

На правах рукописи



Нгуен Суан Зунг

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
СВЕРХПЛАСТИЧЕСКОЙ ФОРМОВКИ ОБОЛОЧЕК ИЗ ДВУХФАЗНЫХ
ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ**

Специальность 05.16.05 – «Обработка металлов давлением»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2014

Работа выполнена на кафедре «Технологии и оборудования трубного производства» Института экотехнологии и инжиниринга Национального исследовательского технологического университета "МИСиС".

Научные руководители доктор технических наук, профессор

Смирнов Олег Михайлович

кандидат технических наук, доцент

Полькин Владислав Игоревич

Официальные
оппоненты

Галкин Виктор Иванович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «МАТИ – Российский государственный технологический университет имени К.Э. Циолковского», кафедра «Технология обработки металлов давлением», профессор.

Федотов Игорь Леонидович, кандидат технических наук, ООО «ЦветМетКомплект», директор по развитию.

Ведущая
организация

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН).

Защита состоится «1» октября 2014 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.132.09 при ФГАОУ ВПО НИТУ "МИСиС" по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 4.

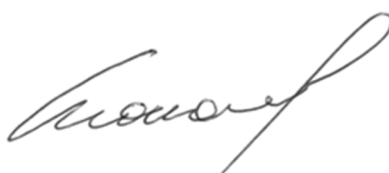
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВПО НИТУ "МИСиС" и на сайте (<http://www.misis.ru/tabid/176/ArticleID/1878/>).

Справки по телефону: 8(495)955-01-27

E-mail: pdss@misis.ru

Автореферат разослан « ____ » июля 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Ионов Сергей
Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Прогресс в машиностроении в значительной степени определяется разработкой новых и совершенствованием существующих технологий изготовления изделий различного назначения. Одним из перспективных направлений совершенствования технологии листовой штамповки при производстве тонкостенных деталей из титановых сплавов в виде оболочек, в условиях мелко- и среднесерийного производства, является использование сверхпластической формовки (СПФ) листовых заготовок. Промышленное освоение сверхпластической формовки позволяет получать тонкостенные объемные изделия сложной конфигурации, производство которых с использованием традиционных процессов листовой обработки не рентабельно или практически невозможно. Кроме того, СПФ по сравнению с традиционными методами получения аналогичных деталей обладает рядом преимуществ, к числу которых относятся: высокий коэффициент использования материала (КИМ), возможность получения сложнопрофильных изделий на маломощном прессовом оборудовании и простой технологической оснастке за одну формообразующую операцию. Технология СПФ имеет меньшую трудоемкость, низкие энергетические и капитальные затраты, позволяет сократить ручной труд и снизить себестоимость изделий.

В настоящее время двухфазные титановые сплавы широко применяются в различных отраслях промышленности для изготовления конструкций летательных аппаратов, баллонов, работающих под давлением, и целого ряда других конструктивных элементов, военной и гражданской техники. Эти сплавы применяются в судостроении, химической промышленности, в установках и сооружениях, работающих в морской среде. Одним из типичных двухфазных титановых сплавов является сплав ВТ6. Он обладает характеристиками общими для этой группы сплавов и относится к числу наиболее распространенных в мире. Двухфазные титановые сплавы, в частности, сплав ВТ6, имеют хорошую технологичность, особенно, при их обработке давлением в горячем состоянии. Однако, производство листовых деталей сложной формы, с глубокими рифтами и малыми радиусами кривизны рельефов, из этих сплавов горячей деформацией очень трудоемко или вообще практически неосуществимо. В титановых сплавах при обычной горячей деформации, вследствие ее неравномерности и неоднородности, а также низкой теплопроводности титана, образуются зоны интенсивного течения, приводящие к резко выраженной макро- и микроструктурной неоднородности, что оказывает негативное влияние на качество получаемых изделий. Для устранения отмеченных выше сложностей обработка двухфазных титановых сплавов в состоянии сверхпластичности (СП) приобретает большое значение. Она позволяет резко уменьшить сопротивление деформации и увеличить пластичность титановых сплавов. При этом важно установить влияние сверхпластической деформации (СПД) на микроструктуру и комплекс механических свойств сплавов. Поэтому систематическое исследование, которое включает современные вычислительные средства, характеристик СПД двухфазных титановых сплавов и технологии СПФ для получения оболочек из

них является актуальным для оптимизации технологических режимов и повышения качества получаемых изделий, а также создания новых принципов формовки при изготовлении деталей более сложного профиля.

В связи с этим, настоящая работа посвящена разработке процессов сверхпластической формовки оболочек из сплава ВТ6, как типичного представителя двухфазных титановых сплавов, для выяснения общих закономерностей их формообразования при СПФ оболочек на основе исследования влияния характеристик микроструктуры материала и температуры деформации на его реологическое поведение, а также технологические параметры процесса СПФ с использованием компьютерного и физического моделирования.

В работе определена количественная связь между размером структурных составляющих и реологическими характеристиками сплава ВТ6 при сверхпластической деформации, а также относительная термическая стабильность его структуры при нагреве до оптимальной температуры СПД и последующей СПФ. На основе вычисленных реологических параметров и характеристик сверхпластичности исследуемого материала выбраны рациональные технологические режимы сверхпластической формовки. Разработаны компьютерные конечно-элементные (FEM CAD) модели процессов СПФ полых оболочек для исследования закономерностей формоизменения и распределения напряженно-деформированных состояний в полуфабрикате при различных термомеханических режимах. Проведены эксперименты по СПФ типовых оболочек из сплавов ВТ6 и ВТ23 для проверки расчетных результатов компьютерного моделирования, отработки технологии и исследования влияния микроструктуры исходного листа заготовки (направления прокатки) на параметры готовых изделий, а также эволюции микроструктуры в процессе СПФ.

Работа выполнена на кафедре «Технология и оборудование трубного производства» (ТОТП) Института экотехнологии и инжиниринга Национального исследовательского технологического университета «МИСиС».

Автор выражает глубокую признательность д.т.н. проф. Смирнову О. М., к.т.н. доц. Полькину В. И. и другим сотрудникам и преподавателям кафедры ТОТП и ПДСС за помощь, оказанную при выполнении работы и представлении её результатов.

Цель работы: Используя компьютерное и физическое моделирование процессов сверхпластической формовки разработать научно-обоснованную методику для получения оболочек из листов двухфазных титановых сплавов на примере сплава ВТ6.

Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Проанализировать научно-техническую и патентную литературу о процессах СПФ двухфазных титановых сплавов и сделать выбор модельного сплава для исследований.

2. Выполнить анализ основных реологических характеристик и эволюции микроструктуры двухфазных титановых сплавов при сверхпластической деформации.

3. Произвести расчет реологических параметров и характеристик СП двухфазных титановых сплавов при СПД для выбора рациональных режимов СПФ на примере сплава ВТ6.

4. Разработать комплексную методику оценки формуемости листов из двухфазных титановых сплавов и технологию СПФ двухфазных титановых сплавов с использованием методов физического и математического моделирования для определения закономерностей формоизменения при различных технологических режимах.

5. Выполнить проверку результатов компьютерного моделирования и предложенных методик СПФ листов из сплавов ВТ6 и ВТ23.

6. Разработать технологические рекомендации по схемам, температурно-скоростным и силовым режимам СПФ полых оболочек из двухфазных титановых сплавов.

Научная новизна работы

1. Получены новые данные о реологических характеристиках СПД для двухфазных титановых сплавов на примере сплавов ВТ6 и ВТ23 по выбранной модели «SP-среды» и определены количественные зависимости напряжения течения, показателя скоростной чувствительности (m) от скорости, температуры и размера зерна при СПД.

2. Разработана специальная программа и проведены расчеты реологических параметров двухфазных титановых сплавов в состоянии СП по модели «SP-среды».

