

На правах рукописи



ВУ ЧОНГ БАЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ
ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ
ДЕФОРМАЦИИ**

05.02.09 – Технологии и машины обработки давлением

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский политехнический университет»

Научный руководитель: **Бурлаков Игорь Андреевич**
доктор технических наук, ст. науч. сотр

Официальные оппоненты: **Хван Александр Дмитриевич**
доктор технических наук, инновационный бизнес-инкубатор федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный университет», директор

Сосенушкин Александр Евгеньевич
кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», доцент

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Защита диссертации состоится «10» декабря 2020 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.271.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» по адресу: 300012, г. Тула, проспект Ленина, д. 92, 9-101.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» и на сайте:
http://tsu.tula.ru/science/dissertation/diss--212-271-01/Vu_Chong/

Автореферат разослан «20» октября 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Черняев
Алексей Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Развитие современных отраслей машиностроения предъявляет все более высокие требования к качеству и эксплуатационным свойствам конструкционных материалов и снижению массы изготовленных из них изделий, в том числе пустотелых деталей обтекаемой формы с изотропными свойствами для машиностроения. Основным материалом для изготовления обтекателей летательных аппаратов является холодно деформируемый технически чистый титан ВТ1-0.

Решением этой задачи может являться улучшение свойств металлических материалов путем формирования в них заданной структуры, позволяющей существенно повысить эксплуатационные свойства деталей, а также обеспечить технологичность и экономичность процессов их изготовления. Одним из перспективных путей повышения механических свойств является применение материалов с ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой, получаемой интенсивной пластической деформацией (ИПД).

Однако промышленное освоение производства ответственных деталей с использованием таких материалов сдерживается недостаточной разработкой промышленных схем получения заготовок с УМЗ структурами и требует развития новых технологий, направленных на решение задач структурообразования, определения рациональных режимов и, в конечном итоге, создания целесообразной технологии получения изделий с однородной УМЗ структурой и улучшенными эксплуатационными свойствами.

Таким образом, теоретическое обоснование технологических режимов ИПД заготовок из титана ВТ1-0, заключающейся в комбинации интенсивнойковки с последующей осадкой с кручением, обеспечивающих повышение прочностных характеристик и снижение массы осесимметричных тонкостенных изделий типа «обтекатель» летательных аппаратов является актуальной научной задачей, решение которой имеет существенное значение для двигателестроения.

Цель работы: снижение массы осесимметричных тонкостенных изделий путем теоретического обоснования рациональных технологических режимов повышения прочностных характеристик заготовок титана ВТ1-0 методом ИПД.

Задачи работы:

1. Определить закономерности влияния термомеханических режимов (температуры, скорости и величины деформации) заготовок технического титана ВТ1-0 комбинированной обработки, позволяющие повысить точность компьютерного имитационного моделирования процессов формообразования осесимметричных тонкостенных заготовок.

2. Установить закономерности повышения прочностных свойств заготовок титана ВТ1-0 в зависимости от режимов ИПД в комбинации с последующими термомеханическими обработками.

3. Оценить влияние интенсивнойковки и последующей осадки с кручением заготовок на прочностные характеристики тонкостенных изотропных заготовок титана ВТ1-0.

4. Разработать усовершенствованный технологический процесс получения осесимметричных тонкостенных заготовок изделий обтекаемой формы уменьшенной на 15-20% массы и изготовить опытные образцы изделий.

Объект исследования. Операция интенсивнойковки в комбинации с осадкой с кручением.

Предмет исследования. Прочностные характеристики заготовок из сплава ВТ1-0, полученных методом интенсивной пластической деформации.

Методы исследования. Теоретические исследования базируются на использовании теории пластичности, сопротивления материалов и теоретической механики, а также на основных положениях технологии машиностроения. Экспериментальные исследования выполнены с использованием современных измерительных приборов и оборудования: микроскопа “Olympus Delta” с увеличением 100, 500, 1000 и 10000, сканирующего зондового микроскопа СММ-2000, испытательных машин моделей LFM50, LFM250, гидравлического пресса модели ПА-2636, модернизированного пресса ДБ-2432А. Микротвердость (HV_{ср}) на образцах замерялась на приборе «DuraScan 20» при нагрузке 1Н (100 г). При выполнении исследований использовался метод планирования экспериментов.

Автор защищает:

1. Комбинированную обработку, включающую сочетание интенсивнойковки с осадкой с кручением при различных технологических параметрах, позволяющих установить закономерность формирования свойств технического титана ВТ1-0 в зависимости от режимов обработки.

2. Разработанную методику повышения прочностных характеристик заготовок из титана ВТ1-0, позволяющую достигнуть высокого уровня прочностных и пластических свойств заготовок после их комбинированной обработки, обеспечивающей снижение массы деталей на 15 – 20%, а также экспериментально полученные закономерности повышения прочностных свойств заготовок титана ВТ1-0 в зависимости от режимов ИПД в комбинации с последующими термомеханическими обработками, в т.ч. от температуры нагрева штампа, от температуры нагрева исходной заготовки, от угла поворота инструмента при осадке с кручением.

