

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

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

**НГУЕН ЧУНГ КИЕН**

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

Специальность 05.16.05 «Обработка металлов давлением»

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

Диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

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

Москва - 2021

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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 корой 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 объёмной 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.

### **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.

**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.

**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 рисунков, 25 таблиц и список литературы из 118 источников.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** дано обоснование актуальности работы, поставлена её цель и задачи исследования, сформулирована научная новизна, практическая ценность, указаны основные положения, выносимые автором на защиту.

**В первой главе** представлен литературный обзор информации о титановых сплавах их свойствам, составу, структуре и областям применения, нагреву и деформации титановых сплавов; в частности титановых сплавов типа ВТ6, его применения в промышленности и медицине. Способы производства прутковых полуфабрикатов, сравнительный анализ технологии и оборудования для горячей деформации, отмечены проблемы производства, их преимущества и недостатки. Подробно описаны характеристики и особенности штамповки изделий из титановых сплавов типа ВТ6.

**Во второй главе** подробно изложена методика проведения исследований, описаны материалы и использованное в работе оборудование. Задачи компьютерного моделирования формоизменения заготовки при горячей объёмной штамповке решались на основе программы

Deform-3D, Q-Form-3D. Рассмотрены реологические свойства термопласта, который использовался для физического моделирования штамповки из сплава ВТ6. Химический состав сплавов типа ВТ6 по ГОСТ 19807-91 и по результатам анализа образцов показаны в таблице 1.

Таблица 1 - Химический состав сплава ВТ6 (% массе) по ГОСТ 19807-91 и по результатам анализа образцов.

Марка сплава	Легирующие элементы		Примеси, %							
	Al	V	Fe	Si	Zr	O	C	N	H	Сумма прочих
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

В работе в качестве исходных заготовок применяются прутки из титанового сплава ВТ6 полученными по тремя технологиям: продольной прокатки, ротационной ковкой, РСП (Радиально-сдвиговая прокатка). ВТ6, относится к ( $\alpha+\beta$ ) титановым сплавам, он широко используется в медицине и промышленности, благодаря своей высокой прочности, относительно низкой плотности, отличной коррозионной стойкости и хорошей биосовместимости. Для металлографических исследований и изготовления шлифов, физического моделирования использовали оборудование кафедры ОМД, в том числе и для моделирования горячей деформации. Изготовление штамповых вставок и пробная штамповка эндопротезов на паровоздушный ковочном молоте проводилась в сторонних организациях.

Исследования физического моделирования штамповки производилась на машине ZD 10/90. Для резки образцов использован станок Brilliant 250. Для шлифования образцов использовалась шлифовально-полировальная машина SAPHIR 360. Для изучения микро и макроструктуры в качестве травителя использовали раствор  $1\text{HF}:3\text{HNO}_3:6\text{H}_2\text{O}_2$ . Металлографические исследования проводили на металлографическом микроскопе Versamet -2 7452.

Термоводородную обработку образцов и заготовок изделий проводили в установках Сивертса. Вакуумный отжиг заготовок изделий проводили в вакуумной печи марки «ВЕГА-3М». Контроль остаточного содержания водорода в образцах после отжига проводили спектральным методом на спектрографе ИСП-51 (работы проводились на кафедре МиТОМ, МАИ). Штамповую вставку изготовили с использованием электроэрозионного станка AGIETRON 100С, для окончательной доводки штамповой вставки был использован фрезерный станок 675П, далее гравюру штампа доводили с использованием ручного инструмента. Для осадки образцов использовали вертикальный гидравлический пресс «ПВ-

100». Осадка образца, проходила с одного нагрева. Нагрев образцов, осуществлялся с помощью нагревательной печи СНОЛ4. Изготовление пробной партии эндопротезов осуществляли на паровоздушный ковочном молоте М1345.

**В третьей главе** представлены результаты компьютерного моделирования горячей штамповки эндопротезы из титанового сплава ВТ6. Изучено и проанализировано влияние размеров и формы исходной заготовки на технологические параметры процесса горячей объемной штамповки, такие как: распределение температуры, усилие деформации и заполнение гравюры штампа, коэффициент использования металла, и также зависимости осевого усилия от хода верхнего инструмента.

Современные компьютерные технологии позволяют полностью воспроизвести процесс горячей штамповки, начиная с нагрева заготовки и укладки её в штамп до обрезки облоя и термообработки. На основе чертежа типового эндопротеза «Эльза», разработан чертёж поковки, конструкция штамповых вставок, а также были выбраны схемы штамповки заготовок, к которым относятся единичная, спаренная с внутренним расположением бобышек и спаренная с внешним расположением бобышек. Расчет веса и формы заготовок эндопротеза определяли, используя метод сечений диаметров для поковки с 50%-м заполнением облойной канавки.

На рисунок 1 изображены различные варианты заготовок для каждой схемы штамповки с размерами. Анализ влияния формы и типа исходной заготовки на параметры процесса горячей штамповки основывался на следующем параметрах: распределения температуры, усилие деформации и рациональное заполнение гравюры штампа, а также зависимости осевого усилия от хода верхнего инструмента и коэффициент использования металла.

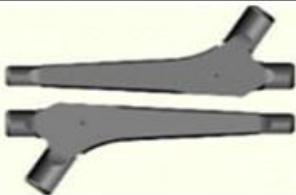
<b>Штамповка единичной поковки</b>			
	<b>Цилиндр</b>	<b>Плита</b>	<b>Профиль</b>
	 175x23 мм	 175x45x20 мм	 215 мм
<b>Штамповка спаренной поковки бобышками внутрь</b>			
	<b>Цилиндр</b>	<b>Плита</b>	<b>Профиль</b>
	 170x34 мм	 150x50x20 мм	 190 мм
<b>Штамповка спаренной поковки бобышками наружу</b>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

Рисунок 1 - Типы и размеры заготовок.

