. Пруток, полученный по более дешевой технологии радиальных сдвиговой прокатки по своим характеристикам, вполне соответствует параметрам структуры, полученной по Лопаточной технологии. Для производства заготовок была выбрана технология РСП, она проще и универсальнее, а характеристики проката не уступают более сложным и дорогим технологиям производства заготовки.

Таблица 5.2 - Структуры после горячей деформации прутков титанового сплава ВТ6.

| Способы получения прутка                               | Макроструктуры, балл |            | Микроструктуры, тип |      |
|--|----------------------|------------|---------------------|------|
|  | Поперечная           | Продольная | Центр               | Край |
| РСП<br>Макро: 3 балл<br>Микро: 3-4 тип                 |                      |            |                     |      |
| Продольная прокатка<br>Макро: 1-2 балл<br>Микро: 1 тип |                      |            |                     |      |
| Ковка<br>Макро: 4-5 балл<br>Микро: 4-5 тип             |                      |            |                     |      |

Таблица 5.3 - Структуры до и после горячей деформации титанового сплава ВТ6.

| Способы получения прутка                                     | Макроструктуры, балл |                  | Микроструктуры, тип |                  |
|--|----------------------|------------------|---------------------|------------------|
|  | Исходная             | После деформации | Исходная            | После деформации |
| РСП<br>Макро: 6→3 балл<br>Микро: 4-5→3-4 тип                 |                      |                  |                     |                  |
| Продольная прокатка<br>Макро: 3→1-2 балл<br>Микро: 2-3→1 тип |                      |                  |                     |                  |
| Ковка<br>Макро: 8-10→4-5 балл<br>Микро: 8-9→4-5 тип          |                      |                  |                     |                  |



## 5.2. Оптимизация параметров штамповки с использованием ТВО

ТВО - это эффективный метод модификации микроструктуры и свойств деформируемых титановых сплавов. Метод основан на временном легировании титановых сплавов водородом, который, будучи  $\beta$  - стабилизатором, изменяет соотношение фаз, кинетику фазовых превращений и позволяет разрабатывать новые термические и термомеханические процессы для улучшения обрабатываемости и технологичности, измельчение зерна и улучшение механических свойств деформируемых титановых сплавов. Повышение прочности и пластичности, лучшая обрабатываемость в горячем состоянии являются некоторыми из многих преимуществ ТВО. Особенно привлекательным вариантом использования ТВО может быть для обработки трудно-деформируемых титановых сплавов.

Для этого был проведен отжиг образцов в установке Сивертса до получения концентраций водорода от 0,45% до 0,5% при температуре 850°C, с длительностью выдержки  $\tau_{\text{в}} = 1$  час.

По полученным результатам металлографического анализов видно, что введение водородом в сплав ВТ6 получили мартенситную структуру (в таблице 5.4).

Увеличение в титановых сплавах атомного объема  $\beta$ -фазы и уменьшение атомного объема  $\alpha$ -фазы обуславливаются дополнительными легированием водородом. Уменьшение объема последней фазы происходит за счёт увеличения в ней алюминиевой концентрации. Вследствие этого объемный эффект  $\beta \rightarrow \alpha$  -превращения увеличивается при последующей его дегазации за счет увеличения водородной концентрации в сплаве ВТ6.

Легирование водородом увеличивает пластичность и снижает напряжение текучести в широком диапазоне температур, включая температуры, используемые для традиционной горячей обработки сплав ВТ6, что позволяет использовать большие деформации при более низких температурах без разрушения.

Дополнительные возможности для модификации микроструктуры появляются, когда этап горячей обработки включен в ТВО. Горячая деформация в  $(\alpha+\beta)$  области ускоряет фазовые и структурные превращения и приводит к образованию очень мелких равноосных зерен.

Таблица 5.4 - Исходная структура после наводороживания.

| Способы получения прутка | Структуры после наводороживания титанового сплава ВТ6<br>850°C, $\tau_{\text{в}} = 1$ час, $C_{\text{H}} = 0,45 \pm 0,5\%$ |                |      |                |      |
|--------------------------|--|----------------|------|----------------|------|
|                          |  | Макроструктуры |      | Микроструктуры |      |
|                          |  | Центр          | Край | Центр          | Край |
| РСП                      |  |                |      |                |      |
| Продольная прокатка      |  |                |      |                |      |
| Ковка                    |  |                |      |                |      |

Таблица 5.5 - Влияние ТВО на микроструктуру прутков титанового сплава ВТ6 после деформации.

| Способы получения прутка | После обезводороживающего отжига<br>ВО: 800°C; 5 часов |      |     | После обезводороживающего отжига<br>ВО: 625°C; 8 часов |      |     |
|--------------------------|--|------|-----|--|------|-----|
|                          | Центр  | Край | HRC | Центр  | Край | HRC |
| РСП                      |  |      | 32  |  |      | 39  |
| Продольная прокатка      |  |      | 33  |  |      | 40  |
| Ковка                    |  |      | 34  |  |      | 40  |

Благодаря применению ТВО удалось существенно снизить температуру горячей деформации заготовок из сплава ВТ6 на 20% с 900 до 750°C, что благоприятно скажется на ресурсе штампового инструмента и экономике производства. Очень тонкая равноосная ( $\alpha+\beta$ ) структура формируется в гидрированных сплавах во время горячей деформации в диапазоне температур ( $\alpha+\beta$ ) области; Образцы, содержащие водород, имели более высокую пластичность, чем образцы без водорода. Уменьшение размера зерна возможно привело к повышению пластичности и снижению прочности по сравнению с негидрированными образцами с пластинчатой структурой; однако эффект измельчения зерна был ниже, чем от легирования водородом. После термоводородной обработки мы получили мартенситную структуру.

Исходя из вышеперечисленных закономерностей, были разработаны и опробованы на образцах с различным способом получения, сплава ВТ6 два режима вакуумного отжига: первый режим: 800°C в течение 5 часов; и второй режим: 625°C, 8 часов. Итоговая водородная концентрация при всех режимах получилась не более 0,008 %.

ТВО уменьшила размер зерна во всех исследуемых образцах. Уменьшение размера зерна приведет к росту значений прочности и пластичности после ТВО. Повышение прочности и пластичности исходя из оптимизации структуры заготовок будет достигнуто в результате обработки ТВО по сравнению с необработанным грубым неравноосными структурами в заготовках ВТ6.