3. Реологическую модель напряжения текучести работоспособную в двух диапазонах температур (20-400 °С, 600-800 °С) при скоростях деформации 10^{-3} - 10^{-1} с⁻¹.

4. Способ получения круглых листовых заготовок с изотропными свойствами, включающий комбинацию интенсивнойковки с осадкой с кручением.

Научная новизна:

1. Впервые получена реологическая модель напряжения текучести в широком диапазоне температур (от 20 до 800 °С) и скоростей деформации (0,001; 0,01; 0,1 сек⁻¹) при различных значениях деформации заготовок титана ВТ1-0.

2. Определены закономерности влияния режимов ИПД (интенсивнаяковка в сочетании с последующей осадкой с кручением) на особенности формирования повышенных прочностных свойств заготовок титана ВТ1-0 в ходе интенсивной

пластической деформации с последующей осадкой с кручением, позволяющие повысить предел прочности σ_b с 380-400 МПа до 1400-1500 МПа.

Практическая значимость.

1. Впервые полученная реологическая модель напряжения текучести позволяет пополнить базу данных деформируемых материалов в программах для имитационного моделирования процессов обработки давлением, в частности, ротационную вытяжку либо штамповку осесимметричных тонкостенных изделий, и получать более точные результаты расчета.

2. Определены условия получения тонкостенных осесимметричных заготовок с толщиной стенок от 1,0 до 2,5 мм, позволяющие существенно расширить технологические возможности применения процесса осадки с кручением.

Реализация работы. Определены технологические режимы получения титановых заготовок и полуфабрикатов с УМЗ структурой, обеспечивающие достижение повышенных прочностных свойств титана ВТ1-0 (2,5-3,0 раза выше, чем у исходного материала).

Результаты диссертационной работы могут быть использованы при разработке технологических процессов изготовления полых осесимметричных деталей с толщиной стенки от 1,0 до 2,5 мм.

Отдельные результаты исследований, выполненных в диссертации использованы в учебном процессе при подготовке магистров по направлению 15.04.01 «Машиностроение» профиль «Технологический инжиниринг в обработке материалов давлением» в Московском политехническом университете, а также во Вьетнамском университете им. Чан Дай Нгчхиа.

Апробация результатов работы, результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: на XIV-государственной конференции по механике твердого тела (Хошимин, Вьетнам, 19.07.2018); на форуме «Моделирование процессов штамповки, прокатки и прессования в QForm» (Москва, 01.10.2019); на V Международной научно-технической конференции «Механика пластического формоизменения. Технологии и оборудование обработки материалов давлением» (Тула, ТулГУ, 19.04.2019), международной научно - технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века» (Севастополь, ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», 25.09.2019).

Публикации. Основные результаты работы опубликованы в 9 печатных работах, из них 7 в журналах из перечня ВАК и Scopus.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения и четырёх глав, заключения и приложения. Полный объем диссертации составляет 134 страниц с 58 рисунками и 11 таблицами. Список литературы содержит 72 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, представлены основные результаты, выносимые на защиту, отмечены их научная новизна и практическая ценность диссертационной работы.

В первой главе проведен аналитический обзор литературы, в котором рассматриваются подходы к изготовлению деталей типа обтекателей.

В последние годы внимание специалистов, занимающихся созданием, исследованием и обработкой новых материалов, позволяющих повысить удельную прочность и снизить массу деталей, привлекло новое научное направление, связанное с вопросами формирования ультрамелкозернистой структуры в металлах и сплавах методом ИПД. Исследования, выполненные отечественными (В.И. Копылов, Р.З. Валиев, В.В. Рыбин и др.), а также зарубежными учеными (Г. Гляйтер, Т. Ленгдон и др.) показали, что свойства таких материалов существенно отличаются от свойств соответствующих исходных материалов по прочности и пластичности.

В работе приведен анализ современных направлений повышения эксплуатационных характеристик заготовок, в т. ч. равноканального углового прессования (РКУ), ротационной ковки, всесторонней ковки, кручения тонких дисков, комбинации вышеперечисленных методов и др. Особое внимание уделено деформационным методам обработки заготовок из титановых сплавов.

Определено, что одним из наиболее эффективных способов изменения структуры металлов является применение больших деформаций (В.Н. Субич, Р.З. Валиев, Г.А. Салищев, С.В. Жеребцов, И.В. Александров, С.В. Добаткин, Ю.Р. Колобов, И.В. Кандров и др.).

Во второй главе приведены методики исследования, описаны оборудование и метод инверсионного анализа, используемые для решения поставленных задач по повышению механических свойств в заготовках из титана ВТ1-0. Металлографические исследования осуществляли на бинокулярном микроскопе "Olympus Delta" с увеличениями 100, 500 и 10000 и сканирующем зондовым микроскопе СММ-2000.