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. Коэффициент трения 0,15; Количество элементов 80.000 шт; материал титанового сплава ВТ6. Реологические свойства были взяты из базы данных применяемой в компьютерном приложении для моделирования процессов ОМД. Для адекватного моделирования процессов штамповки определяли коэффициент трения пары заготовка - штамп, методом осадки колец.

В результате были получены значения температуры, интенсивности деформации и зависимость усилия деформации на разных стадиях штамповки. Оценка усилия деформирования и рациональное заполнение гравюры штампа при штамповке спаренной заготовки показало, что расположении бобышек внутрь лучше, чем бобышками наружу.

Моделирование штамповки с единичной заготовкой (рисунок 2).

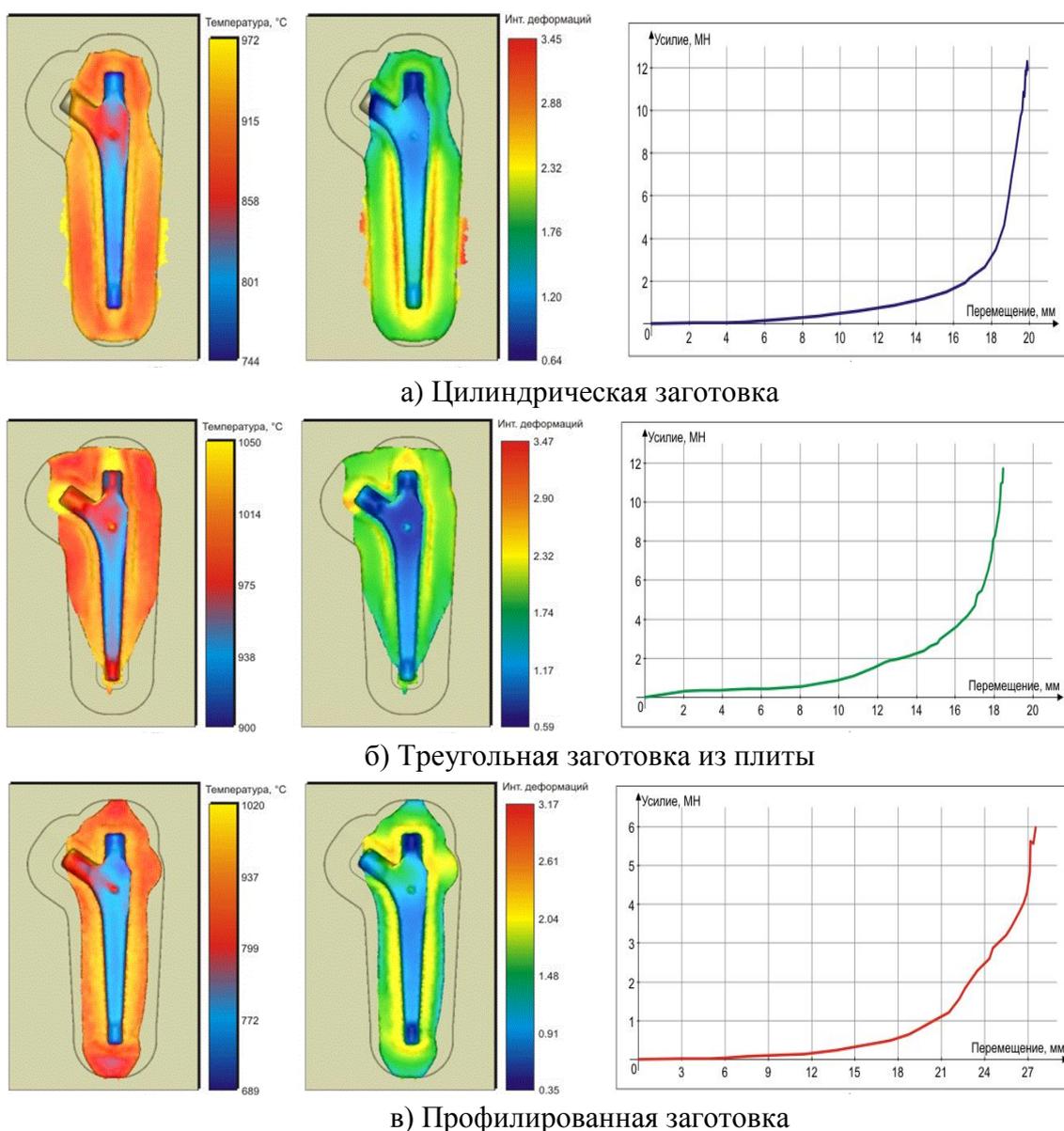


Рисунок 2 - Схема распределение температуры, интенсивность деформаций и зависимость усилия штамповки при штамповки с единичной заготовкой.

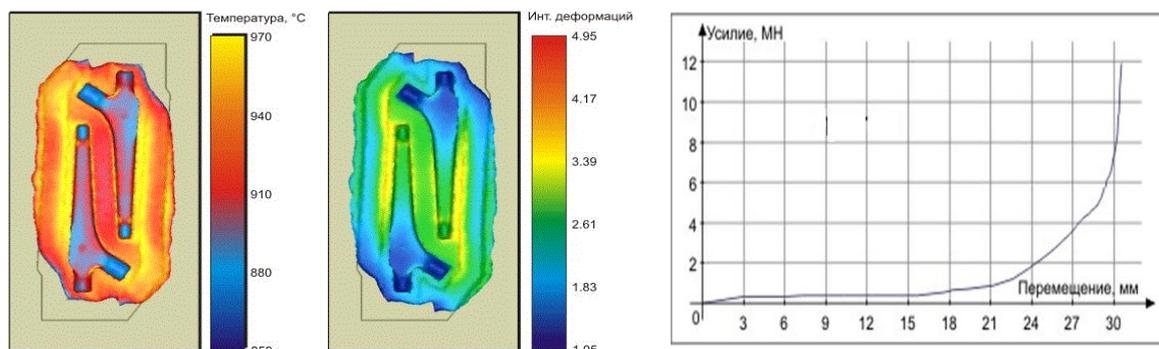
При окончании штамповки цилиндрической заготовки температурный интервал по сечению поковки составил 744-858°C, температура в зоне перехода облойной канавки в магазин доходила до 950°C. При штамповке заготовки из плиты температурный интервал составил 900-975°C, температура в зоне перехода 970°C. Температурный интервал поковки из профилированной заготовки 689-799°C, в зоне облойной канавки температура составила 970°C.