Типичная структура ( $\alpha + \beta$ ) глобулярного типа для титановых сплавов с содержанием  $\alpha$  - фазы по объему около 90 % формируется с помощью реализации режима вакуумного отжига. Это связано с тем, что при  $\beta \rightarrow \alpha$ -превращении процессы роста  $\alpha$ -фазы преобладают над процессами ее зарождения. Кроме того, основные легирующие элементы, включающие в сплавах, могут полностью перераспределяться между  $\alpha$ - и  $\beta$  - фазами при высокой температуре вакуумного отжига. Вторичная  $\alpha$ - фазы преобладает над процессами роста перичной при относительной низкой температуре вакуумного отжига по второму режиму, что обуславливается пониженными коэффициентами диффузии основных легирующих элементов. Таким образом при ТВО за счет объемного эффекта  $\beta \rightarrow \alpha$  -превращения было получено дополнительное измельчение зерен в образцах прутков из сплава ВТ6.

ТВО имеет явное преимущество по сравнению с другими подходами для измельчения зерна и улучшения комплекса механических свойств, где обычные термомеханические методы не могут быть использованы, и именно для таких деталей может быть достигнуты наиболее значительные улучшения механических свойств с использованием ТВО. Структура в образцах существенно измельчится с применением ТВО. При этом твердость повышается до 32-40 HRC, что приводит к повышению качества поверхностной полируемости и,

соответственно, обеспечивает улучшение эксплуатационных свойства изготовленных изделий. Влияние ТВО на микроструктуру титанового сплава ВТ6 после деформации представлены в таблице 5.5.

Мы использовали 2 режима термообработки получив более мелкую структуру, но после отжига 625°C, 8 часов структура была более однородная и равноосная, даже в ковальной заготовке. ТВО значительно улучшило макро- и микроструктуру, уменьшив размер зерна после горячей деформации в 2 раза по сравнению с традиционной технологии штамповки. ТВО может расширить области применения и номенклатуру изделий из титановых сплавов. Получением материала с субмикронной структурой, позволяет получить более высокий уровень механических свойств. Предложенную универсальную технологию горячей штамповки титановых сплавов можно применять не только для штамповки эндопротезов, а для штамповки любых изделий из титановых сплавов.

### 5.3. Заключение по главе 5

Таким образом, по результатам исследование можно сделать следующие выводы:

1. Установлено, что в исходной заготовке, не зависимо от способа получения, присутствует структурная анизотропия, что отрицательно влияет на эксплуатационные характеристики эндопротеза.

2. После деформации по предложенной технологии, в  $(\alpha+\beta)$  - области при 900°C со степенью деформации более 50% на всех образцах макро- и микроструктура «облагородилась», зерно стало более мелким и равноосным. Причем, и тип и балл структуры удалось уменьшить практически в 2 раза. Предложенные параметры горячей деформации позволили существенно уменьшить анизотропию, как макро, так и микроструктуры.

3. В качестве рациональной исходной заготовки были выбраны прутки полученные способом РСП. Использование технологии РСП позволит получить небольшие партии прутков и облегчить варьирование размеров заготовки, в соответствии с количеством заказов на эндопротезы разного размерного диапазона, что повысит КИМ при штамповке.

4. Благодаря применению ТВО удалось снизить температуру горячей деформации заготовок из сплава ВТ6 на 20% с 900 до 750°C, что благоприятно скажется на ресурсе штампового инструмента и экономике производства.

5. ТВО значительно улучшило макро- и микроструктуру, уменьшив размер зерна после горячей деформации в 2 раза по сравнению с традиционной технологии штамповки. Получением материала с субмикронной структурой, позволяет получить более высокий уровень механических свойств.

6. ТВО может расширить области применения и номенклатуру изделий из титановых сплавов. Предложенную универсальную технологию горячей штамповки титановых сплавов можно применять не только для штамповки эндопротезов, но и для штамповки любых изделий из титановых сплавов.

## Глава 6. Пробная штамповки эндопротезов из титанового сплава ВТ6

### 6.1. Выбор термомеханические режимы штамповки эндопротезов

В настоящее время для изготовления эндопротезов использовали технологию литья с последующей механической обработки, это дорого и не всегда обеспечивает требуемый уровень механических свойств. Необходимость повысить качество и эксплуатационные характеристики, снизить стоимость и трудоёмкость производства эндопротезов заставило обратиться к процессам горячая объёмная штамповка. В соответствии с вышесказанным, горячая объёмная штамповка входит в круг наибольших узнаваемых технологий для получения изделий из титановых сплавов с любой сложностью формы.

В работе предлагается универсальная технология горячей штамповки заготовок, изготовленных из титановых сплавов, что позволит получить качественную и главное не дорогую продукцию. По результатам исследования предлагаются две взаимодополняющие схемы термомеханических режимов штамповки: Первый: на основе традиционных подходов по рассчитанным режимам. На рисунок 6.1 представлены моделирование термомеханические режимы штамповки титановых поковок: Нагрев заготовки до 1100°C с последующей черновой штамповкой на промежуточный размер; Второй: С использованием ТВО - когда требуется получение, улучшенных свойств для изделий из титановых сплавов. Нагрев заготовки до 960°C и их штамповка на окончательный размер. На рисунок 6.2 представлены моделирование термомеханические режимы штамповки титановых поковок с ТВО. Благодаря применению ТВО удалось снизить температуру горячей деформации заготовок из сплава ВТ6 с 900 до 750°C.

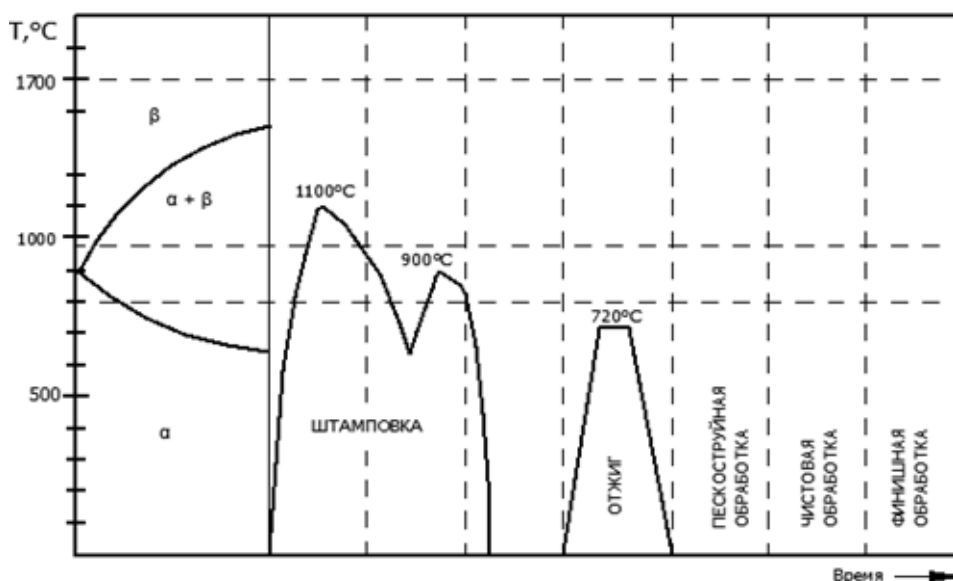


Рисунок 6.1 - Схема термомеханические режимы штамповки титановых поковок.