Механические испытания на растяжение выполнены на испытательной машине модели LFM50 со скоростью 2 мм/мин. Образцы были изготовлены методом электроэрозии (рис. 1).

Для получения заготовок из титана ВТ1-0 использовали комбинированную схему деформации, включающей интенсивную ковку и осадку с кручением (рис. 2).

Первоначально заготовки с мелкозернистой структурой получали методом всесторонней ковки в интервале температур 300-400 °С на гидравлическом прессе ПА-2636 силой 400 тс со скоростью деформации $\sim 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. Полученные заготовки имели диаметр 35 и длину 95 мм; после интенсивной ковки, применяли модернизированный гидравлический пресс модели ДБ2432А (рис. 3), обеспечивающий режимы, позволяющие получать заготовки с УМЗ структурой (осадкой с кручением). Для построения математической модели сопротивления титана ВТ1-0 деформации была выбрана эмпирическая модель, предложенная Хензелем-Шпиттелем, устанавливающая связь между напряжением текучести σ_i и термомеханическими параметрами:

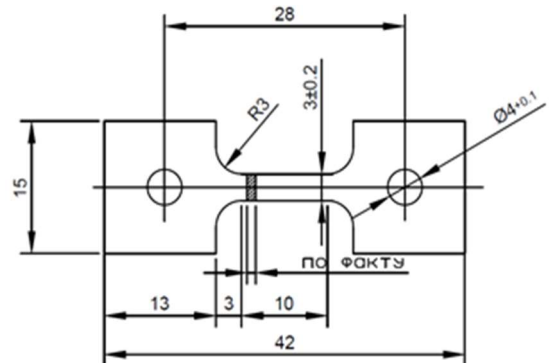


Рис. 1. Образец для испытаний на растяжение

$$\sigma_i = A \cdot (\exp(m_1 \cdot T)) \cdot T^{m_9} \cdot \varepsilon^{m_2} \cdot (\exp(m_4 / \varepsilon)) \cdot (1 + \varepsilon)^{m_5 \cdot T} \cdot (\exp(m_7 \cdot \varepsilon)) \cdot \dot{\varepsilon}^{m_3} \cdot \dot{\varepsilon}^{m_8 \cdot T} \quad (1)$$

где A , m_1 , m_2 , m_3 , m_4 , m_5 , m_7 , m_8 , m_9 – коэффициенты, которые находятся методом наименьших квадратов в программе MatLab.

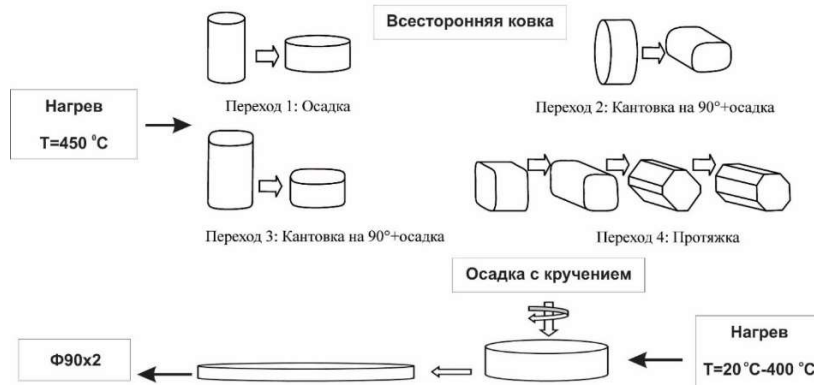


Рис. 2. Схема деформации

В третьей главе исследовалось влияние технологических режимов осадки с кручением на структуру и прочностные характеристики титана ВТ1-0 в зависимости от технологических режимов осадки с кручением в температурном диапазоне 20-800 °C и скоростном интервале деформаций $\dot{\varepsilon} = 10^{-1} - 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. Найдены рациональные параметры обработки, позволяющие изготавливать осесимметричные тонкостенные изделия с повышенными прочностными характеристиками и моделировать процессы осадки с кручением и ротационной вытяжки из полученных заготовок.

Применение результатов экспериментальных исследований получения заготовок из титана ВТ1-0 с ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой при комнатной температуре путем комбинации методов интенсивной ковки и последующей осадкой с кручением обеспечило получение заготовок диаметром до 100 мм и толщиной около 1,2 мм (рис. 4).

Метод интенсивной пластической деформации (интенсивная ковка и последующая осадка с кручением) позволяет осуществить деформации $\varepsilon \sim 2,7$ за счет формирования мелкозернистой структуры.