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. При штамповке из треугольной плиты усилие составило 11 МН, в зависимости от расположения заготовки в гравюре штампа. При моделировании штамповки профилированной заготовки усилие было наименьшим около 6 МН, т.к. облой не успел окончательно оформиться, и операция доштамповки ещё не началась. Выделено две области штамповки: постепенное нарастание усилия примерно до 1,5-2 МН, и резкое увеличение после заполнения формы штампа в области ножки. Коэффициент использования металла, значение этого параметра также отличается: для цилиндрической заготовки он составил 0,67; для заготовки из плиты, раскроенной на треугольники он составил 0,62; а для профилированной заготовки 0,66. Интенсивность деформации для различных типов заготовок также отличается: при использовании цилиндрической заготовки: 0,64-1,76; при использовании плиты: 0,59-1,74; для профилированной заготовки: 0,35-1,48.

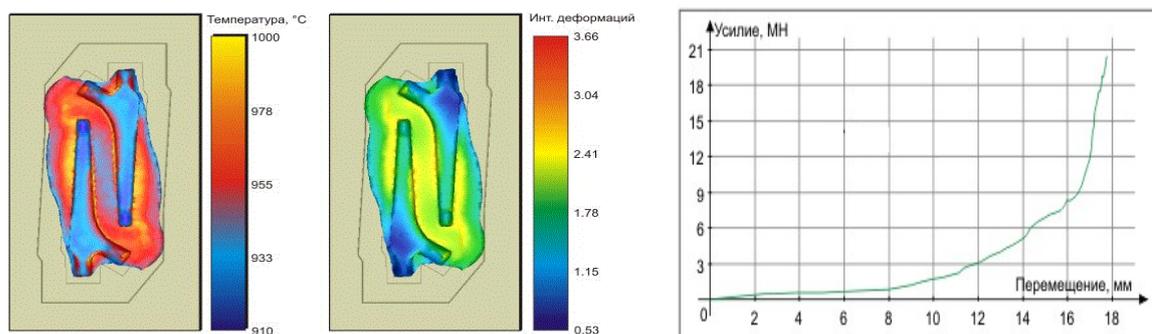
Моделирование штамповки со спаренной заготовкой бобышками внутрь (рисунок 3).

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

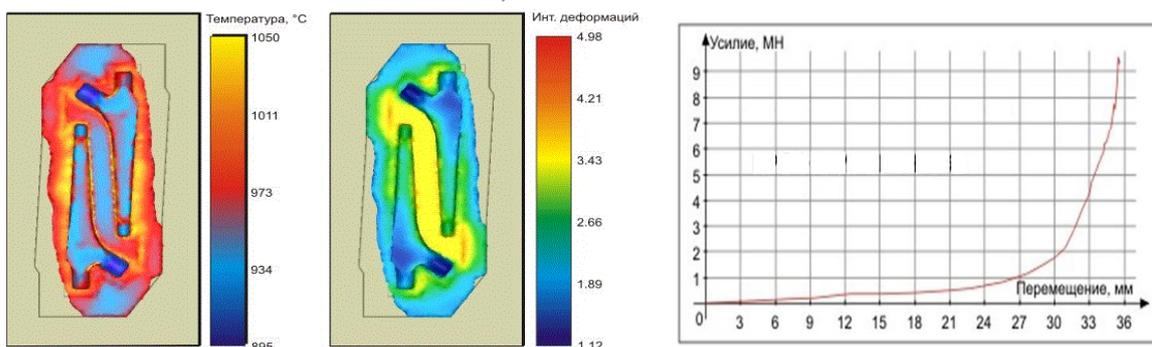
В первом случае, когда исходной заготовкой служил цилиндр, значение температуры находилось в интервале 850-910°C. Во втором случае при использовании плиты: 910-955°C, для профилированной заготовки температура распределение температуры колеблется в пределах 895-973°C. Наиболее нагретыми участками являются: верхняя бобышка эндопротеза и нижняя часть ножки, также больше нагревается боковая полость штампа расположенная ближе к центру. Усилие на верхнем инструменте в конце операции для цилиндрической заготовки составило 12 МН. При штамповке заготовка из плиты усилие составило 20 МН. Усилие при моделировании штамповки профилированной заготовки было около 9 МН. Анализируя данные по интенсивности деформации можно сказать, что распределение накопленной деформации по объему поковки одинаковое, но значение параметров также отличается. При использовании цилиндрической заготовки: 1,05-2,61; При использовании плиты: 0,53-1,78; Для профилированной заготовки: 1,12-2,66. При использовании в качестве заготовки плиты интенсивность деформации значительно понижается. Коэффициент использования металла в схеме штамповки со спаренной заготовкой бобышками внутрь: заготовка цилиндрическая 0,63; заготовка из плиты 0,65; а профилированная заготовка 0,69.



а) Цилиндрическая заготовка



б) Заготовка из плиты



в) Профилированная заготовка

Рисунок 3 - Схема распределение температуры, интенсивность деформаций и зависимость усилия штамповки для спаренной заготовки бобышками внутрь.