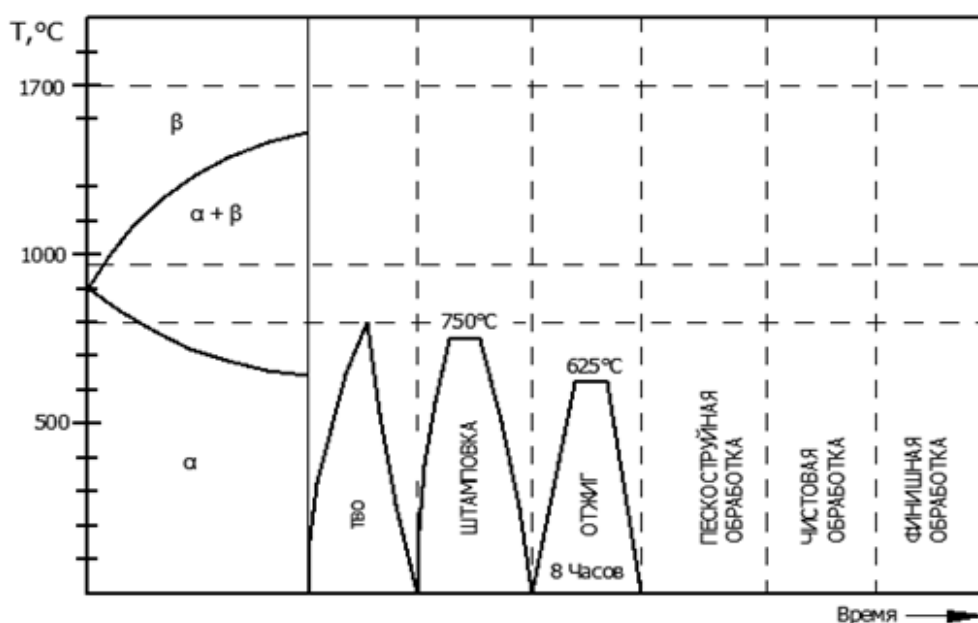


Рисунок 6.2 - Схема термомеханические режимы штамповки титановых поковок с ТВО.

Для получения титановых заготовок с хорошей структурой и низким газо- насыщением требуется минимизировать время нагрева и выдержки в печи. Поскольку деформация сплавов на основе титана неравномерна, и для получения структуры с однородностью и высоких механических свойств материал должен подвергаться большой общей деформации.

Рациональная степень деформации за один периода нагрева (подогрева) при объемной штамповке составляет 40-50% в  $(\alpha+\beta)$  -области и 70% - в  $\beta$ - области, соответственно. Метод, способствующий измельчению зеренной структуры, заключается в комбинации операции  $\beta$ -обработки последующей  $(\alpha+\beta)$  -деформации. Исследования показали, что минимально необходимые степени  $(\alpha+\beta)$  -деформации составляет всего 5-10%, а в реальных заготовках с учетом неоднородности деформации 20-30%. Следовательно, предварительная  $\beta$ -деформация позволяет повысить однородность структуры в условиях неоднородности деформации с меньшим суммарным уковкой.

При температурах, соответствующих  $(\alpha+\beta)$  -области, происходит наклеп и образуются центры рекристаллизации, при штамповке, формируется мелкозернистая структура, которая после проведения окончательнойковки при температурах  $(\alpha+\beta)$  - нагрев (подогрев) до 900°C дает хорошее сочетание мелкозернистой макро и микроструктуры в пределах 1-6 типов. Интенсификация охлаждения после завершения рекристаллизации способствует получению более мелкозернистой структуры, так как ограничивает время для роста зерен.

## 6.2. Разработка изготовления штамповых вставок

Как было указано в 3.3 (Проектирование конструкции штамповых вставок), был разработан чертёж поковки, который использовали для построения 3-модели и проектирования штамповой оснастки.

Материал для штампов выбирают в зависимости от температурных и силовых условий работы штампов, а также от технологии штамповки, вида оборудования и характера его работы. Рабочие детали штампа должны обладать рядом специфических свойств, следует учитывать, что титановые сплавы подвергаются обработке давлением при высоких температурах (порядка 1000°C), обладают высокой прочностью; кроме того, в большинстве случаев требуется, подогреть штампов перед штамповкой до температуры не ниже 250-300°C [114].

Технология изготовления штампов для титановых сплавов мало отличается от обычной. Однако высокие требования, предъявляемые к чистоте поверхности готовых изделий из титана и его сплавов, и трудность обработки поверхности готовых изделий (шлифовки, полировки и т. п.) создает определенные трудности в производстве. Исходя из вышесказанного, для изготовления штампов, применяемых для штамповки эндопротезов, была выбрана инструментальная сталь 5ХНМ [115]. Для изготовления штамповой вставки была выбрана инструментальная сталь 5ХНМ [116, 117]. Химический состав и твердость после закалки стали 5ХНМ приведен в таблице 6.1.

Таблица 6.1 - Химический состав и твердость после закалки стали 5ХНМ.

| Химический состав стали 5ХНМ, % (по ГОСТ 5950–2000)   |  |         |         |                                  |          |          |         |
|---|--|---------|---------|----------------------------------|----------|----------|---------|
| C   | Si   | Mn      | Cr      | W                                | V        | Mo       | Ni      |
| 0.5-0.6   | 0.1-0.4                                    | 0.5-0.8 | 0.5-0.8 | 0.5-0.8                          | 0.15-0.3 | 0.15-0.3 | 1.4-1.8 |
| Твердость после закалки инструментальной легированной |  |         |         |                                  |          |          |         |
| Марка стали   | Температура, °С,<br>Среда закалки образцов |         |         | Твердость HRC,<br>(HRC) не менее |          |          |         |
| 5ХНМ  | 830-860, масло                             |         |         | 57 (56)                          |          |          |         |

Режимы термообработки штампов из стали 5ХНМ для придания ей необходимых свойств:

1. нагрев в печь при 650±10°C при выдержке в ней 2 часа, подогреть до температуры до 850°C, и выдержка в течение 2 часа.
2. закалка 850±10°C, выдержка 1,5 часа, в масле охлаждение.