3. Разработана методика, сочетающая компьютерное моделирование и экспериментальную проверку, для комплексной оценки формуемости для всех двухфазных титановых сплавов при СПФ оболочек.

4. С помощью предложенной методики выявлены основные закономерности формоизменения и определены рациональные технологические режимы, характеристики напряженно-деформированного состояния, а также геометрической формы и размера изделий при СПФ оболочек из двухфазных титановых сплавов.

Практическая значимость работы

1. Получены базы данных реологических свойств двухфазных титановых сплавов, которые могут быть использованы при проектировании технологических процессов изготовления оболочек методом СПФ.

2. Предложены компьютерные модели, позволяющие быстро оценить формуемость любого двухфазного титанового сплава при СПФ оболочек. Полученные результаты являются основой для разработки технологии производства изделий из листовых титановых полуфабрикатов методом СПФ.

3. Разработана комбинированная методика технологических проб для испытаний листовых материалов с ультрамелким зерном на пригодность к СПФ, сочетающая компьютерное моделирование и тестовые эксперименты.

4. Предложены технологические рекомендации по схемам, температурно-скоростным и силовым режимам, а также конструкции установки и технологической оснастки для СПФ полых оболочек из двухфазных титановых

сплавов.

5. Получены технологические параметры для изготовления тонкостенных деталей из сплавов ВТ6 и ВТ23, которые можно использовать при разработке технологии СПФ оболочек.

6. Результаты работы нашли практическое применение в учебном процессе и исследовательской работе в НИТУ «МИСиС» и в «Ханойском технологическом институте» при выполнении курсовых и дипломных работ студентов.

Методы исследования и достоверность результатов

В качестве основного метода исследования процесса СПФ был выбран экспериментально-теоретический метод. Процесс СПФ оболочек исследовался методом математического численного моделирования, с применением программного продукта *DEFORM-3D*. Адекватность предложенных моделей проверялась сравнением некоторых расчетных зависимостей с экспериментальными, на натурных материалах. Достоверность результатов обеспечивается обоснованностью использованных теорий, надёжностью современных вычислительных средств, корректностью постановки задач, подтверждается качественным и количественным совпадением результатов теоретических исследований с экспериментальными данными.

Апробация работы

Материалы диссертации используются в учебном процессе и исследовательской работе на кафедре ТОТП НИТУ «МИСиС» и в «Ханойском технологическом институте» при чтении лекции по курсам «Теория обработки металлов давлением» и «Технология листовой штамповки».

Предложенная методика комплексной оценки формруемости листов из двухфазных титановых сплавов использовалась при формовке полусфер из сплава ВТ23 на одном из заводов авиакомической отрасли. Результаты работы изложены и обсуждены на научно-технических конференциях: XI конгресс «Кузнец-2012. Перспективы инновационного и конкурентоспособного развития кузнечно-прессового машиностроения и кузнечно-штамповочных производств», Рязань, ОАО «Тяжпрессмаш»; международный научно-технический конгресс ОМД-2014, Москва, НИТУ МИСиС.

Публикации

Материалы проведенных исследований отражены в 3 статьях в рецензируемых изданиях, внесенных в перечень рекомендуемых ВАК, в 2 статьях в сборниках материалов российских и международных научно-технических конференций.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных результатов работы и выводов, изложена на 191 странице, содержит 94 рисунка, 36 таблиц, библиографический список из 86 наименований и 2 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрыта актуальность темы диссертационной работы, ее

научная новизна и практическая значимость, а также приводятся основные положения, выносимые автором на защиту.

В первой главе выполнен обзор и анализ научно-технических публикаций, посвященных явлению сверхпластичности, условиям, механизмам деформации и признакам её проявления, а также основным характеристикам материала в сверхпластичном состоянии и реологическим моделям, используемым для описания сверхпластичных материалов (СПМ). Рассмотрены основные схемы процесса СПФ оболочек, типовые изделия, конструкции установок и технологической оснастки для СПФ. Проведен анализ нескольких методов регулирования толщины стенок при СПФ оболочек. Выполнен обзор и проведен анализ современных специализированных компьютерных систем для моделирования процессов при обработке металлов давлением. Изложены основные свойства двухфазных титановых сплавов и области их применения, а также характеристики двухфазных титановых сплавов в состоянии СП и методы подготовки их микроструктуры для СПД. На основании результатов литературного обзора сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе представлена методика проведения исследований и описаны использованное при экспериментах оборудование и технологические оснастки. В качестве материала для исследования СПФ оболочек был выбран сплав ВТ6, как типичный представитель группы двухфазных титановых сплавов.

Химический состав листов сплава ВТ6, использованных при СПФ, приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав сплава ВТ6

Химические элементы (%)										
Элемент	Al	V	Zr	O	Fe	Si	C	N	H	Примеси
ГОСТ 19807-91	5,3-6,8	3,5-5,3	≤0,3	≤ 0,2	≤ 0,6	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,05	≤ 0,015	≤ 0,3
Исследуемый материал	6,05	4,0	0,17	0,15	0,26	0,09	0,07	0,01	0,01	0,25

При СПФ были использованы заготовки, вырезанные из листов в состоянии поставки толщиной 1 мм и диаметром 60 мм. Для определения влияния температуры и продолжительности отжига на характер структурных изменений в сплаве из листов вырезали образцы размером 1x10x10 мм. Изучение влияния режимов сверхпластической формовки на структуру проводили на образцах, вырезанных на характерных участках отформованных оболочек.

Исследование микроструктуры проводили методами световой микроскопии и количественного металлографического анализа на микроскопе *Axio Observer Dlm*. Размер зерна определяли методом случайных секущих с помощью компьютерной программы *Axio Vision Red 4.8*.

При экспериментальном исследовании технологических режимов СПФ использовали разработанную ранее в НИЛ ДСПМ НИТУ «МИСиС» методику технологических проб в виде формовки куполов и осесимметричных деталей с

продольными рифтами, имеющими различные сечения и размеры, а также с куполами, имеющими малые диаметры, для наблюдения оформления контура деталей и заполнения материалом гравюры матрицы.

Для экспериментальных исследований СПФ использовали установку, сконструированную и изготовленную на базе двухстоечного гидравлического пресса Y1671 (рисунок 1)

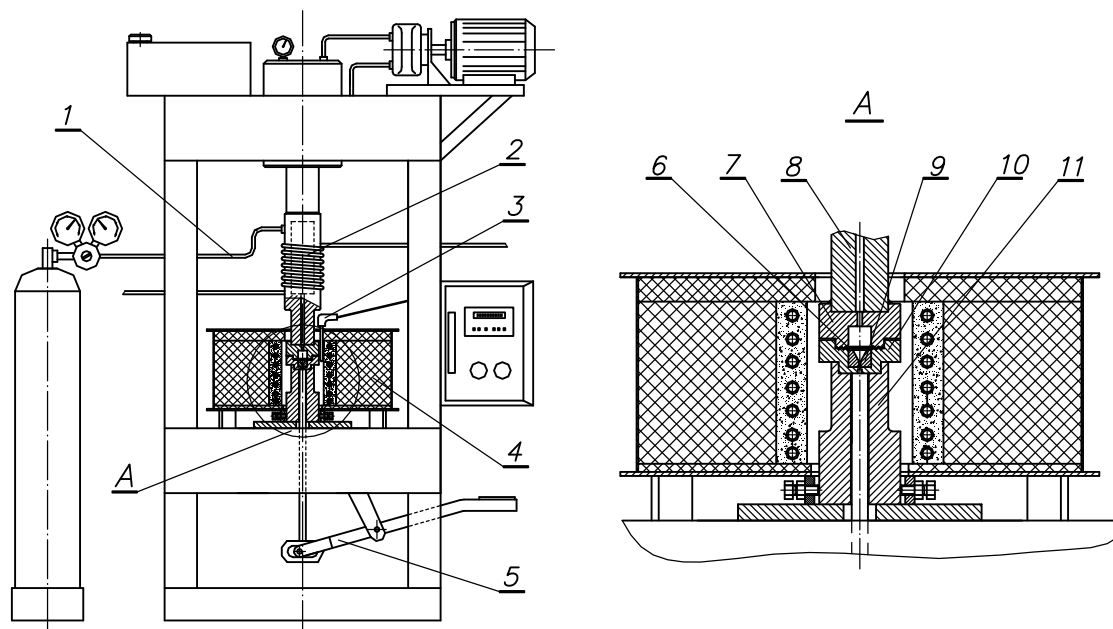


Рисунок 1 – Установка для СПФ

1-газопровод; 2-система водоохлаждения; 3-термометр; 4-электропечь;
5-система выталкивателя; 6-заготовка; 7-крышка; 8-промежуточная труба;
9-матрица; 10-пресс-форма; 11-промежуточная стойка

В работе использовали систему компьютерного конечно-элементного моделирования на основе программы *DEFORM-3D* версия 6.1, и других прикладных программ для моделирования формоизменения заготовки в процессе СПФ.