Моделирование штамповки со спаренной заготовкой бобышками наружу (рисунок 4).

При использовании цилиндрической заготовки температура находится в интервале 900-950°C, при использовании в качестве исходной заготовки плиту: 730-855°C; при профилированной заготовке: 900-945°C. Во-втором случае поковка охладилась значительно, чем в других вариантах. Как и во всех экспериментах, наиболее нагретой частью является область боковой бобышки, т.к. во всех случаях здесь наибольшая интенсивность деформации, по сравнению с остальной частью поковки.

Результаты интенсивности деформации аналогичны. Характер распределения накопленной интенсивности деформации в первых двух опытах схожи, в отличие от третьего: В первом случае (цилиндр): 0,95-2,29; Во втором случае профилированная заготовка: 0,80-2,07, а при использовании плиты: 0,40-1,36.

Усилие на верхнем инструменте в конце операции для цилиндрической заготовки составило 22 МН. При штамповке заготовка из плиты усилие составило 10 МН. Усилие при моделировании штамповки профилированной заготовки было около 22 МН.

По сравнению со спаренной штамповкой бобышками внутрь, коэффициент использования металла меньше: заготовка цилиндрической составил 0,53; заготовка из плиты составил 0,55; а из профилированной заготовки составил 0,60.

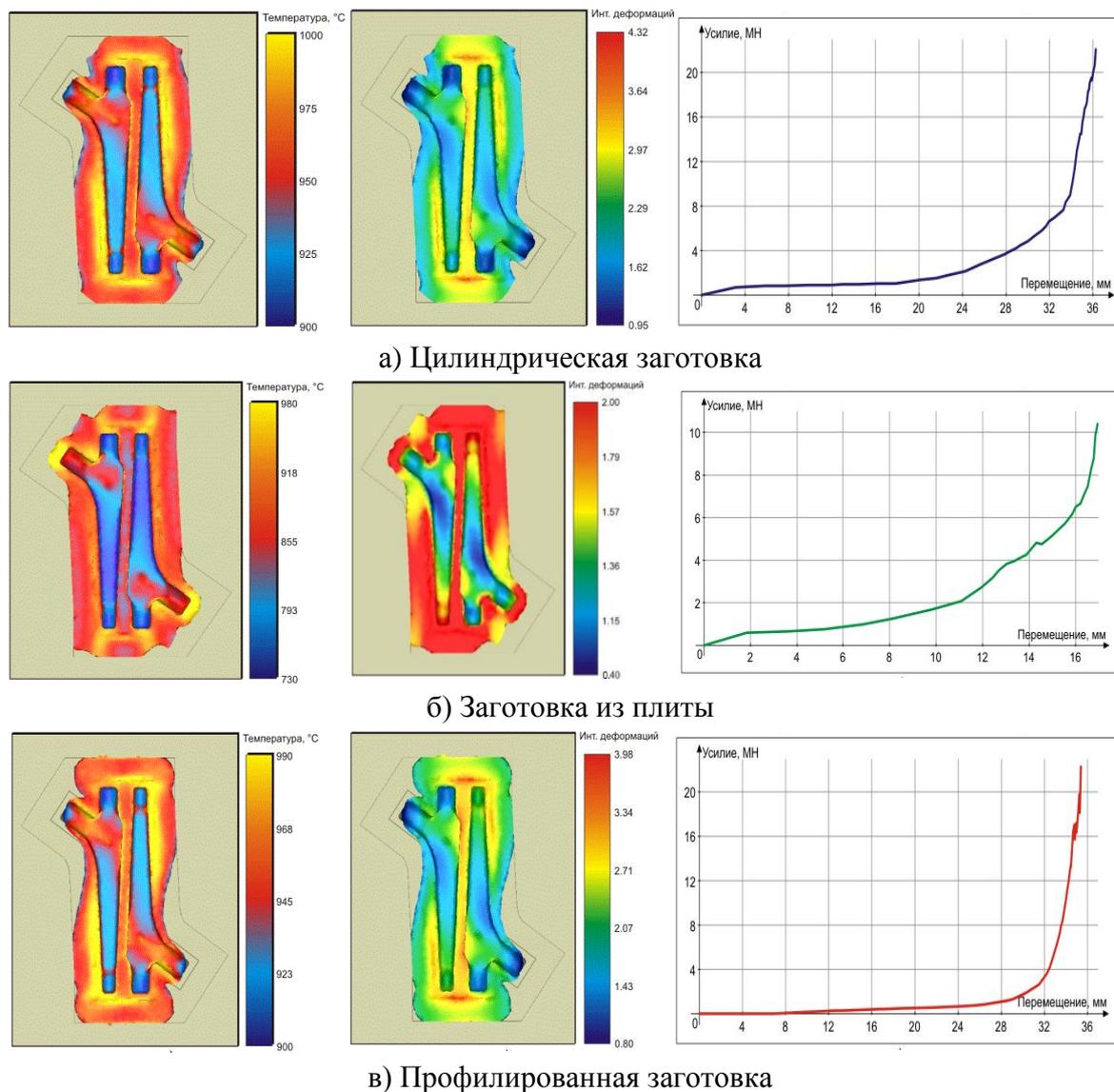


Рисунок 4 - Схема распределение температуры, интенсивность деформаций и зависимость усилия штамповки для спаренной заготовки бобышками наружу.

Таким образом, по результатам проведенных испытаний можно сделать следующие выводы:

- Проанализировав 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;

- Оценка усилия деформирования при штамповке спаренной заготовки показало, что при

расположении в заготовке бобышек наружу наименьшие усилия при штамповке из плиты, а при расположении бобышек внутрь при штамповке из профилированной заготовки;

- Разработаны эскиз штамповки и штамповые вставки для изготовления поковок эндопротезов;

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

- На основе проведённых исследований был разработана технология штамповки эндопротезов из титанового сплава ВТ6 и установлено, что наиболее рациональным для их эффективного производства является горячей деформации в открытых штампах.