3. отпуск  $520 \pm 10^{\circ}\text{C}$ , выдержка 6 часов, охлаждение в воздухе, твердость: 40–45 HRC. Твердость после закалки стали 5ХНМ приведена в таблице 6.1 [114-117].

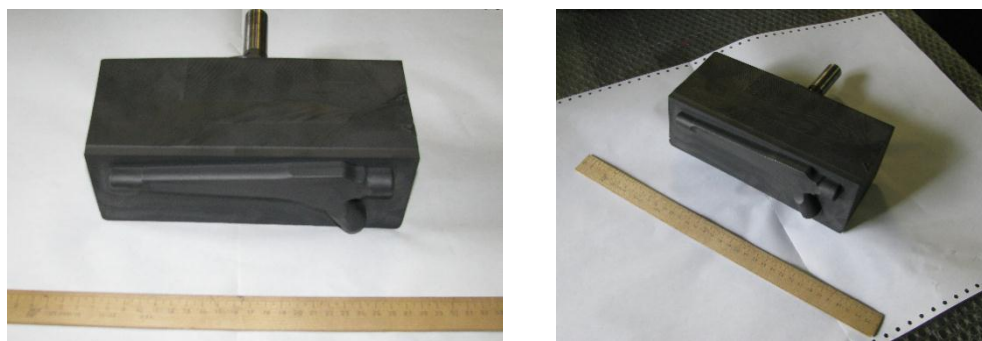


Рисунок 6.3 - Графитовый электрод.

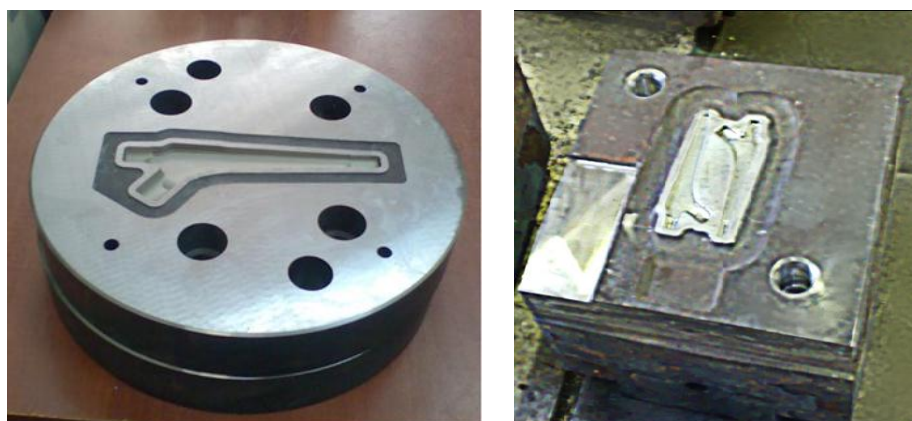


Рисунок 6.4 - Типовой пример штамповой вставки из стали 5ХНМ.

Дальнейшие работы по получению штамповых вставок из стали 5ХНМ включали:

- проектирование графитного электрода для прожига гравюры штампа.
- изготовление штамповых вставок из стали 5ХНМ.
- механическую обработку поковок с выборкой полости облойной канавки на рабочих поверхностях;
- термообработку штамповых вставок.
- прожиг гравюры штампа.
- слесарную доводку поверхности гравюры, порога и облойной канавки.

По чертежам разработанной поковки эндопротеза разработанной в среде Solid Works, был изготовлен графитовый электрод (рисунок 6.3), для прожига гравюры штампа на электроэрозионном станке AGIETRON 100С. штамповая вставка после обработки на фрезерном станке, далее гравюру штампа доводили с использованием ручного инструмента. Фотографии изготовленных штампов представлены на рисунок 6.4.

### 6.3. Проведение пробного штамповки эндопротезов из титанового сплава ВТ6

После изготовления штамповой вставки, для изготовления пробной партии эндопротезов и проверки разработанной универсальной технологии штамповки ее передали на «ГКНПЦ имени М.В.Хруничева» для изготовления пробной партии эндопротезов с целью их дальнейшего исследования.

Пробную партию эндопротезов изготавливали из прутка ВТ6 (полученного радиально сдвиговой прокаткой на базе ОМД МИСиС), по следующей технологии [118]:

- Нагрев заготовки до 1100°C с последующей черновой штамповкой на промежуточный размер;

- Нагрев заготовки до 960°C и их штамповка на окончательный размер со степенью деформации в пределах 30-50%.

Изготовление опытной партии эндопротезов осуществляли на паровоздушный ковочном молоте двойного действия (арочного типа) М1345.

Опытная штамповка эндопротеза и поковки эндопротезов после горячей штамповки представлены на рисунок 6.5 и 6.6.

При осадке на рельефных бойках металл преимущественно деформируется лишь под выступами рельефных поверхностей. Соответственно, вместе монолитной области затрудненной деформации получается ряд менее развитых и менее глубоких зон. Для того чтобы вся площадь заготовки была обжата рельефными выступами, осадку проводили за несколько ударов.

Дальнейшая обработка поковок эндопротезов проводилась по стандартной технологии:

- Отжыг;
- Механическая обработка;
- Пескоструйная обработка;
- Чистовая обработка;
- Финишная обработка.

На рисунок 6.6 видно, что течение металла соответствует, как физическим, так и математическим моделям используемым при разработке универсальной технологии штамповки титановых сплавов.

Для сравнения механических свойств применяли разрывную машину: исходного прутка используемого для штамповки, отливки полученной по старой технологии и штампованной заготовки эндопротеза (представлены в таблице 6.2).



Рисунок 6.5 - Опытная штамповки эндопротезов.



Рисунок 6.6 - Поковки эндопротезов.