Для обработки данных физического моделирования использовали прикладные программы, такие как *Microsoft Word*, *Microsoft Excel*, *Graphicssuitex 3*, *Matlab-2012* и др.

В третьей главе описано влияние температуры и размера зерна на характеристики сплава ВТ6 в состоянии СП. Проведен расчет численных значений реологических параметров и характеристик СПД двухфазных титановых сплавов на примере сплава ВТ6 по модели «SP-среды».

Исследовалось влияние температуры (от 830 °С до 940 °С) и времени выдержки (от 15 мин до 1440 мин) на фазовый состав и микроструктуру сплава ВТ6. Показано, что при увеличении температуры отжига соотношение объема фазовых составляющих изменяется в сторону увеличения доли β-фазы. При температурах на 50÷100 °С ниже температуры полного полиморфного превращения (для сплава ВТ6 $T_{\text{пп}} = 950 \div 1000$ °С) наблюдали соотношение α- и β-фазы примерно 50:50, являющееся оптимальным с точки зрения механизмов СПД.

Исследуя влияние времени выдержки на изменение размера зерна, установили, что ультрамелкозернистая структура двухфазных титановых сплавов обладает высокой термической стабильностью при температурах равенства фаз.

На основании проведенных исследований влияния температуры на реологическое поведение сплава ВТ6 с ультрамелкозернистой структурой установлено, что оптимальной температурой сверхпластичности этого сплава является температура равного объемного соотношения фаз ($T = 900^{\circ}\text{C}$), которой соответствует наибольшее значение показателя скоростной чувствительности напряжения течения (m).

При отжиге образцов из промышленных листов сплава ВТ6, использованных при эксперименте по СПФ в работе показано, что при температуре отжига 900°C изменение размера зерна находится в допустимом диапазоне, который обеспечивает одно из условий проявления сверхпластичности материала ($L \leq 10$ мкм), при длительности выдержки не более 70 мин.

Как известно, во всем исследованном интервале скоростей показатель m больше у образца с меньшим размером структурных составляющих. При этом размер зерна практически не влияет на величину напряжения течения, при котором наблюдается максимальное значение m . При уменьшении среднего размера зерна увеличивается максимум показателя скоростного чувствительности напряжения течения (m) при смещении его в область более высоких скоростей деформации.

В качестве базовой реологической модели поведения материала при СПФ в работе была выбрана известная модель «SP-среды» с соответствующим уравнением (1):

$$\xi_e = \xi_{eq} \exp[\alpha \Omega^{\beta} (\sigma_e - \sigma_{eq}^{sp} Z_T)] \left(\frac{\sigma_e - \sigma_0^{sp} Z_T}{\sigma_s^{sp} Z_T - \sigma_e} \right)^{n_v}, \quad (1)$$

где ξ_e - интенсивность скоростей сдвиговой деформации, с^{-1} ; Ω - обобщенный структурный параметр, мкм; α - коэффициент пропорциональности влияния структурного параметра; β - показатель степени влияния структурного параметра; n_v - показатель степени ползучести; σ_e - интенсивность напряжений течения, МПа; параметры σ_0^{sp} , σ_{eq}^{sp} , σ_s^{sp} представляют собой соответственно пороговое напряжение (МПа), эквикогезионное напряжение (МПа) и условный предел текучести (МПа) при оптимальной температуре СПД – T_{sp} ;

Z_T - температурный множитель выражается параметром Зинера-Холломона:

$$Z_T = \exp\left[\frac{Q_{\sigma}}{R} \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{sp}}\right)\right], \quad (2)$$

где Q_{σ} – кажущаяся энергия активации, кДж/Моль; R – универсальная газовая постоянная, кДж/(моль*К); T_{sp} – оптимальная температура СПД, К.

На основе данных, полученных в работе Ершова А.Н., с помощью специальной программы были рассчитаны значения реологических параметров и температурных коэффициентов в уравнениях (1) и (2), приведенные в таблице 2.

Таблица 2 – Реологические параметры уравнений (1, 2)

Марка сплава	$T_{sp}, ^\circ\text{C}$	$\sigma_0, \text{МПа}$	$\sigma_{eq}, \text{МПа}$	$\sigma_s, \text{МПа}$	$\xi_{eq}, \text{с}^{-1}$	$\alpha, \text{м/Н}$	β	n_v	$Q_0/R, \text{градК}$
ВТ6	900	1	52,5	104	$3,3 \cdot 10^{-2}$	$8,59 \cdot 10^{-3}$	1,07	1,24	18050,54

На основе данных, приведенных в таблице 2, были рассчитаны реологические зависимости напряжений течения σ_e , показатели скоростной чувствительности напряжения течения $m = d(\lg \sigma_e)/d(\lg \xi_e)$ от скорости деформации ξ_e и величины зерна L по уравнению (1) и построены соответствующие графики (рисунок 2).

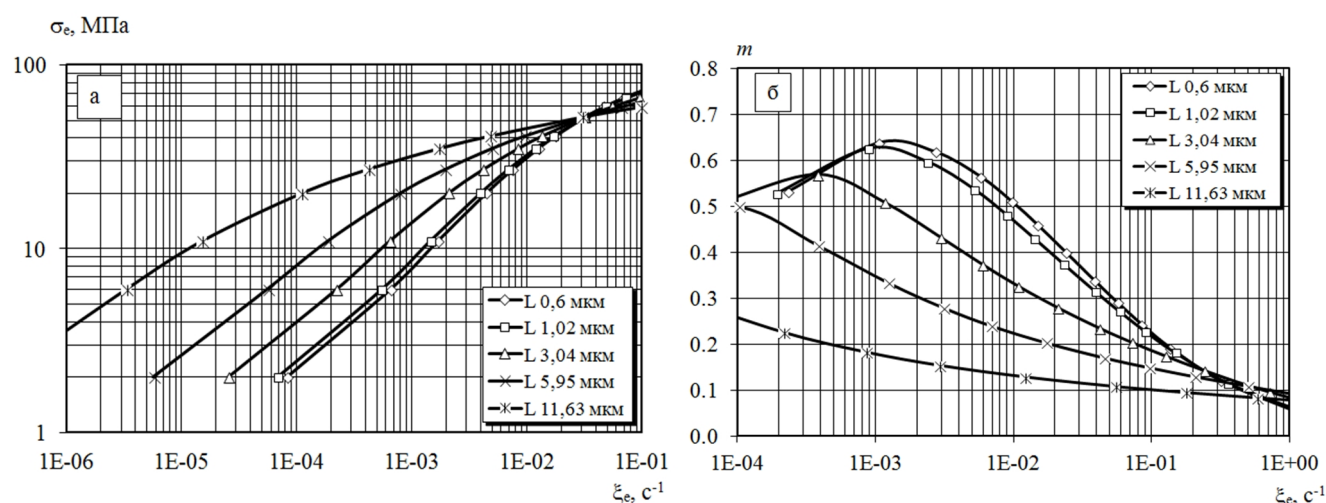


Рисунок 2 – Зависимость напряжения течения (а) и показателя скоростной чувствительности напряжения течения (б) от скорости деформации для различных размеров зерна при температуре $T = 900 ^\circ\text{C}$

Результаты показали, что полученные зависимости отражают известные закономерности сверхпластического поведения сплавов с УМЗ структурой. Размер зерна оказывает определяющее влияние на напряжение течения σ_e и показатель m во всем скоростном интервале СПД, особенно в области низких скоростей деформации. Это влияние уменьшается по мере приближения материала к эквикогезионному состоянию, которое характеризуется равенством энергетических вкладов межзеренной и внутризеренной деформации при СПД. В эквикогезионном состоянии реологическое поведение СПМ становится структурно независимым, т.е. размер зерна не влияет на зависимость напряжения течения от скорости деформации. Рост среднего размера зерна приводит к повышению напряжения течения при одной и той же величине скорости деформации и к снижению показателя m и смещению его в сторону более низких скоростей деформации.