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

В результате компьютерного моделирования мы получили данные по форме и массе заготовки, КИМ и усилий штамповки для разных типов заготовки и схем штамповки представленные в таблице 2.

Таблица 2. 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 штамповки: 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 штамповки: 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

В четвертой главе представлены результаты физического моделирования процесса штамповки эндопротезов из титанового сплава ВТ6. Используются заготовки различных конфигураций: цилиндрическая и из плиты, сделанных из термопласта в качестве модельного материала вследствие их схожести по реологическим свойствам со сплавом ВТ6 при горячей деформации, проведено физическое моделирование процесса. При физическом моделировании задача о силовых режимах штамповки не ставилась, а оценивалось только

формоизменение заготовки в открытых штампах и заполнение гравюры. Проведен анализ полученных результатов для выбора рациональной схемы и типов заготовки и использование полученных данных для выбора необходимого оборудования для горячей штамповки эндопротезов из сплава ВТ6.

Для получения данных о распределении деформации по длине и объему эндопротеза проводили физическое моделирование штамповки с помощью слоистой поковки. Для этого исходную заготовку выполняли из нескольких слоёв модельного материала разного цвета. Готовую поковку разрезали поперёк, и дополнительно вдоль оси разрезалась боковая бобышка. 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 5.

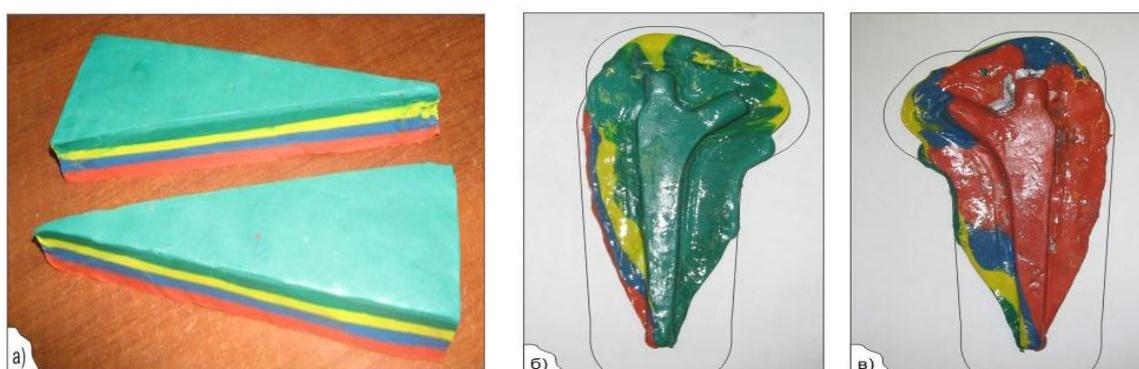


Рисунок 5 - Анализ течения поверхностных слоёв треугольной заготовки при моделировании схемы штамповки с единичной заготовкой.

- а) многослойные заготовки для физического моделирования.
- б) течение верхних слоёв.
- в) течение нижних слоёв.

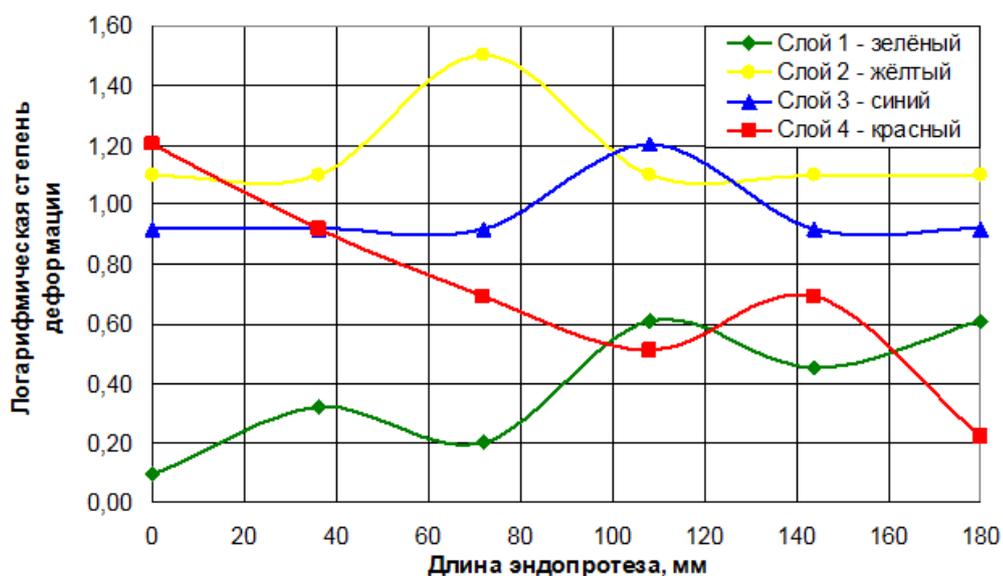


Рисунок 6 - График распределения логарифмической степени деформации по длине эндопротеза.