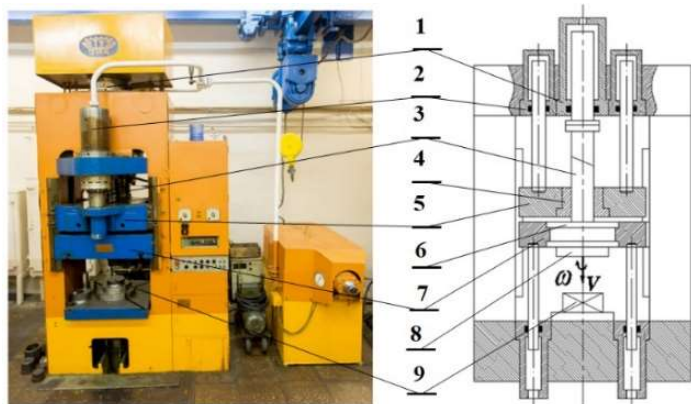


Рис. 3. Общий вид (а) и схема (б) гидравлического пресса для штамповки с кручением (1- цилиндр центральный; 2 – цилиндр для вращения; 3 – винта; 4 - гайка; 5, 7 – ползун 6 – штамподержатель; 8 – инструмент; 9 - заготовка; V - скорость осевого перемещения инструмента; ω - скорость вращения инструмента)

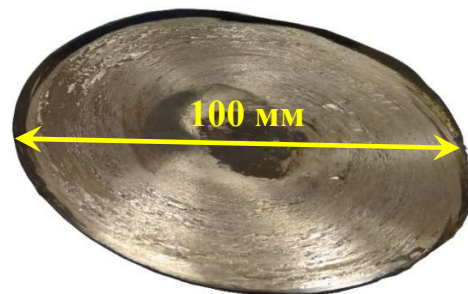


Рис. 4. Образец из титана ВТ1-0 после интенсивной ковки с последующей осадкой с кручением

Анализ полученных при испытании на растяжение образцов показал, что прочностные свойства исходного материала в отожжённом состоянии ($\sigma_{0,2} = 428$ МПа, $\sigma_B = 535$ МПа) существенно ниже прочностных характеристик заготовок полученных методом интенсивнойковки ($\sigma_{0,2} = 810$ МПа, $\sigma_B = 838$ МПа), и осадки с кручением (рис. 5, кривая 3). Была найдена зависимость прочности титана ВТ1-0 от температуры отжига и величины зерна, результаты представлены на рис. 6 и рис. 7. Таким образом, комбинация методов интенсивнойковки с последующей осадкой с кручением позволила получить титан ВТ1-0 с высокими прочностными характеристиками.

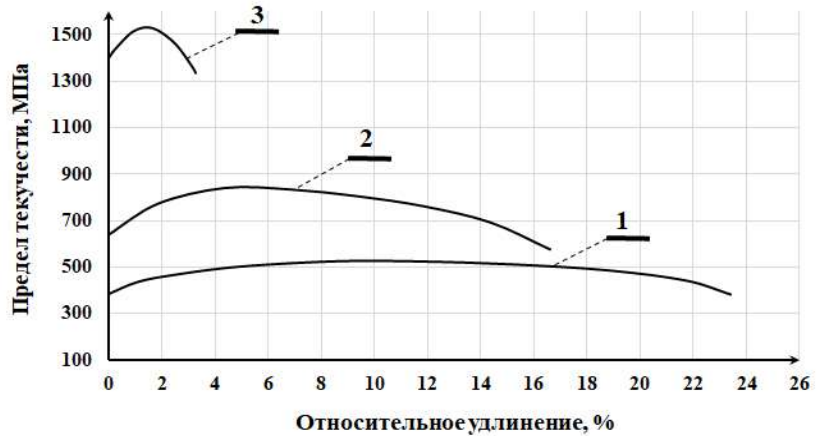


Рис. 5. Диаграммы испытания образцов титана ВТ1-0 в состоянии поставки (1), после интенсивнойковки (2) и интенсивнойковки с последующей осадкой с кручением (3)