В четвертой главе приведены результаты компьютерного моделирования процессов формовки типовых оболочек в состоянии СП. Моделирование производили в системе *FEM CAD* с использованием значений реологических

характеристик, определенных для сплав ВТ6 в главе 3.

Были разработаны типовые компьютерные модели *FEM CAD* для процессов СПФ полых оболочек с макро- и микрорельефом. Расчеты по этим моделям позволили установить основные закономерности формоизменения оболочек при рациональных и отличных от них режимах СПФ по температуре и скорости деформации.

Было проведено моделирование одного из основных процессов СПФ оболочек – свободная формовка. Исходя из результатов компьютерного моделирования, была построена зависимость относительной высоты, накопленной деформации, интенсивности скорости деформации и напряжения от времени формовки при различном давлении газа. Определена оптимальная величина давления газа ($P = 1,6$ МПа) для предложенной модели при свободной формовке. На рисунке 3 показаны зависимость относительной высоты купола $H=h/r_0$ (r_0 - радиус отверстия матрицы; h - высота вершины купола) от времени (а) и зависимость эффективной скорости деформации в вершине купола от его относительной высоты (б).

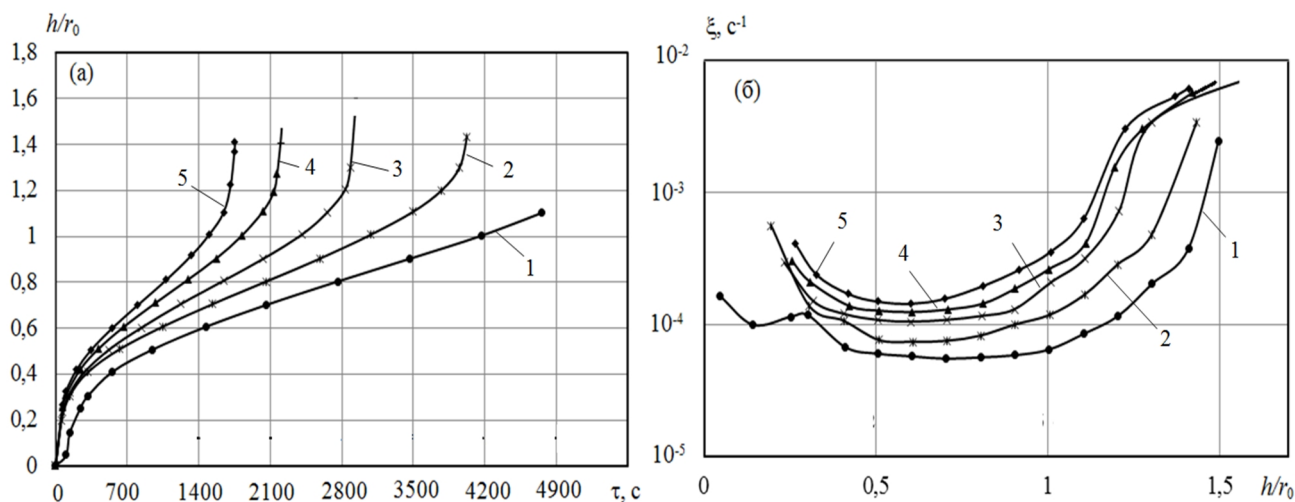


Рисунок 3 – Зависимость относительной высоты купола от времени формовки (а) и скорости деформации в вершине купола от его относительной высоты (б) при давлении P : 1 - 1,2 МПа; 2 - 1,4 МПа; 3 - 1,6 МПа; 4 - 1,8; 5 - 2 МПа.

Результаты компьютерного моделирования показали, что в начальный период деформирования материала идет по всему сечению заготовки, после формирования полусферы деформация происходит только в участках, не соприкасающихся со штампом. На всех стадиях формовки наибольшее значение степени деформации достигается в области вершины формируемого купола, что приводит к неравномерному утонению деформируемой мембраны и вызывает разнотолщинность стенок полученного купола. Превышение предельного значения накопленной степени деформации сопровождается разрывом материала в вершине купола.

Компьютерное моделирование свободной формовки при различном давлении показало, что чем больше давление газа, тем интенсивнее утонение в вершине купола, т. е. растет неравномерность толщины стенок получаемых

оболочек. С увеличением давления газа профиль купола меняется от сферического к параболическому (рисунок 4).

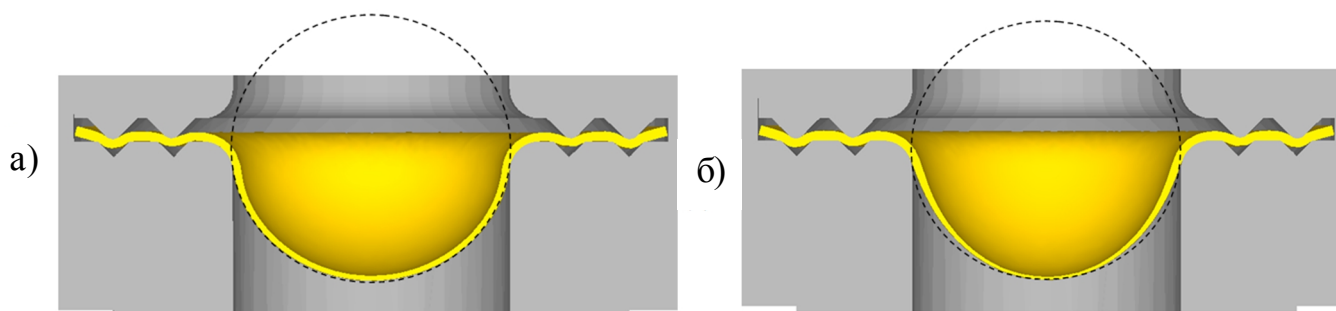


Рисунок 4 – Форма куполов при свободной формовке с различными давлениями. а – $P = 1,6$ МПа; б – $P = 2$ МПа

Проводилось моделирование формовки оболочек с продольными рифтами различного сечения, оболочек с куполов разного диаметра и оболочек с продольными рифтами разной ширины (рисунок 5).