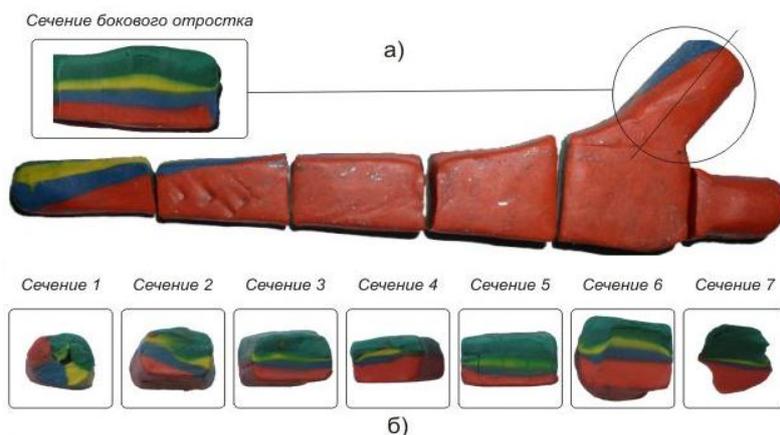


Рисунок 7 - Анализ течения внутренних слоёв треугольной заготовки при моделировании схемы штамповки с единичной заготовкой.

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

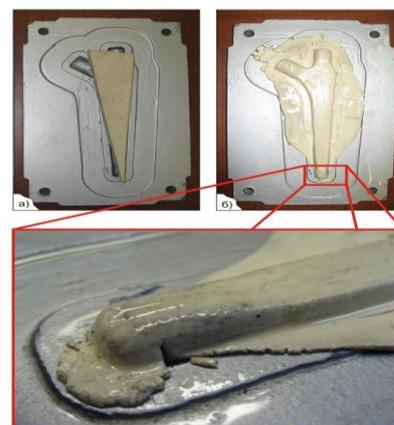


Рисунок 8 - Схема штамповки с треугольной заготовкой.

- а) заготовка в штампе
- б) отштампованная поковка

Для анализа течения внутренних слоёв модели при штамповке кроме выявления основных направлений течения материала была рассчитана логарифмическая степень деформации каждого слоя по длине поковки. По полученным данным был построен график распределения логарифмической степени деформации по длине эндопротеза, который представлен на рисунок 6.

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, верхний слой модели течет в сторону боковой бобышки, а нижний - в обратную сторону, при этом центральные слои практически полностью уходят в облой. Полученную модель поковки разрезали на несколько частей, результаты представлены на рисунке 7.

При штамповке из плиты трудно правильно установить заготовку, что в сочетании со сложным течением металла в наиболее ответственных частях эндопротеза может привести к образованию зажимов представлены на рисунок 8. Зажим концевой части заготовки не ведет к отбраковке в эндопротеза, поскольку эта его часть отрезается при механической обработке, но необходимо снизить вероятность его появления.

Использование прутков дешевле, проще контролировать размеры заготовки, заполнение облойной канавки более рационально. Видно, что применяя прутковую заготовку КИМ оказался выше, а заполнение гравюры меньше зависит от положения заготовки, что позволяет исключить образование зажимов и упростить штамповку в реальных условиях.

В результате физического моделирования спаренной штамповки было принято технологическое решение, в котором предлагается введение промежуточной стадии штамповки для разделения потоков материала, что привело к снижению энергосиловых параметров процесса в 2 раза, и увеличению долговечности рабочего инструмента и снижению себестоимости в условиях промышленного производства.

В ходе работы, был смоделирован процесс штамповки титановых эндопротезов в

открытых штампах и исследованы особенности заполнения гравюры штампа.

- Проведенное сравнительное исследование характера образования и формы облоя, а также стадии формоизменения заготовки при штамповке позволило прийти к заключению о хорошей воспроизводимости результатов, полученных компьютерным моделированием и экспериментами на модельных материалах.

- По результатам физического моделирования, показано, что повышения стойкости оснастки и снижения энергосиловых параметров процесса, возможно если ввести промежуточную операцию по разделению потоков материала.

- Результаты физического моделирования штамповки единичной поковки показали, что наиболее эффективным, с точки зрения максимального использования материала является использование треугольной заготовки из плиты.

- 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, размеры заготовки контролировать проще, а риск появления дефектов меньше.

**В пятой главе** описан алгоритм выбора способа производства заготовки под штамповку. В эксперименте по горячей штамповке прутковой заготовки режим и степень деформации были выбраны по принципу подобия с данными математического моделирования и реального производства. Пробная штамповка моделировала в лабораторных условиях две схемы горячей деформации: Первая на основе традиционных подходов по рассчитанным в работе режимам. Вторая с использованием ТВО, когда требуется получение, улучшенных свойств для изделий из титановых сплавов ответственного назначения с мелкозернистой структурой. Анализировали влияние способа получения и структуры исходной заготовки на формирование структуры поковки после горячей деформации. Разработана универсальная технология штамповки деталей из титановых сплавов.

На практике нужна максимально дешевая заготовка для штамповки эндопротеза при сохранении высокого качества, т.к. экономический фактор играет большую роль. Учитывая предыдущие исследования, рациональнее для заготовки использовать пруток. Поэтому в дальнейшем выбирали прутковые полуфабрикаты из сплава ВТ6 полученными тремя способами: продольной прокаткой, ковкой, и радиально-сдвиговая прокаткой для получения удовлетворительных эксплуатационных характеристик. Прутки сравнивали как в исходном состоянии, так и после горячей деформации (микро и макроструктуры в продольном и поперечном направлении в исходном прутке представлены в таблице 3.)