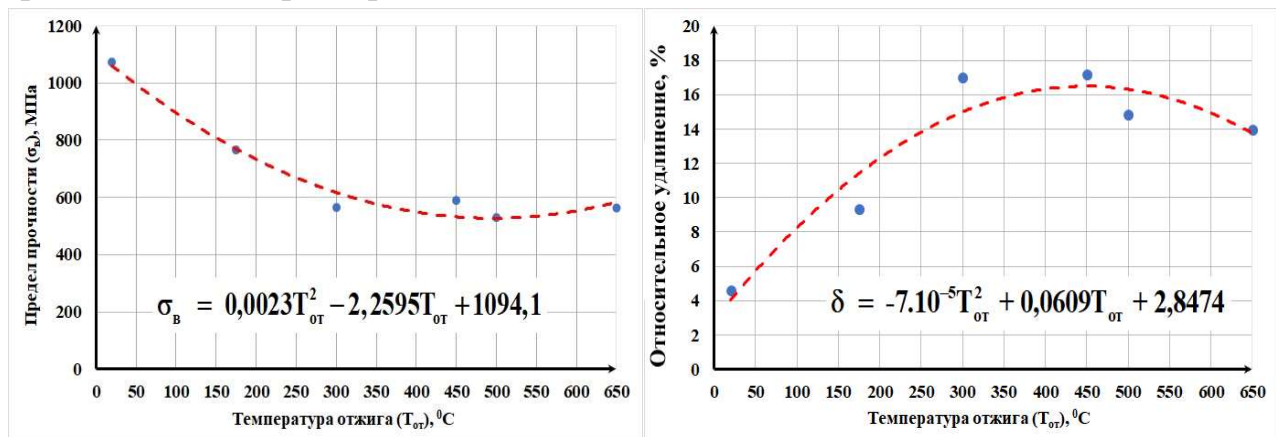


Рис. 6. Зависимости предела прочности и относительного удлинения образцов титана ВТ1-0 от температуры отжига (● экспериментальные данные, ----- аппроксимирующие зависимости, $T_{от}$ – температура отжига)

Отжиг при температуре 250 - 300 °C в течение 30 мин. понижал предел прочности с 1533 до 620 – 680 МПа, однако он оставался выше прочности исходного материала при достаточной для формообразующих операций пластичности 13÷17%. Большое влияние на напряжение текучести оказывают также температура заготовки и инструмента (рис. 8).

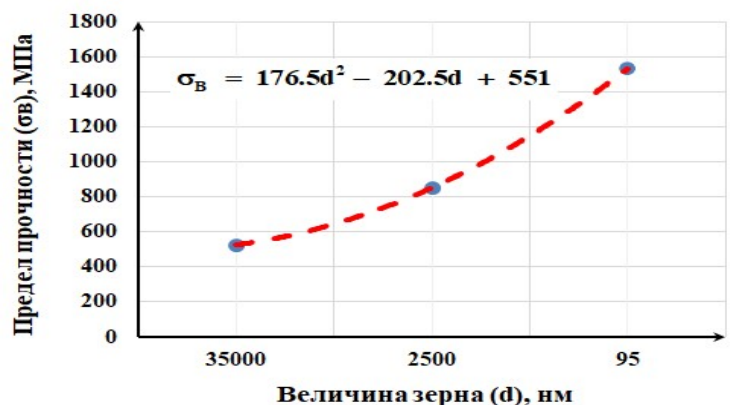


Рис. 7. Зависимость прочности титана ВТ1-0 от величины зерна

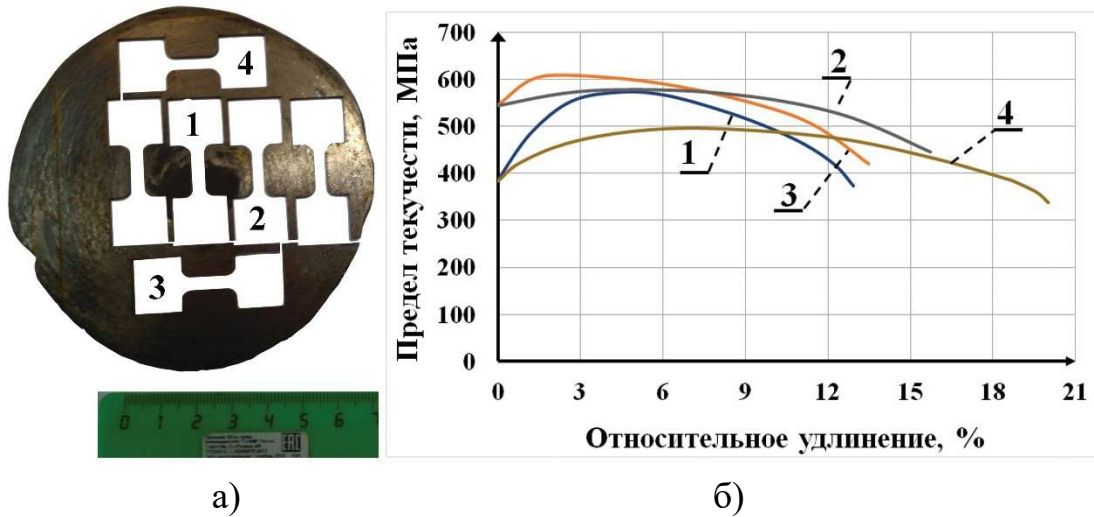


Рис. 8. Диаграммы испытания при комнатной температуре образцов из титана ВТ1-0 после отжига: (а) схема вырезки образцов; (б) 1-300 °С; 2- 400 °С; 3- 450 °С; 4-500 °С

Анализ полученных данных (рис. 9) показывает, что повышение температуры заготовки с 20 °С до 400 °С приводит к снижению напряжения текучести на 25-30% (с 800 МПа до 600 МПа), при этом относительное удлинение возрастает почти на 40%, что согласуется с имеющимися литературными данными. Таким образом, для получения рационального сочетания прочностных и пластических характеристик титана ВТ1-0 заготовка и штамповая оснастка должны иметь температуру около 300°С.