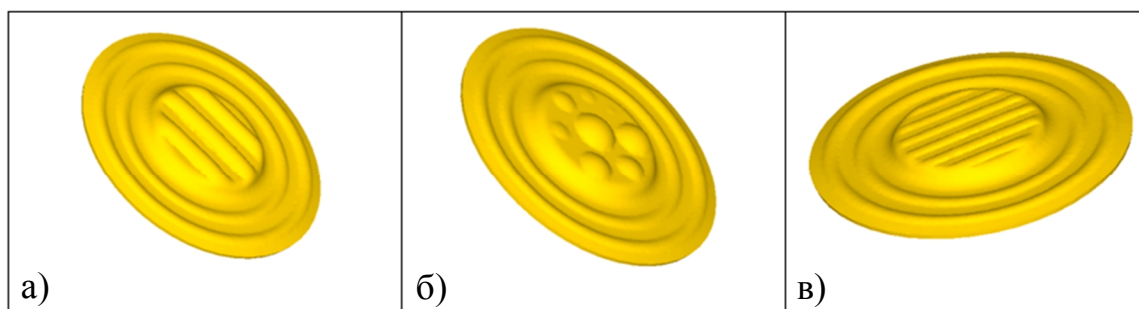


Рисунок 5 – Вид оболочек с продольными рифтами разного сечения (а), оболочек с куполов разного диаметра (б) и оболочек с продольными рифтами разной ширины (в), полученных при моделировании микроформовки

Полученные результаты показали, что при СПФ оболочек с продольными рифтами разного сечения, материал заполняет каналы матрицы в виде треугольника труднее, чем каналы в виде квадрата и круга. Степень деформации в областях, которые соприкасаются с краями рифтов матрицы больше, чем в остальных участках. Высота отформованных рельефов сильно зависит от размера гравюры на поверхности матрицы. Материал не заполняет элементы гравюры матрицы, ширина которых меньше половины толщины исходного листа заготовки. Увеличение времени и давления газа способствует увеличению степени воспроизведения рельефа.

Было установлено, что скорость деформации является одной из важнейших характеристик СПД, обуславливающих способность к формообразованию материала. При СПФ с постоянным давлением скорость деформации меняется, и она может выходить из скоростного интервала, обеспечивающего условия проявления сверхпластичности. Для обеспечения скорости деформации, которая постоянна или изменяется в допустимых пределах, в процессе СПФ требуется регулирование давления газа по определенной закономерности. В работе

использовалась методика расчета режима СПФ эллиптической мембраны для определения закономерности давления газа при реверсивной формовке.

Уравнения для описания зависимости давления газа от времени формовки по модели расчет СПФ эллиптической мембраны приведены в параметрическом виде (3, 4):

$$p(\alpha) = \frac{s_0}{a} \sigma_{\text{opt}} \cdot \frac{\sin \alpha}{\alpha} \cdot \frac{\sin \beta}{\beta} \cdot \frac{\sin \alpha + \eta(a/b) \cdot \sin \beta}{\sqrt{1 + \eta^2 - \eta}}, \quad (3)$$

$$\xi_{\text{opt}} t = F(\alpha) = \frac{2}{\sqrt{3}} \int_0^\alpha \left(\frac{1}{x} - \text{ctg} x \right) \sqrt{1 + \frac{a}{b\psi} + \frac{a^2}{b^2\psi^2}} dx = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{1 + \frac{a}{b\psi} + \frac{a^2}{b^2\psi^2}} \ln \frac{\alpha}{\sin \alpha}, \quad (4)$$

где:

$$\psi = \frac{\cos^2(\alpha/2)}{\cos^2(\beta/2)} \cdot \frac{(1/\alpha - \text{ctg} \alpha)}{(1/\beta - \text{ctg} \beta)}, \quad \eta = \frac{2a + b\psi}{a + 2b\psi}.$$

a , b – главные полуоси эллиптической мембраны; σ_{opt} – напряжение соответствующее оптимальной скорости деформирования ξ_{opt} , определенной на основе реологического поведения исследуемого материала в состоянии сверхпластичности.

По вычисленным результатам были построены графики зависимости давления газа от времени деформации при реверсивной формовке полусфер из титановых листов на основе реологических характеристик сплава ВТ6 и ВТ23 в состоянии СП. Полученные результаты предварительно проверены методом компьютерного моделирования для оценки их достоверности.

В пятой главе описаны результаты экспериментов СПФ оболочек с целью оценки формуемости листов титановых сплавов при свободной формовке и формовки в матрицу с различным типом гравюр, при этом экспериментальные результаты для оценки адекватности моделей сопоставлялись с данными компьютерного моделирования СПФ.

Для СПФ спроектировали и изготовили пресс-форму и матрицы (рисунок 6). Эксперименты проводили следующим образом: вырубленную в размер заготовку укладывали в предварительно нагретую пресс-форму с соответствующей матрицей.

Специальным держателем помещали пресс-форму в штамповый блок, находившийся в нагретой электропечи. Во



Рисунок 6 – Пресс-форма и матрицы

время восстановления температуры печи до оптимального значения для СПД осуществляли под-прессовку штампового блока гидравлическим прессом с целью образования герметизирующих рифтов. Далее, после достижения заготовкой температуры СПФ, не снимая усилия пресса, подавали сжатый газ в пространство между крышкой штампового блока и заготовкой, фиксировали время начала СПФ и отслеживали заданную продолжительность формовки. После этого газовое давление внутри штампа сбрасывали, с помощью специального выталкивателя

доставали штамповый блок из печи и извлекали готовую оболочку из штампа. Примеры оболочек, полученных при СПФ, показаны на рисунке 7.

По результатам обработки экспериментальных данных были определены необходимые и достаточные значения технологических параметров процессов СПФ для получения предельных и допустимых деформаций при формовке оболочек разных геометрических форм. Также были проанализированы распределения толщин стенок по характерным сечениям оболочек, измерены их геометрические параметры и произведена оценка степени заполнения гравюр матриц.



Рисунок 7 – Оболочки, полученные СПФ

При оптимальной температуре 900°C , проведена свободная формовка с давлением газа 1,2 МПа; 1,6 МПа; 2 МПа для определения оптимальной величины значения давления газа. Из результатов эксперимента получили зависимость относительной высоты купола H от времени формовки τ при различном давлении газа (рисунок 8). Установлено, что при давлении газа $P = 1,6$ МПа скорость деформации соответствует диапазону скоростей, при которых показатель $m \geq 0,3$ на всех стадиях формовки.

Для исследования влияния текстуры прокатки исходного листа на процесс формовки проводили замер толщины стенок и анализ микроструктуры полусфер, полученных при СПФ с давлением $P = 1,6$ МПа, в продольном (Д) и поперечном (П) направлении прокатки. Полученные результаты (рисунок 9) показали, что с увеличением высоты купола толщина стенок в его вершине непрерывно уменьшается. Относительная степень деформации достигает $e_s = 90\%$ при давлении газа $P = 1,6$ МПа.

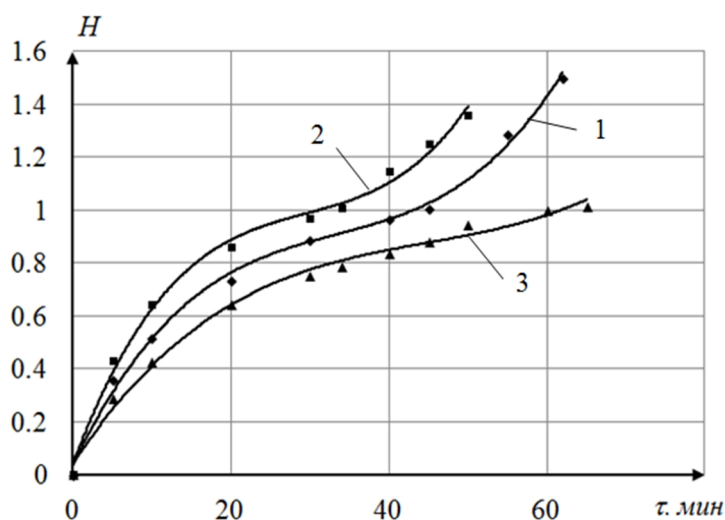


Рисунок 8 – Зависимость относительной высоты купола H от времени формовки τ при давлении газа P :

1 - 1,6 МПа; 2 - 2 МПа; 3 - 1,2 МПа

Разнотолщинность полусфер, измеренная в продольном и поперечном направлении прокатки, не велика. Максимальное отличие в утонении стенок между двумя сечениями полусферы наблюдается в основании купола, но и оно не

превышает 4%. Характер микроструктуры в продольном и поперечном направлении одинаков.