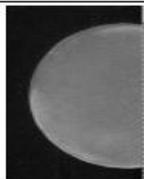
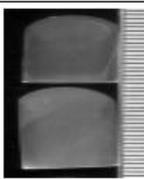
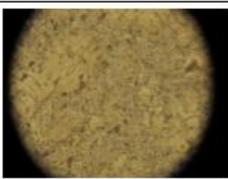
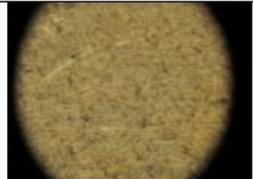
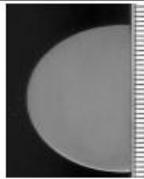
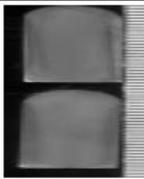
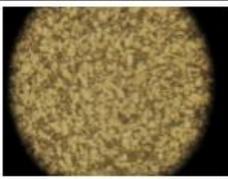
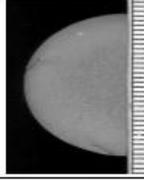
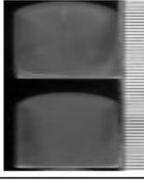
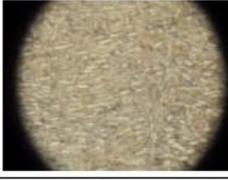
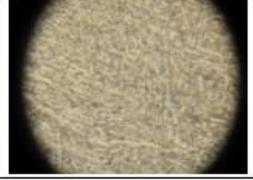
Микроструктуры прутка в продольном и поперечном направлении, полученного способом РСП были изготовлены в соответствии ОСТ1 90173-75 имеют удовлетворительную структуру. Макроструктуры соответствуют 6 баллу с небольшой неоднородностью структуры. Микроструктуры прутка соответствуют 4-5 типу, обладает строением типа корзиночного плетения.

Из данных, представленных в таблице 4 видно, что структура у продольно катанной заготовки изготовленной по ОСТ1 90006-86 является лучшей, с мелкими и однородными зернами. Макроструктура которого однородна и соответствует 3 баллу. 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 дорогая, сложная и многопереходная.

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

Таблица 3 - Исходные структуры прутков титанового сплава ВТ6 в зависимости от способа получения полуфабрикатов.

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

По результатам моделирования штамповки эндопротезов была выбрана температура начала деформации 900-920°C. Степень деформации рассчитывали по формуле:

$$\varepsilon = \frac{H_0 - H_1}{H_0} \cdot 100\%$$

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 и физического моделирования. Величина степени деформации больше 50% удовлетворяет условиям, требуемым к структуре.

После горячей осадки во всех случаях наблюдается образование более однородной структуры, чем в исходных заготовках представлены в таблице 4. 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 штамповки соответствует 4-5 типам, т.е. со значительным уменьшением размера зерна по сравнению с исходной заготовкой, практически в 2 раза.

В заготовке, изготовленной методом РСП после горячей деформации также, получена 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 микрозерна после деформации замечены меньше, чем в исходном состоянии, и соответствуют 3-4 типу, с более глобулярной и однородной структурой. Полуфабрикаты с такой структурой имеют высокие характеристики жаропрочности и ползучести в сочетании с хорошей пластичностью и термической стабильностью.

Полученные структуры после горячей деформации на продольнокатанном прутке из сплава ВТ6 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, макроструктура соответствует 1 и 2 баллу, микроструктура получена равноосная по всему сечению заготовки, размер зерна практически одинаковый и соответствуют 1 типу. Подобная структура обеспечит высокие значения пластичности, предела выносливости и наименьшую чувствительность к надрезу.

Структуры до и после горячей деформации образцов из титанового сплава ВТ6 представлены в таблице 5.

Таким образом, по результатам исследования можно сделать следующие выводы:

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

- 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 режимы горячей деформации позволили существенно уменьшить анизотропию, как макро, так и микроструктуры.

- 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.

Таблица 4 - Структуры после горячей деформации прутков титанового сплава ВТ6.

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

Таблица 5 - Структуры до и после горячей деформации титанового сплава ВТ6.

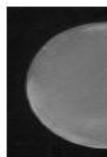
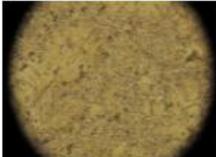
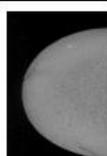
Способы получения прутка	Макроструктуры, балл		Микроструктуры, тип	
	Исходная	После деформации	Исходная	После деформации
РСП Макро: 6→3 балл Микро: 4-5→3-4 тип				
Продольная прокатка Макро: 3→1-2 балл Микро: 2-3→1 тип				
Ковка Макро: 8-10→4-5 балл Микро: 8-9→4-5 тип				

Таблица 6 - Исходная структура заготовок сплава ВТ6 после наводороживания.