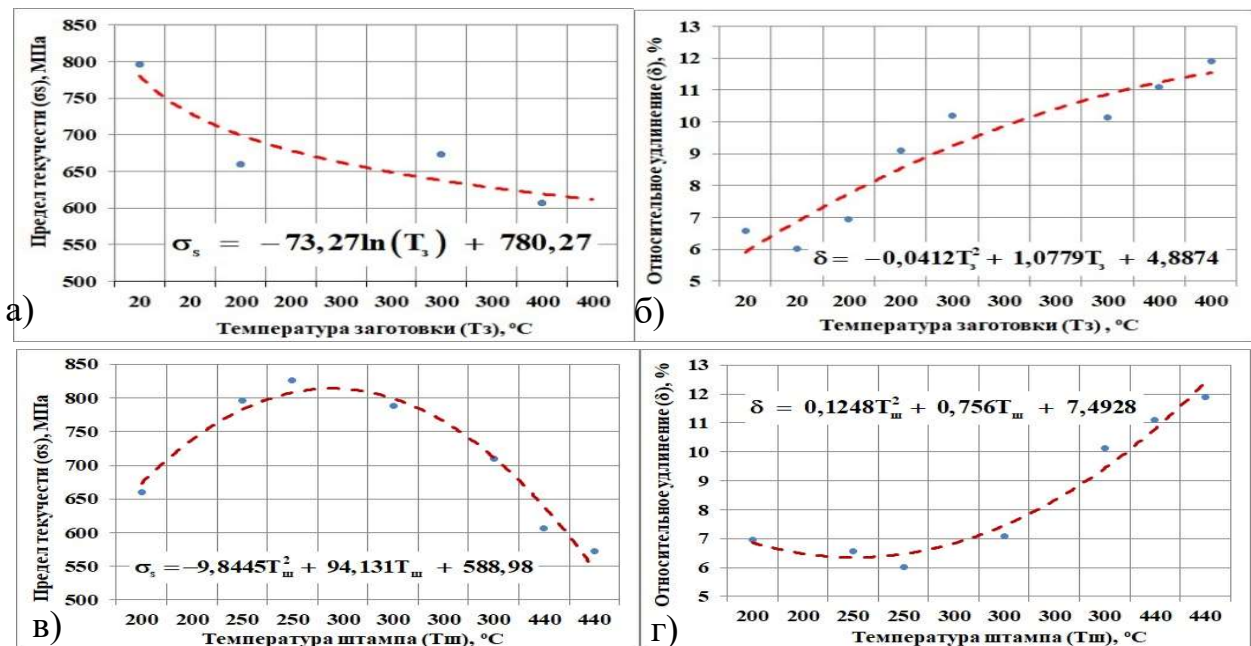


Рис. 9. Зависимость напряжения текучести σ_s от температуры заготовки (а) и штампа (в) и относительного удлинения δ от температуры заготовки (б) и штампа (г) (• экспериментальные данные, ----- аппроксимирующие зависимости)

Математическая обработка результатов эксперимента (таблица 1-Б) на растяжение после осадки с кручением заготовок $\phi 35 \times 10$ мм в соответствии с матрицей экспериментов (таблица 1-А) позволила получить следующие зависимости:

Таблица 1- Матрица экспериментов и результаты осадки с кручением заготовок титана ВТ1-0 (T_z и $T_{ш}$ - температура заготовки и штампа, ϕ - угол поворота верхнего инструмента).

| №№ обра- зец | T _з | T _ш | φ, град. | σ _с , МПа | σ _в , МПа | δ, % | ε, % | d, мкм |
|--------------------|----------------|----------------|----------|----------------------|----------------------|-------|------|--------|
| | А | | | Б | | | | |
| 1 | 300 | 300 | 360 | 608 | 727 | 10,07 | 79 | 2,263 |
| 2 | 300 | 300 | 720 | 571,5 | 691 | 7,44 | 83 | 1,649 |
| 3 | 20 | 300 | 360 | 594 | 747 | 13,52 | 61 | 2,547 |
| 4 | 20 | 300 | 720 | 575 | 776 | 10,33 | 82 | 1,681 |
| 5 | 300 | 200 | 360 | 609 | 630 | 11,61 | 76 | 1,496 |
| 6 | 300 | 200 | 720 | 565,5 | 611 | 6,81 | 83 | 1,362 |
| 7 | 20 | 200 | 360 | 583,5 | 753,5 | 11,27 | 76 | 1,512 |
| 8 | 20 | 200 | 720 | 623,5 | 700 | 10,22 | 85 | 1,680 |