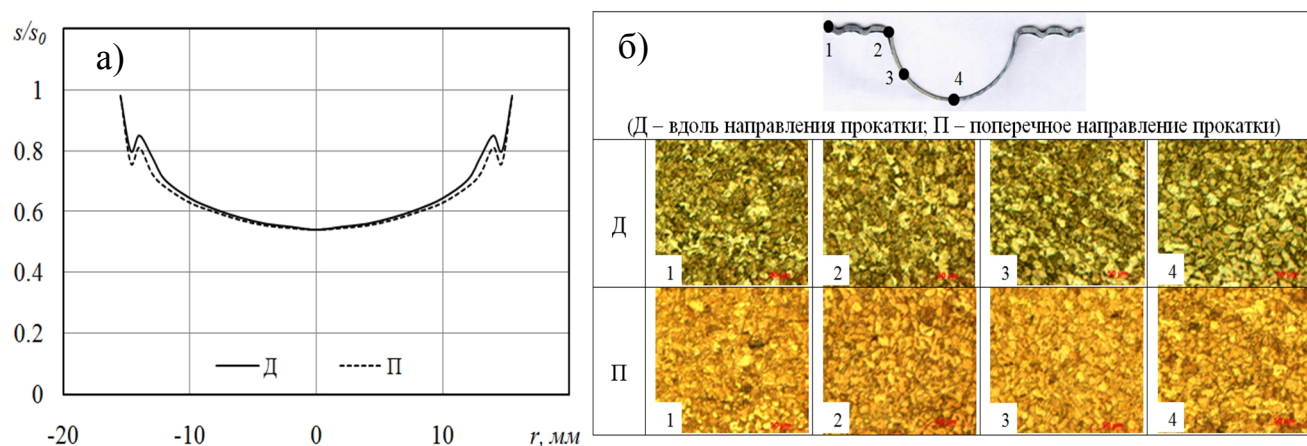


Рисунок 9 – Распределение толщины стенок по радиусу полусферы (а) и микроструктура в различных участках полусферы после СПФ x200 (б)

Для оценки влияния скорости деформации на способность материала к формообразованию и процесс изменения микроструктуры проводили свободную выдувку заготовок с разным давлением $P = 1,6$ МПа (образец - №1) и $P = 2$ МПа (образец - №2), но при одной температуре. На основании результатов были построены графики распределения толщины стенок полусфер (рисунок 10) и зависимости размера зерна от степени деформации (рисунок 11).

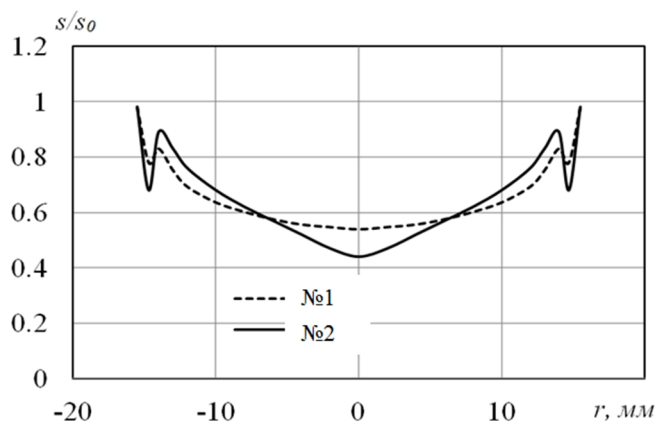


Рисунок 10 – Распределение толщины стенок по радиусу полусферы

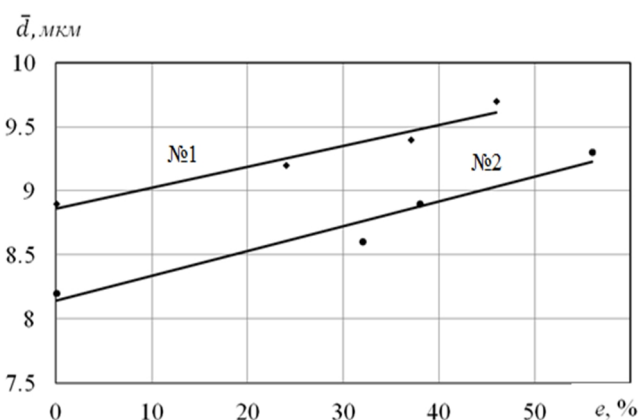


Рисунок 11 – Зависимости размера зерна от степени деформации

Видно, что при увеличении давления газа скорость деформации возросла, и необходимое время для получения полусферы уменьшилось. Однако при этом разнотолщинность по сечению полусферы резко увеличилась. Увеличение степени деформации способствует росту зерна, но главной причиной роста зерна и соответственно уменьшения способности материала к СПД являются процесс нагрева заготовки перед СПФ и продолжительность СПФ. Кроме того результаты эксперимента показали, что при температуре, отличающейся от оптимальной, процесс формовки для получения полусферы совершался медленнее, а при пониженной температуре полусфера оформилась не полностью.

В работе проводили эксперименты по СПФ сложных оболочек в виде продольных рифтов различного сечения. Исходя из полученных данных, были построены графики распределения степени деформации по местам измерения образцов (образец №7 – рифты параллельны направлению прокатки исходной заготовки и образец №8 – рифты перпендикулярно к направлению прокатки исходной заготовки) (рисунок 12).

Видно, что хотя давление газа достигает максимально допустимого значения и формообразование длится достаточно долго, материал не полностью заполняет гравюру штампа. Различие по всему сечению в обоих образцах не велико. Однако, степень деформации в областях, которые соприкасаются с рифтами матрицы больше, чем в остальных участках. Металлографические исследования показали, что форма и размер зерна в различных участках этих образцов примерно одинаковы.

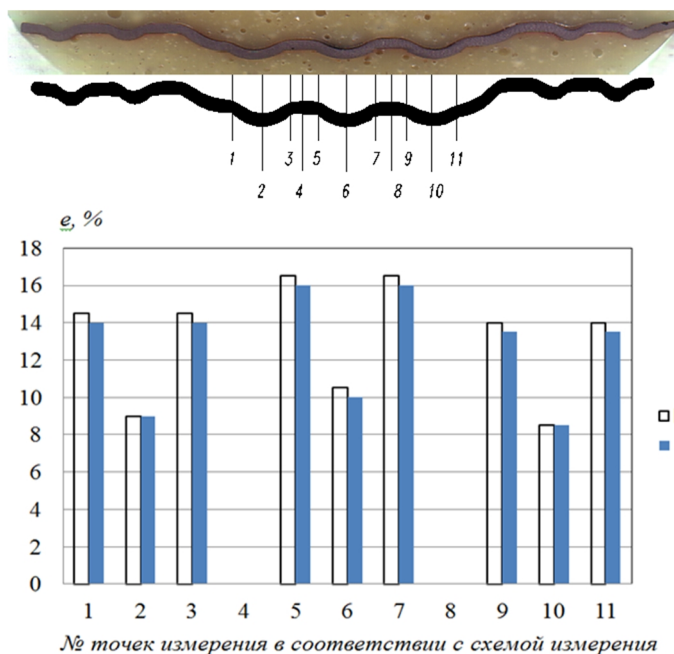


Рисунок 12 – Распределение степени деформации по местам замера

Для оценки способности материала к заполнению гравюры матриц проведены эксперименты по СПФ оболочек в матрицах, имеющих гравюру в виде каналов и отверстий различного размера. По результатам измерений высоты рельефов был построены графики зависимости высоты рельефов от ширины канавки и диаметра отверстий матрицы (рисунок 13).