Таблица 6.2 - Механические свойства.

| Испытанные образцы     | Механические свойства |              |            |                         |
|------------------------|-----------------------|--------------|------------|-------------------------|
|                        | $\sigma_b$ , МПа      | $\delta$ , % | $\psi$ , % | КСУ, Дж/см <sup>2</sup> |
| Пруток РСП (Заготовка) | 895                   | 12           | 32         | 35                      |
| Отливка эндопротеза    | 825                   | 6            | 16         | 30                      |
| Поковка эндопротеза    | 925                   | 14           | 34         | 38                      |

Сравнительный анализ механических свойств эндопротезов полученных литьем и по новой технологии, показывает, что предложенная технология обеспечивает более высокие свойства, что повышает срок службы эндопротеза после установки. Из данных таблицы 6.2, видно, что при сравнении с заготовками эндопротезов, полученных литьем и вырезанных из прутка, механические свойства и структура поковок превосходят по своим показателям.

Таким образом, полученные результаты штамповки по предлагаемой технологии штамповки подтвердили адекватность используемых моделей и позволили значительно улучшить надежность и эксплуатационные характеристики готовых изделий.

#### **6.4. Заключение по главе 6**

1. По разработанной технологии изготовлена опытная партия эндопротезов. Подтверждено адекватность использованной математической модели горячей деформации и совпадение с результатами физического моделирования штамповки эндопротезов.

2. Разработка технологии горячей штамповки эндопротезов имеет несколько преимуществ по сравнению с механической обработкой из плиты, отливки и её можно рекомендовать к использованию в изготовлении эндопротезов. При сравнении с заготовками эндопротезов, полученных литьем и вырезанных из плиты макро и микроструктура структура поковок лучше, а механические свойства превосходят по своим показателям на 10-15%.

## ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. На основании компьютерного моделирования проанализировано влияние формы и типа исходной заготовки на технологические параметры процесса горячей объемной штамповки. Проведен выбор рациональной схемы объемной штамповки, анализ энергосиловых параметров деформирования, а также определение формы и размеров заготовки.

2. Результаты компьютерного моделирования показали, что единичные штамповки лучше получать из плиты треугольной формы, что даёт максимальные значения КИМ при рациональных показателях интенсивности деформаций, усилия штамповки и распределении температуры и заполнение гравюры штампа. Оценка усилия деформирования при штамповке спаренной заготовки показала, что при расположении заготовки бобышками наружу наименьшие усилия при штамповке из плиты, а при расположении бобышками внутрь при штамповке из профилированной заготовки.

3. Физическое моделирование дает возможность оценить характеристики течения металла при горячей деформации в штампе, полноту формоизменения поковки и адекватность выбора заготовки. Результаты физического моделирования штамповки единичной поковки показали, что наиболее эффективным является использование треугольной заготовки; а для спаренной штамповки будет прутковая заготовка, что обеспечивает хорошее заполнение гравюры штампа и минимальное усилие деформации.

4. На основе проведенных исследований была разработана технология штамповки эндопротезов из титанового сплава ВТ6 и установлено, что наиболее рациональным для их эффективного производства возможно использование прутковой заготовки, полученной методом РСП. Разработаны эскиз штамповки и штамповые вставки для изготовления опытной партии поковок эндопротезов.

5. После деформации и ТВО привело к дальнейшему измельчению зерна, которое стало более мелким и равноосным. Тип и балл структуры уменьшился ещё в 2 раза, при этом анизотропия практически отсутствует. Благодаря применению ТВО удалось снизить температуру горячей деформации с 900 до 750°С, что благоприятно скажется на ресурсе штампового инструмента и экономике производства.

6. Предложенную универсальную технологию горячей штамповки титановых сплавов можно применять не только для штамповки эндопротезов, но и для штамповки любых изделий из титановых сплавов.

7. По разработанной технологии изготовлена опытная партия эндопротезов. Подтверждена адекватность использованной математической модели горячей деформации и

её совпадение с результатами физического моделирования штамповки эндопротезов из сплава ВТ6. При сравнении с заготовками эндопротезов, полученных литьем и вырезанных из плиты макро и микроструктура структура поковок лучше, а механические свойства превосходят по своим показателям на 10-15%.

## Список литературы

1. Колачев Б. А., Ливанов В. А., Буханова А. А. Механические свойства титана и его сплавов. - М.: Металлургия, 1974. - 544 с.
2. Ильин А.А., Скворцова С.В., Мамонов А.М., Карпов В.Н. Применение материалов на основе титана для изготовления медицинских имплантатов. *Металлы*. 2002. №3. 97- 105с.
3. Ильин А.А, Калачёв Б.А, Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник. - М.: ВИЛС-МАТИ. 2009. - 520 с.
4. Глазунов С.Г, Моисеев В.Н. Конструкционные титановые сплавы. - М.: Металлургия, 1974. - 368 с.
5. Цвиккер У. Титан и его сплавы. - М.: Металлургия, 1979. - 512 с.
6. В. Н. Моисеев, Ф. Р. Куликов, Ю. П. Кириллов и др. Сварные соединения титановых сплавов. - М.: Металлургия, 1978. 248 с.
7. ГОСТ 19807-91: Титан и сплавы титановые деформируемые.
8. Белов В.Д. и др. Вакуумная плавка и производство фасонных отливок из титана и титановых сплавов. Учебное пособие. - М.: МИСиС, 2013. - 107 с.
9. Носова Г.И. Фазовые превращения в сплавах титана. М.: Металлургия, 1968. - 181 с.
10. Касаткина С.Н. Применение титана в промышленности. М.: 1970. - 140 с.
11. А. Г. Братухин, Б. А. Колачев, В. В. Садков и др. Технология производства титановых самолетных конструкций. - М. : Машиностроение, 1995. - 443 с.
12. Нгуен Суан Зунг. Моделирование технологических процессов сверхпластической формовки оболочек из двухфазных титановых сплавов. дис. ...канд. техн. наук. Москва - 2014. - 191 с.
13. Никольский Л.А. Обработка жаропрочных сплавов. М.: АН СССР, 1960. 108с.
14. Пульцин Н.М. Взаимодействие титана с газами. - М.: Металлургия, 1969. 217с.
15. Безручко И.И. Индукционный нагрев для объемной штамповки. Л.: Машиностроение, 1987. - 126 с.
16. Кузнецов М.В., Шалаева Е.В., Медведева Н.И., Ивановский А.Л. Химия поверхности раздела титан-газ: эксперимент и теория. Екатеринбург: УрО РАН, 1999. - 380 с.
17. Максимович Г.Г, Федирко В.Н, Спектор Я.И, Пичугин А.Т. Термическая обработка титановых и алюминиевых сплавов в вакууме и инертных средах. Монография. - Киев: 1987. - 184 с.
18. Сулима А.М., Евстигнеев М.И. Качество поверхностного слоя и усталостная прочность деталей из жаропрочных и титановых сплавов. М.: Машиностроение, 1974. - 256 с.
19. Ильин А. А. Механизм и кинетика фазовых и структурных превращений в титановых