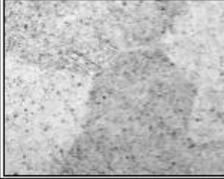
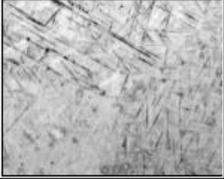
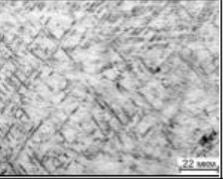
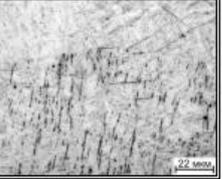
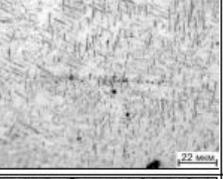
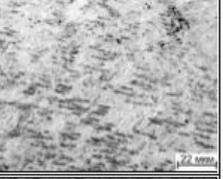
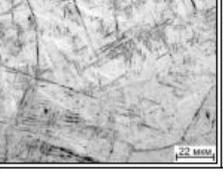
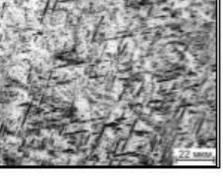
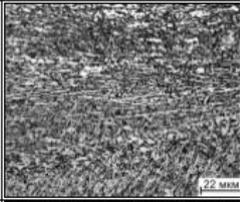
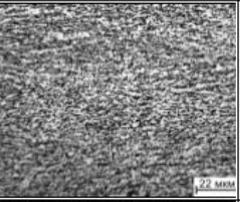
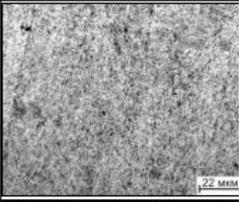
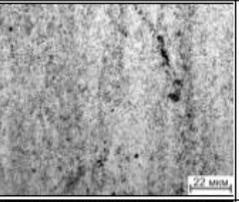
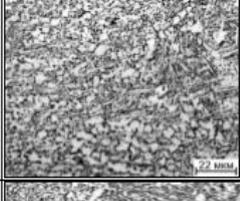
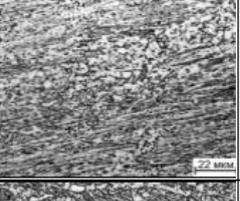
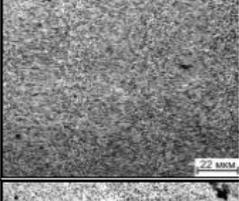
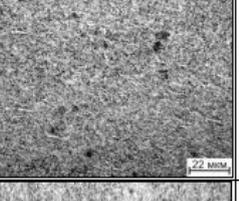
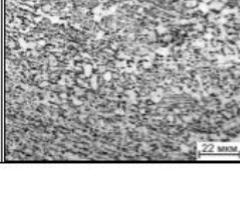
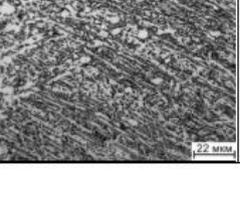
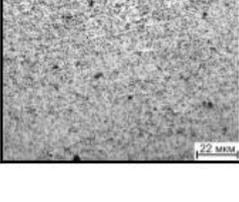
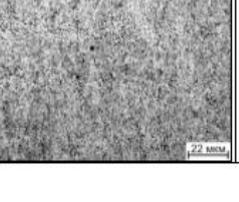
Способы получения прутка	Структуры после наводороживания титанового сплава ВТ6 850°C, $\tau_{\text{в}} = 1$ час, $C_{\text{H}} = 0,45 \pm 0,5\%$				
		Макроструктуры		Микроструктуры	
		Центр	Край	Центр	Край
РСП					
Продольная прокатка					
Ковка					

Таблица 7. Влияние ТВО на микроструктуру титанового сплава ВТ6 после деформации.

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

Разработка универсальной технологии штамповки деталей из титановых сплавов.

В рамках разработки универсальной технологии штамповки титановых сплавов была поставлена задача дополнительного улучшения структуры поковок, для этого использовали термоводородную обработку (ТВО). ТВО - это эффективный метод измельчение зерна и улучшение механических свойств деформируемых титановых сплавов - снижение температур горячей деформации примерно на 150°C (с 900 до 750°C) \*. (\* Работы по ТВО проводились совместно с кафедрой МиТОМ, МАИ).

Образцы наводороживали в установке Сивертса до концентраций от 0,45% до 0,5% при температуре 850°C, выдержка  $\tau_v = 1$  час. После термоводородная обработки получили мартенситную структуру (таблица 6).

На образцах, с различным способом получения полуфабрикатов, из сплава ВТ6, были разработаны и опробованы два режима вакуумного отжига: первый режим: 800°C в течение 5 часов; и второй режим: 625°C, 8 часа. При обоих режимах конечная концентрация водорода составляла не более 0,008 %. Результаты влияния ТВО на микроструктуру титанового сплава ВТ6 после деформации представлены в таблице 7. Видно, что использование двух режимов термообработки в обоих случаях позволила получить более мелкую структуру, но после отжига 625°C, 8 часов структура была более однородная и равноосная, даже в ковальной заготовке.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

- 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.

- ТВО значительно улучшило макро- и микроструктуру, уменьшив размер зерна после горячей деформации в 2 раза по сравнению с традиционной технологии штамповки.

- Получение изделий из титана с субмикронной структурой, позволяет получить более высокий уровень механических свойств.

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

**В шестой главе** описана разработка и изготовление штамповых вставок, а так же пробная штамповка партии эндопротезов из титанового сплава ВТ6 по разработанной технологии.

Подтверждена адекватность использованной математической модели горячей деформации и совпадение с результатами физического моделирования штамповки эндопротезов из сплава ВТ6.

Механические свойства и структура поковок превосходят по своим показателям на 10-15% показатели изделий изготовленных по старым технологиям (полученных литьем и вырезанных из плиты), поэтому технологию горячей штамповки титановых сплавов можно предложить к внедрению при производстве эндопротезов.

## 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°C, 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 ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в журналах, рекомендованных ВАК

1. Польшкин В.И., Нгуен Чунг Киен. Проектирование технологии штамповки заготовок титановых ортопедических протезов с помощью компьютерного моделирования. Технология легких сплавов, Москва, 2019, № 3, с 55-65.
2. Нгуен Ч.К., Польшкин В.И. Физическое моделирование процесса штамповки эндопротезов из титанового сплава ВТ6. КШП-ОМД, Москва, 2019, № 12, с 25-39.
3. Нгуен Ч.К., Польшкин В.И. Исследование структуры поковок эндопротезов из титанового сплава ВТ6 после горячей штамповки. Титан, Москва, 2020, № 3-4, с 56-61.

Статьи и тезисы, опубликованные в сборниках трудов конференций

1. Нгуен Ч.К., Польшкин В.И. Компьютерное моделирование технологии штамповки эндопротезов из титанового сплава ВТ6. 6-я международная научная конференция «Исследования молодых ученых», Казань, 2020, с 11-16.
2. Нгуен Ч.К., Польшкин В.И., Нгуен Тхай Ха. Разработка технологии изготовления эндопротеза из титанового сплава ВТ6. 27-я международная научная конференция «Ломоносов-2020», МГУ имени М.В.Ломоносова. Подсекция «Физико -химия и технология материалов», Москва, 2020, с 37.
3. Нгуен Ч.К., Польшкин 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, с 193-196.