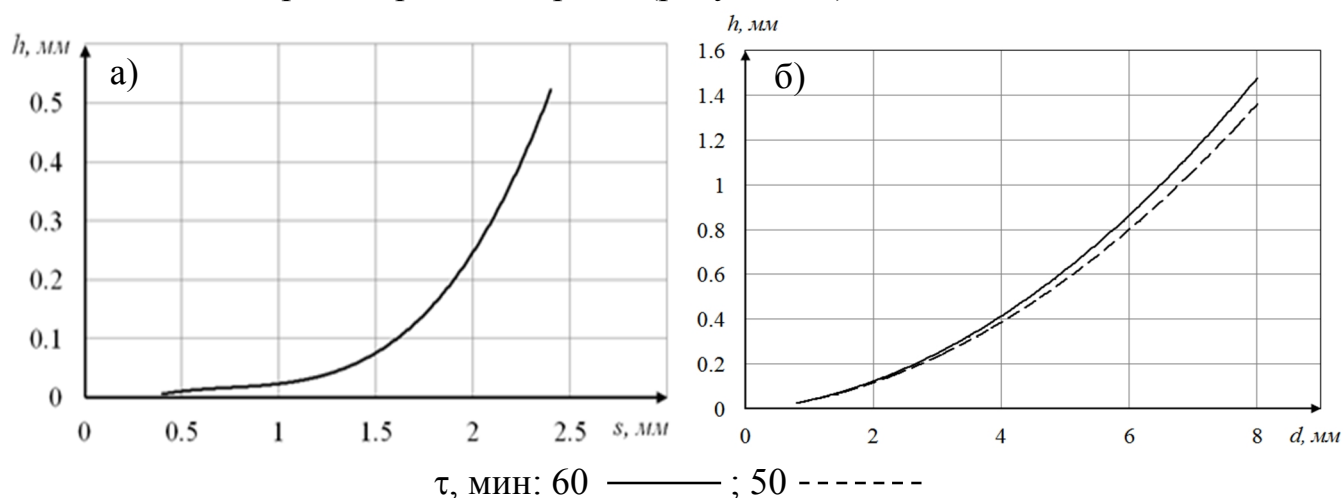


Рисунок 13 – Зависимости высоты рельефов от ширины канавки матрицы (а) и высоты куполов от диаметра отверстия матрицы (б)

Показано, что высота рельефов сильно зависит от размера гравюры. Для гравюры матрицы в виде каналов, ширина которых меньше половины толщины, и

в виде отверстий, диаметр которых меньше толщины исходного листа, при давлении газа меньше 2,3 МПа рельеф полностью не оформляется. При увеличении времени выдержки при СПФ высота рельефов в виде купола немного возрастает и эта зависимость четко прослеживается для куполов большего размера.

На основе полученных результатов была разработана методика комплексной оценки формруемости листов из двухфазных титановых сплавов и технологии СПФ оболочек, общая схема которой показана на рисунк 14.

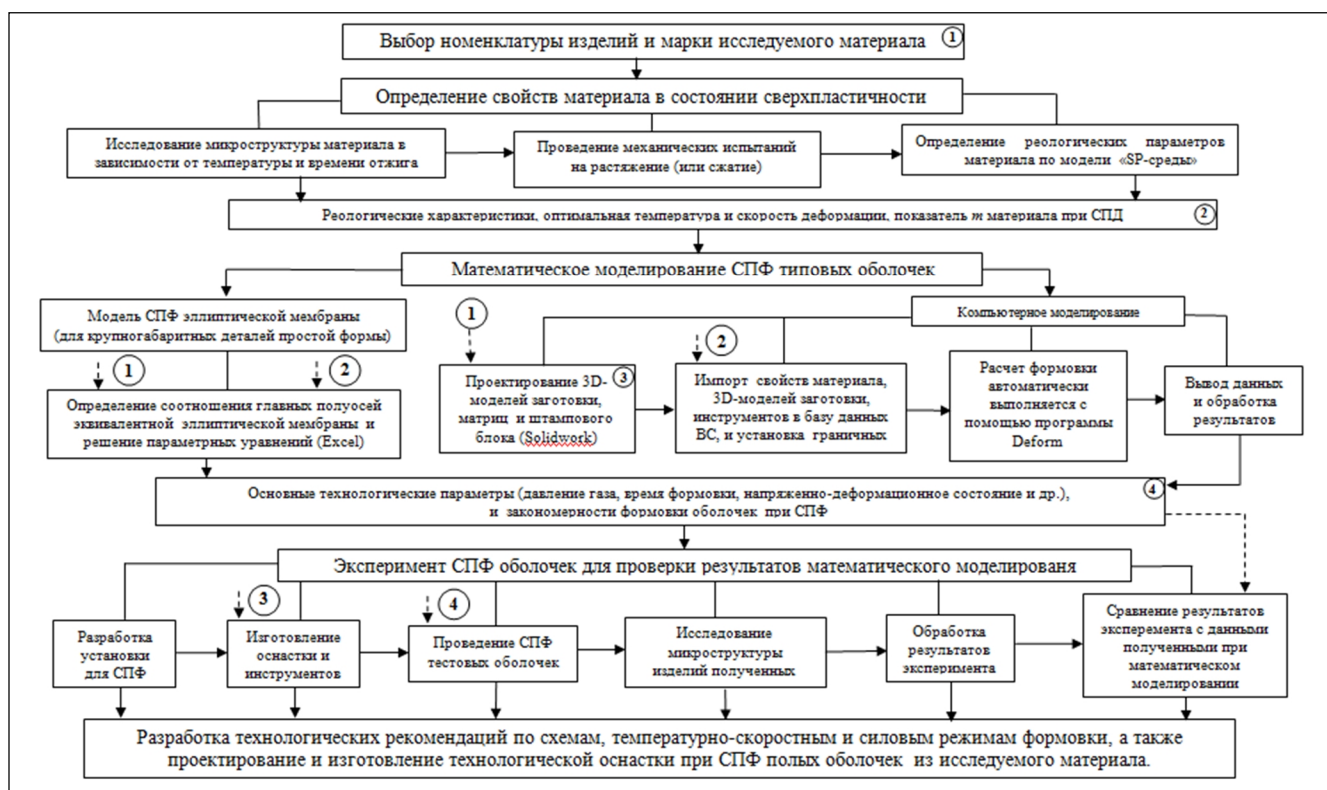


Рисунок 14 – Методика комплексной оценки формруемости листов из двухфазных титановых сплавов

Практическое применение предложенной методики комплексной оценки формруемости листов из двухфазных титановых сплавов проверялось на среднелегированном двухфазном титановом сплаве ВТ23 при изготовлении полусфер с помощью методики сверхпластической реверсивной формовки, схема которой приведена на рисунок 15. Процесс формовки проходит в две стадии. Первоначально под действием давления газа (P_1) образуется промежуточный профиль (I). Реверсируя давление газа (P_2), происходит «выворачивание» полуфабриката. Полученная в результате формовки в два перехода деталь (II) характеризуется выравниванием общей

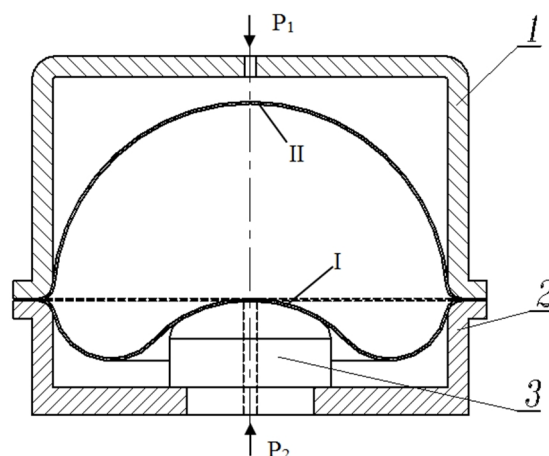


Рисунок 15 – Схема процесса реверсивной формовки

деформации по всей полусфере и относительно небольшой разнотолщиной стенок.