- сплавах: М.: Наука, 1994. 303 с.
20. Семенов Е.И. и др. Ковка и штамповка. Справочник в 4-х т. -М.: Машиностроение, 1986 - Т2. - 592 с.
  21. Шоршоров М.Х. и др. Термопластическое упрочнение мартенситных сталей и титановых сплавов. - М.: Наука, 1971. - 152 с.
  22. Смолянов Г.А, Кручер Г.Н. Обработка титана и его сплавов за рубежом. М.: Центральный институт информации, 1957. - 155 с.
  23. Фиргер И.В. Термическая обработка сплавов. Л.: Машиностроение, 1982. - 304с.
  24. Никольский Л.А. Горячая штамповка заготовок из титановых сплавов. М.: Машиностроение, 1964. - 229 с.
  25. Семенов Е.И. и др. Ковка и штамповка. Справочник в 4-х т. -М.: Машиностроение, 1987 - Т3. - 384 с.
  26. Полькин И.С. Упрочняющая термическая обработка титановых сплавов. М.: Metallurgy, 1984, 96 с.
  27. Гордиенко А.И, Шипко А.А. Структурные и фазовые превращения в титановых сплавах при быстром нагреве. - М.: Наука и техника, 1983. - 336 с.
  28. Давыдов Ю.П, Покровский Г.В. Технология листовой штамповки титановых сплавов. М.: Наука, 1963. - 71 с.
  29. Макквиллэн М.К. Фазовые превращения в титане и его сплавах. - М.: Metallurgy, 1967. - 75 с.
  30. Колачев Б.А., Ливанов В.А., Елагин В.И. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka tsvetnykh metallorv i splovov. M: Metallurgy. 1981g. 414 с.
  31. Давыдов Ю.П. Листовая штамповка титановых сплавов. ОНТИ, 1960 - 80 с.
  32. Чечулин Б.Б. и др. Титановые сплавы в машиностроении. Л.: Машиностроение, 1977. - 248 с.
  33. А. Г. Илларионов, А. А. Попов, Технологические и эксплуатационные. Учебное пособие. - Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. - 137 с.
  34. Мажарова Г.Е, Комановский А.З и др. Обработка титановых сплавов давлением. М.: Metallurgy, 1977. - 96 с.
  35. П.Л. Алексеев, Е.А. Харитонов, И.З. Вольшонок, Н.Ю. Беляева. Исследование состояния металла в процессе радиально-сдвиговой прокатки на стане срвп-130. Известия вузов. Цветная металлургия № 1, 2013, с 39-44.
  36. Колпашников А.И., Вялов В.А., Федоров А.А., Петров А.П. Горячее гидропрессование металлических материалов. -М.: Машиностроение, 1977. - 271с.
  37. Пульцин Н.М. Титановые сплавы и их применение в машиностроении. М.: -Л, 1962. - 168с.



38. Ковка и штамповка цветных металлов. Справочник. - М.: Машиностроение, 1972. 228с.
39. WOOD, R.A., Titanium Alloys Handbook, Metals and Ceramics Information Center, Battelle. Publication No. MC1C-HB-02, Dec. 1972.
40. Авиационные материалы. Справочник в девяти томах. т.5: Магниевые и титановые сплавы. М.: ОНТИ, 1973. - 586 с.
41. Атрошенко А.П., Федоров В.И. Горячая штамповка труднодеформируемых материалов. - М.: Машиностроение, 1979. - 287 с.
42. Лясоцкая В.С. Термическая обработка сварных соединений титановых сплавов. М.: Экомет, 2003. - 352 с.
43. Целиков А.И., Никитин Г.С., Рокотян С.Е. Теория продольной прокатки. - М.: Metallurgy, 1980. - 320 с.
44. Левин И.В и др. Способ горячей прокатки прутков из ( $\alpha+\beta$ ) титановых сплавов. Патент России № 2 108 876.
45. Тетерин П.К. Теория поперечно-винтовой прокатки. - М.: Metallurgy, 1971. - 386с.
46. Потапов И.Н, П. И. Полухин. Технология винтовой прокатки. - М.: Metallurgy, 1990. Вып. 2- 344с.
47. П.Л. Алексеев, Е.А. Харитонов, И.З. Вольшонок, Н.Ю. Беляева. Исследование состояния металла в процессе радиально-сдвиговой прокатки на стане срвп-130. Известия вузов. Цветная металлургия № 1, 2013, с 39-44.
48. Радюченко Ю. С. Ротационное обжатие / Радюченко Ю. С. - М.: Машиностроение, 1972. - 176с.
49. Тюрин В.А., Лазоркин И.А., Пospelов Х.П. Ковка на радиально-обжимных машинах / Под ред. В.А.Тюрина. М. Машиностроение, 1990. 256 с.
50. Радюченко Ю. С. Ротационная ковка / Радюченко Ю. С. - М.: ГНТИ Машлит, 1962. - 188с.
51. Вульф Б. К. Термическая обработка титановых сплавов. - М.: Metallurgy, 1969. -376с.
52. Л. А. Никольский, С. З. Фиглин, В. В. Бойцов и др. Горячая штамповка и прессование титановых сплавов. М.: Машиностроение, 1975. 285 с.
53. А.С. Килов, С.В. Вольнов, К.А. Килов. Производство заготовок. Объемная штамповка: Книга 1. Проектирование и производство поковок (штампованных заготовок): - Оренбург: 2004. - 155с.
54. Титов Ю.А., Кокорин В.Н., Морозов О.И. Технологияковки и объемной штамповки. Учебное пособие. УлГТУ, 2016. - 111 с.
55. Кузьминцев В.Н. Ковка на молотах и прессах. Учебник для средних проф. техн. училищ. - М.: Высшая школа, 1979. - 254 с.
56. Вильнер Г.С. Техника безопасности и производственная санитария при работе на прессах

и молотах. Ленинград:1966. - 88 с.

57. Овчинников А.Г. Основы теории штамповки выдавливанием на прессах. М.: Машиностроение, 1983. - 200 с.