1. Предел текучести (σ_с);

средняя погрешность: 3.47%

$$\sigma_s = 607,15 + 0,241T_z + 9,643e^{-3}T_{ш} + 9,425e^{-2}\varphi - 0,173e^{-2}T_zT_{ш} - 0,138e^{-2}T_z\varphi - 0,450e^{-3}T_{ш}\varphi + 0,655e^{-5}T_zT_{ш}\varphi$$

2. Предел прочности (σ_в);

средняя погрешность: 4.10%

$$\sigma_B = 1018,3 - 1,364T_z - 0,952T_{ш} - 0,887\varphi + 0,587e^{-2}T_zT_{ш} + 0,214e^{-2}T_z\varphi + 0,307e^{-2}T_{ш}\varphi - 0,987e^{-5}T_zT_{ш}\varphi$$

3. Относительное удлинение (δ);

средняя погрешность: 5.73%

$$\delta = 23,059 - 0,064T_z - 0,025T_{ш} - 0,019\varphi + 0,239e^{-3}T_zT_{ш} + 0,457e^{-4}T_z\varphi + 0,451e^{-4}T_{ш}\varphi - 2,077e^{-7}T_zT_{ш}\varphi$$

4. Размер зерна (d);

средняя погрешность: 5.3%

$$d = 1,889 - 0,00185T_z + 0,609e^{-2}T_{ш} - 0,517e^{-3}\varphi - 0,288e^{-4}T_zT_{ш} - 0,623e^{-5}T_z\varphi - 0,854e^{-5}T_{ш}\varphi + 5,496e^{-8}T_zT_{ш}\varphi$$

Как видно из найденных аналитических зависимостей прочностных характеристик и размера зерен титана ВТ1-0 их погрешность не превышает 4-6%, следовательно, они позволяют с достаточно высокой вероятностью задавать технологические режимы для получения требуемых прочностных свойств. Обработка полученных уравнений программой Matlab позволила получить графические зависимости, представленные на рис. 10.

Результаты испытания на сжатие образцов $\phi 10 \times 10$ мм со скоростями деформации $\dot{\varepsilon} = 10^{-1}$, 10^{-2} и 10^{-3} с⁻¹ при температуре 20, 400, 600 и 800 °С на испытательной машине мод. LFM250 (рис. 11) приведены на рис. 12.

Полученные кривые текучести были скорректированы на величину изменения напряжения текучести из-за теплового эффекта пластической деформации и на величину изменения напряжения текучести, обусловленного влиянием контактного трения. Обработку данных выполнили программой «Matlab» в соответствии со схемой (рис. 13). На рис. 14 представлены экспериментальные кривые текучести, рассчитанные по индикаторным диаграммам в предположении, что деформация однородная и влияние контактного трения отсутствует. Результаты, полученные после проведения циклов корректировок для всех кривых текучести, показаны на рис. 15.

По найденным кривым текучести для титана ВТ1-0 (рис. 15), была определена эмпирическая модель сопротивления деформации с применением уравнения Хензеля-Шпиттеля с девятью неизвестными коэффициентами:

$$\sigma_i = A \cdot (\exp(m_1 \cdot T)) \cdot T^{m_2} \cdot \varepsilon^{m_3} \cdot (\exp(m_4 / \varepsilon)) \cdot (1 + \varepsilon)^{m_5 \cdot T} \cdot (\exp(m_7 \cdot \varepsilon)) \cdot \dot{\varepsilon}^{m_6} \cdot \dot{\varepsilon}^{m_8 \cdot T} \quad (2)$$

Найденные коэффициенты модели приведены в таблице 2.