На рис. 16 показаны результаты реверсивной формовки на первой стадии получения полусферы (а) и готовое изделие (б). Результаты СПФ оболочек сплава ВТ23 соответствуют расчетам и данным полученным при СПФ для сплава ВТ6. Это подтверждает, что предложенная методика исследования СПФ оболочек, разработанная на примере сплава ВТ6, позволяет оценить способность материала к формоизменению и разработать технологию СПФ оболочек для всех двухфазных титановых сплавов в промышленном производстве.

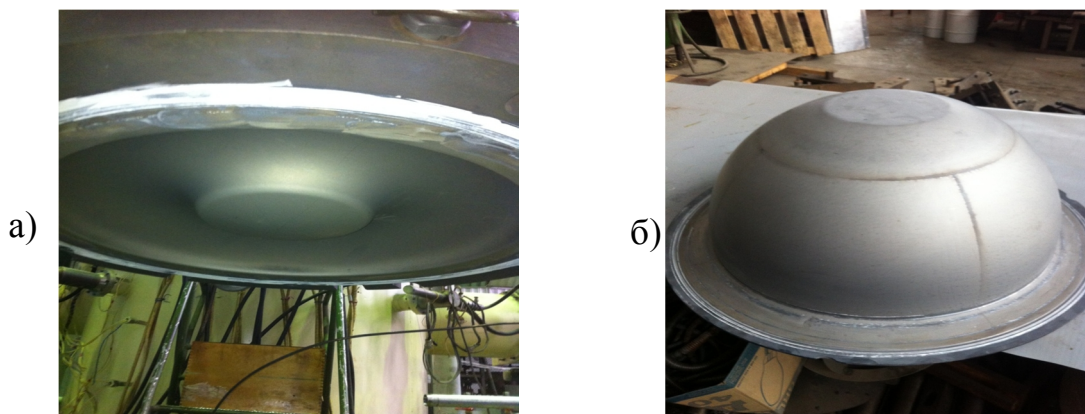


Рисунок 16 – Первая стадия формовки (а) и готовое изделие (б)

Были подготовлены рекомендации по температурно-скоростным, силовым и временным режимам СПФ двухфазных титановых сплавов. В частности:

- для двухфазных титановых сплавов оптимальная температура при СПФ находится в $(\alpha+\beta)$ -области и на $50\div 100$ °С ниже температуры полного полиморфного превращения, в частности, для сплава ВТ6 температурный интервал СПФ составляет $890\ldots 910$ °С, а для сплава ВТ23 – $830\div 860$ °С;
- в оптимальном интервале температур скорость деформации при СПФ изменяется от 1×10^{-4} до 2×10^{-3} с⁻¹, соответствующем показателю скоростной чувствительности $m > 0,3$;
- для заготовки из листов двухфазных титановых сплавов толщиной $0,5\ldots 1,5$ мм с ультрамелким зерном до 10 мкм в зависимости от схемы СПФ и формы оболочек можно использовать давление газа от 1,2 до 2,3 МПа;
- для промышленных листов двухфазных титановых сплавов время выдержки СПФ не должно превышать 65 мин для обеспечения микроструктурных условий СП.

Подготовлены рекомендации для разработки технологии СПФ оболочек из двухфазных титановых сплавов, которая включает следующие основные этапы:

- анализ и выбор номенклатуры изделий, разработка эскизов деталей с учетом требований технических условий для изготовления деталей СПФ;
- на основании эскизов деталей с помощью компьютерных программ строят твердотельные, объемные модели будущего изделия, изготовление которого проводится СПФ;

- проектирование геометрических 3D-моделей матриц с гравюрой штампа исходя из особенностей деталей, получаемых СПФ;
- проектирование технологического штампового блока для СПФ. Спроектированная 3D-модель матрицы устанавливается в модели корпуса технологического блока и дооснащается необходимыми конструктивными элементами;
- компьютерное моделирование процесса СПФ оболочек из двухфазных титановых листов;
- анализ результатов моделирования и выбор рациональных технологических параметров формовки;
- выбор способа изготовления элементов технологической оснастки;
- изготовление матриц и штампового блока в металле по разработанным моделям и чертежам;
- проведение СПФ опытных образцов оболочек из двухфазных титановых листов;
- анализ точности размеров и геометрических параметров оболочек, структуры и свойств металла после СПФ для сравнения с техническими условиями;
- выбор финишной обработки, отделочных операций и технологии сборки изделия;
- составление технологической карты производства и промышленное освоение.

Кроме того были разработаны рекомендации по проектированию штамповых блоков и инструмента для СПФ.

Основные результаты работы и выводы

1. На основе анализа научно-технической и патентной литературы о процессах СПФ двухфазных титановых сплавов в качестве модельного выбран сплав ВТ6.

2. Исследования микроструктуры листовых заготовок из сплава ВТ6, используемых при СПФ показали, что размер зерна после нагрева до температуры СПД удовлетворяет условиям структурной СП.

3. Проведены расчеты параметров и основных реологических зависимостей двухфазных титановых сплавов в состоянии СП (на примере ВТ6) по модели «SP-среды» с учетом температуры и размера зерна. Выбраны рациональные термо-механические и кинематические режимы для моделирования процессов СПФ оболочек.

4. Разработаны компьютерные модели процессов при СПФ полых оболочек из двухфазных титановых сплавов, позволяющие установить основные закономерности и характеристики формоизменения оболочек при различных режимах СПФ.

5. СПФ листов сплава ВТ6 показала, что при оптимальной температуре и скорости СПД, данные компьютерного моделирования соответствуют экспериментальным значениям с точностью до 15% по времени, а по распределению толщин стенок и по профилю оболочек с точностью до 8-10%. Направление прокатки исходного листа заготовки не оказывает существенного

влияния на параметры готовых изделий. Формирование микрорельефов затруднено и требует длительной выдержки и высокого давления газа.

6. Разработана методика комплексной оценки формуемости листов из двухфазных титановых сплавов с УМЗ структурой, сочетающая компьютерное моделирование и экспериментальную проверку формовки типовых оболочек и элементов рельефа, проверенная на примере СПФ сплавов ВТ6 и ВТ23. Показано, что получаемые схемы, температурно-скоростные и силовые режимы СПФ полых оболочек применимы для практического использования.

Основное содержание работы отражено в следующих публикациях

1. А. Н. Варгин, Г. С. Бурханов, Н. С. Зунг, В. И. Польшин. Компьютерное моделирование сверхпластической формовки оболочек из титановых сплавов ВТ6 и ВТ23. Международный научный журнал, Москва, 2013, №6, с 65 – 71 (**Рекомендован ВАК**).

2. Н. С. Зунг, В. И. Польшин. Расчет давления газа при реверсивной сверхпластической формовке титановых сплавов. Международный технико-экономический журнал, Москва, 2014, №1, с 103 – 107 (**Рекомендован ВАК**).

3. Н. С. Зунг, В. И. Польшин. Оптимизация режимов сверхпластической формовки оболочек из титанового сплава ВТ6. Технология легких сплавов, Москва, 2014, №1, с 91 – 96 (**Рекомендован ВАК**).

4. А. Н. Варгин, Н. С. Зунг, О. М. Смирнов. Исследование процесса реверсивной сверхпластической формовки полусферической оболочки из листа сплава ВТ6. Сборник докладов и научных статей XI конгресса «Кузнец-2012. Перспективы инновационного и конкурентоспособного развития кузнечно-прессового машиностроения и кузнечно-штамповочных производств», Рязань, ОАО «Тяжпрессмаш», с 258 – 268.

5. Н. С. Зунг, В. И. Польшин. Разработка технологии сверхпластической формовки полусфер из двухфазных титановых сплавов. Сборник докладов международного научно-технического конгресса «ОМД-2014. Фундаментальные проблемы. Инновационные материалы и технологии», Москва, НИТУ МИСиС Том 2, с 333 – 336.