58. Семенов Е.И. Ковка и объемная штамповка. Учебник для ВУЗов. - М.: Высшая школа, 1972. - 352 с.

59. Атрошенко А.П. и др. Штамповка на кривошипных горячештамповочных прессах и горизонтально-ковочных машинах. М.: Машиностроение, 1983. - 95 с.

60. Леванов А.Н., Колмогоров В.Л., Буркин С.П. и др. Контактное трение в процессах обработки металлов давлением. - М.: Металлургия, 1976. - 416 с.

61. Мастеров В.А., Берковский В.С. Теория пластической деформации и обработка металлов давлением. -М.: Металлургия, 1976. - 352 с.

62. Исаченков Е.И. Контактное трение и смазки при обработке металлов давлением. - М.: Машиностроение, 1978. - 208 с.

63. Леванов А.Н. и др. Контактное трение в процессах обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1975. - 352 с.

64. Колмогоров В.Л., Орлов С.И., Колмогоров Г.Л. Гидродинамическая подача смазки. М.: Металлургия, 1975. - 256 с.

65. А.А Ильин, Б.А Колачев, В.К. Носсов, А.М. Мамонов. Водородная технология титановых сплавов. - М.: МИСиС, 2002. -392 с.

66. В.А. Ливанов, А.А. Буханова, Б.А. Колачев. Водород в титане. - М.: Металлургия, 1962. - 246 с.

67. Я.Д. Коган, Б.А. Колачев, Ю.В. Левинский и др. Константы взаимодействия металлов с газами. - М.: Металлургия, 1987. - 368 с.

68. Б.А. Колачев, В.В. Садков, В.Д. Талалаев, А.В. Фишгойт. Вакуумный отжиг титановых конструкций. - М.: Машиностроение, 1991. - 224 с

69. Носов В.К., Колачев Б.А. Водородное пластифицирование при горячей деформации титановых сплавов. М.: Металлургия, 1986.

70. В.А. Володин, И.А. Воробьев, Б.А. Колачев и др. Технология производства деталей крепления из титановых сплавов. - М.: Машиностроение, 1996. - 144 с.

71. Перспективы развития механоводородной обработки титановых сплавов. Ю.Б. Егорова, Л.В. Давыденко, Е.Н. Егоров, С.Б. Белова. Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». № 2, 2019. с 14-25.

72. Н. С. Зунг, А. Н. Варгин, В. И. Полькин. Оптимизация режимов сверхпластической формовки оболочек из титанового сплава ВТ6. Технология легких сплавов, Москва, 2014, №1.

73. Севастьянова В.И, Кирпичникова М.П. Биосовместимые материалы: Учебное пособие. М.:

2011. - 544 с.

74. Севастьянов В.И. Биосовместимость. М.:1999. - 368 с.

75. Ляхов Н.З. Биокompозиты на основе кальцийфосфатных покрытий, наноструктурных и ультрамелкозернистых биоинертных металлов, их биосовместимость и биодegradация. 2014, - 596 с.

76. Цыдыпов Б.С., Лыгденов Б.Д. Разработка технологии производства титановых эндопротезов. Успехи современного естествознания, 2015. №1-8. с 1351-1354.

77. Корнилов И.И. Титан и его сплавы. Исследования титановых сплавов. - М.: Академия наук СССР, 1963. - 369 с.

78. Курников, Дмитрий Анатольевич. Материаловедческие основы проектирования эндопротезов тазобедренного сустава из титановых сплавов и технологии их производства. дис. ...канд. техн. наук. - М: МАТИ, 2006 - 168 с.

79. Ахтямов И. Ф, Соколовский О. А. Хирургическое лечение дисплазии тазобедренного сустава. Казань 2008. - 370 с.

80. Надеев Ал.А. Иванников С.В, Шестерня Н.А. Рациональное эндопротезирование тазобедренного сустава. М., 2004. - 239 с.

81. Ал. А Надеев, С.В. Иванников. Эндопротезы тазобедренного сустава в России. - М. 2015. - 178 с.

82. Колачев Б.А, Габидулин Р.М, Пигузов Ю.В. Технология термической обработки цветных металлов и сплавов. М.: Metallurgy. 1992. 272с.

83. Коллингз Е.В. Физическое металловедение титановых сплавов. М.: Metallurgy, 1988. - 224 с.

84. Золоторевский В.С. Металловедение. Том 2. Термическая обработка. Сплавы. Учебник. - М.: МИСиС, 2014. - 528 с.

85. Применение системы DEFORM для моделирования процессов обработки металлов давлением // CAD/CAM/CAE Observer. 2001. №9.

86. Харламов А., Уваров А. DEFORM - программный комплекс для моделирования процессов обработки металлов давлением // САПР и графика. 2003, №6, с. 34-36.

87. Advances in Polymer Science 1990 Vol 093: M.L. Fridman ed. Polymer Processing. Springer-Verlag. - 190 p. - ISSN 0065-3195.

88. Термопласт «Пластика» для физического моделирования (ТУ-2389-001-54236012-2000). Фирма ООО «Артефакт».

89. Семенов А. П. Исследование схватывания металлов при совместном пластическом деформировании. - М.: Издательство АН СССР, 1953. - 120 с.

90. ОСТ 1 90006-86. Заготовки из титановых сплавов для изготовления лопаток. Технические

требования.

91. ОСТ1 90173-75. Прутки катаные из титановых сплавов. Технические требования.

92. ГОСТ 26492-85. Прутки катаные из титана и титановых сплавов.

93. ОСТ1 90266-86. Прутки катаные крупногабаритные из титановых сплавов. Технические условия.

94. Слезов Семен Сергеевич. Влияние водородной и ионно-плазменной обработки на структуру и комплекс свойств титанового сплава с интерметаллидным упрочнением. дис. ...канд. техн. наук. Москва - 2020. - 171 с.

95. Основные требования к чертежам

96. Грудев А.П., Зильберг Ю.В., Тилик В.Т. Трение и смазки при обработке металлов давлением. Справочник. - М.: Metallurgia, 1982. -312 с.

97. Harold F. Massey, B. Sc. The flow of metal during forging. B. & S. Massey Ltd., 1921, 66 p.

98. Боуден Ф.П, Тейбор Д. Трение и смазка. - М.: МАШГИЗ, 1960. - 152 с.

99. Advances in Polymer Science 1991 Vol 101: Polymer Compositions Stabilizers / Curing. Springer-Verlag. 263 p. - ISSN 0065-3195.

100. ОСТ ОСТ1-90000-70. Штамповки и поковки из титановых сплавов.

101. Александров В.К. и др. Полуфабрикаты из титановых сплавов. М.: Metallurgia, 1979. - 512 с.

102. Голенков В.А., Зыкова З.П., Кондрашов В.И. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением на персональном компьютере: Учебное пособие - М.: Машиностроение, 1994. - 272 с.

103. Нгуен Ч. К., Полькин В. И. Компьютерное моделирование технологии штамповки эндопротезов из титанового сплава ВТ6. Сб. VI Международная научная конференция «Исследования молодых ученых» Казань, 2020, с11-16.

104. Полькин В. И., Нгуен Чунг Киен. Проектирование технологии штамповки заготовок титановых ортопедических протезов с помощью компьютерного моделирования. Технология легких сплавов, Москва, 2019, №3, с55-65.

105. Гусев Ю. И., Карасев И. Н., Кольман-Иванов Э. Э. Конструирование и расчет машин химических производств. - М., Машиностроение, 1985. - 408 с.

106. Нгуен Ч.К, Полькин В.И. Физическое моделирование процесса штамповки эндопротезов с помощью слоистой заготовки. 11-й Всероссийской научно-технической конференции «Современные инновации в науке и технике». Курск, 2021, с193-196.

107. Нгуен Чунг Киен, Полькин В. И. Физическое моделирование процесса штамповки эндопротезов из титанового сплава ВТ6. КИШП. Москва, 2019, №12, с25-39.

108. Б.А. Колачёв, Ю.С. Елисеев, А.Г. Братухин, В.Д. Талалаев; под. ред. А.Г. Братухина.

Титановые сплавы в конструкциях и производстве авиадвигателей и авиационно - космической технике. - М: 2001, - 416 с.

109. Е.В. Коллингз; под ред. Б.И. Веркина, В.А. Москаленко. Физическое металловедение титановых сплавов. - М.: Металлургия, 1988. - 224 с.

110. Охрименко Я.М. Технология Кузнечно-штамповочного производства. - М.: Машиностроение, 1976.

111. Тураев О.Л. Моделирование деформации титанового сплава ВТ6 с различной исходной структурой. МИСиС, 2020 г. - 96 с.

112. Хамраев Т.М. Влияние исходной структуры на параметры деформации и свойства изделий из титанового сплава ВТ6. МИСиС, 2020 г. - 91 с.

113. Нгуен Ч. К., Полькин В. И. Исследование структуры поковок эндопротезов из титанового сплава ВТ6 после горячей штамповки. Титан, Москва, 2021, №1, с56-61.

114. Позняк Л.А., Тишаев С.И. и др. Инструментальные стали. М.: Металлургия, 1977. - 86 с

115. Артингер И. Инструментальные стали и их термическая обработка. Справочник. М.: Металлургия, 1982. - 313 с.

116. Солонина О.П., Глазунов С.Г.М. Жаропрочные титановые сплавы. М.: Металлургия, 1976. - 448 с.

117. ГОСТ 5950-2000 прутки, полосы и мотки из инструментальной легированной стали. Общие технические условия.

118. Нгуен Ч.К., Полькин В.И. Разработка технологии изготовления эндопротеза из титанового сплава ВТ6. Сб. XXVII Международная научная конференция «Ломоносов-2020». Подсекция «Физико -химия и технология материалов», Москва, с37.

## Приложение 1

### Перечень сокращений слов

| №  | Обозначение | Наименование признаков  |
|----|-------------|---|
| 1  | ГП          | Гексагональной плотноупакованной  |
| 2  | ОЦК         | Объемно-центрированной кубической   |
| 3  | ОМД         | Обработка металлов давлением  |
| 4  | ГОШ         | Горячей объемной штамповки  |
| 5  | КГШП        | Кривошипном горячештамповочном прессе                                     |
| 6  | ГКМ         | Горизонтально-ковочных машинах  |
| 7  | РКМ         | Радиально-ковочных машин  |
| 8  | РСП         | Радиально-сдвиговой прокатка  |
| 9  | КИМ         | Коэффициент использования металла   |
| 10 | МДФ         | (Medium Density Fiberboard) - древесноволокнистая плита средней плотности |
| 11 | ВГО         | Высокотемпературной газостатической обработки                             |
| 12 | ТВО         | Термоводородная обработка   |
| 13 | МВО         | Механоводородная обработка  |

## Приложение 2



**УТВЕРЖДАЮ**

Проректор по науке и инновациям  
НИТУ «МИСиС»

М. Р. Филонов

» \_\_\_\_\_ 2021 г.

### АКТ

#### **О результатах практического использования материалов кандидатской диссертации аспиранта кафедры ОМД Нгуен Чунг Киена в учебном процессе и научно -исследовательской работе студентов кафедры**

Мы, нижеподписавшиеся, с одной стороны к.т.н., доц. Полькин В.И., аспирант Нгуен Ч.К., именуемые в дальнейшем «Разработчик», с другой стороны, заведующий кафедрой ОМД НИТУ «МИСиС» к.т.н., доц. Алещенко А.С., именуемые в дальнейшем «Пользователи», составили настоящий АКТ об использовании материалов кандидатской диссертации аспиранта кафедры ОМД Нгуен Ч.К., по теме: «Разработка технологии горячей штамповки эндопротезов из титановых сплавов» в учебном процессе и научно-исследовательских работах студентов кафедры.

Разработчики и пользователи отмечают:

Результаты работы использованы в 2017-2021 учебном процессе на кафедре ОМД при выполнении студентами 3-ти дипломных, и 5-ти курсовых научно-исследовательских работ, а также при чтении курсов лекций по теории ОМД, и технологии горячей объемной штамповки.

Разработчики безвозмездно передают, а Пользователи принимают для использования в учебном процессе и научно-исследовательской работе следующие материалы:

1. Файлы с результатами компьютерного моделирования процесса горячей объемной штамповки из титанового сплава ВТ6.
2. Файлы с результатами физического моделирования процесса горячей объемной штамповки из титанового сплава ВТ6.
3. Файлы с результатами теоретических и экспериментальных исследований процесса горячей объемной штамповки из титанового сплава ВТ6.

От Разработчиков

Научный руководитель к. т. н., доц.

..... Полькин В. И.  
Исполнитель, Аспирант.

От Пользователей

Заведующий кафедрой ОМД к. т. н., доц.

..... Алещенко А.С.

..... Нгуен Ч. К.