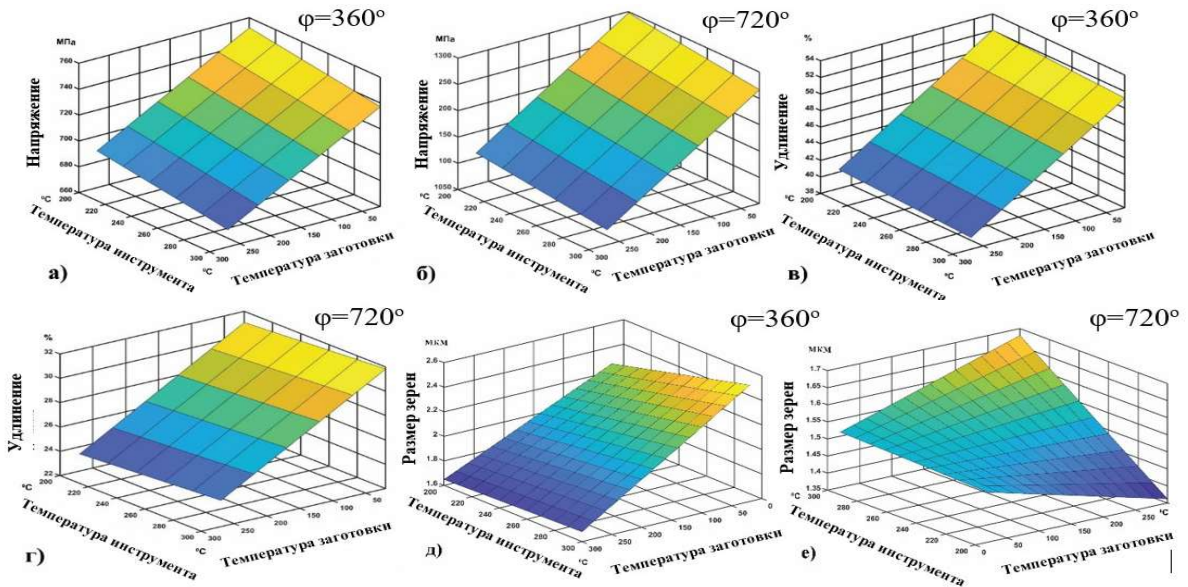


Рис. 10. Зависимости механических характеристик и размера зерен титана BT1-0 от режимов деформации (а, б - σ_s ; в, г - δ ; д, е - d от температуры штампа и заготовки при различных углах поворота инструмента $\phi = 360^\circ$ и 720°)

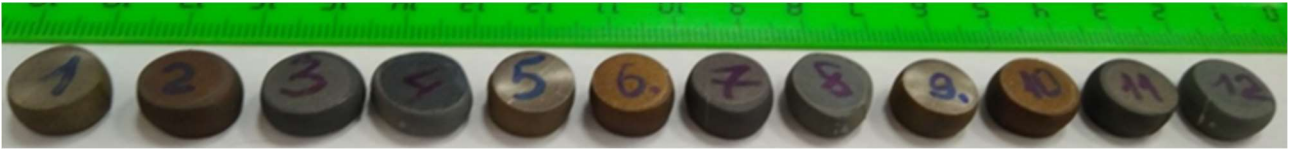


Рис. 11. Образцы технического титана BT1-0 после осадки

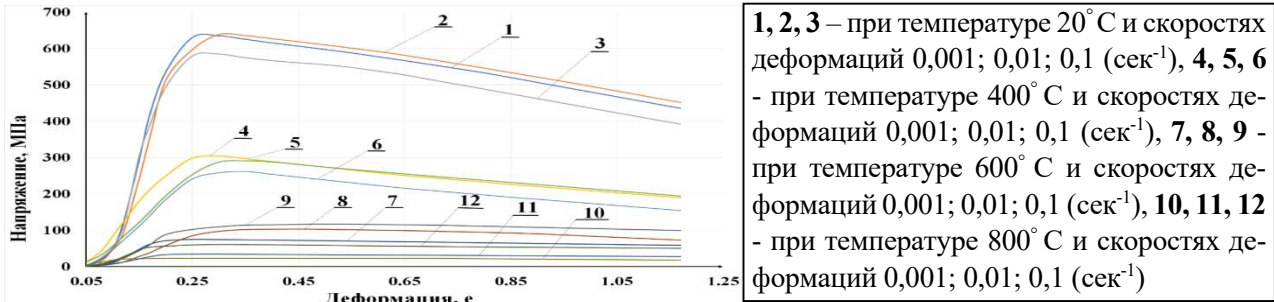


Рис. 12. Зависимость напряжения текучести титана BT1-0 от деформации и температуры



Рис. 13. Схема построения «изотермической» кривой текучести титана BT1-0

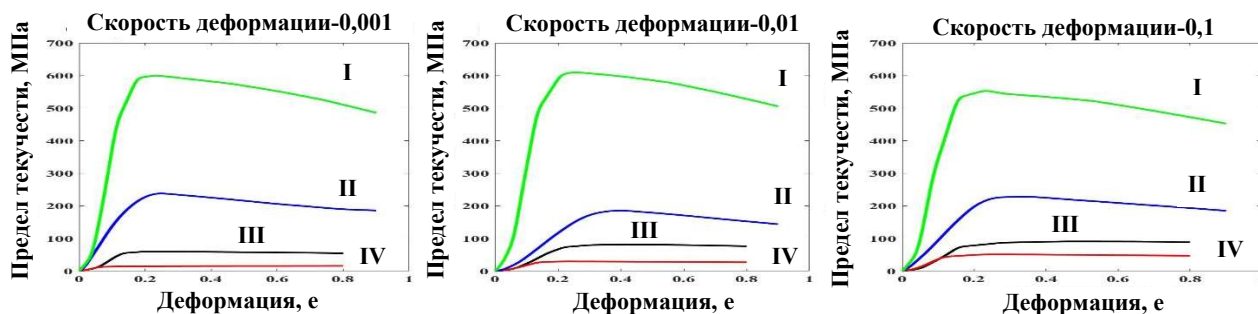
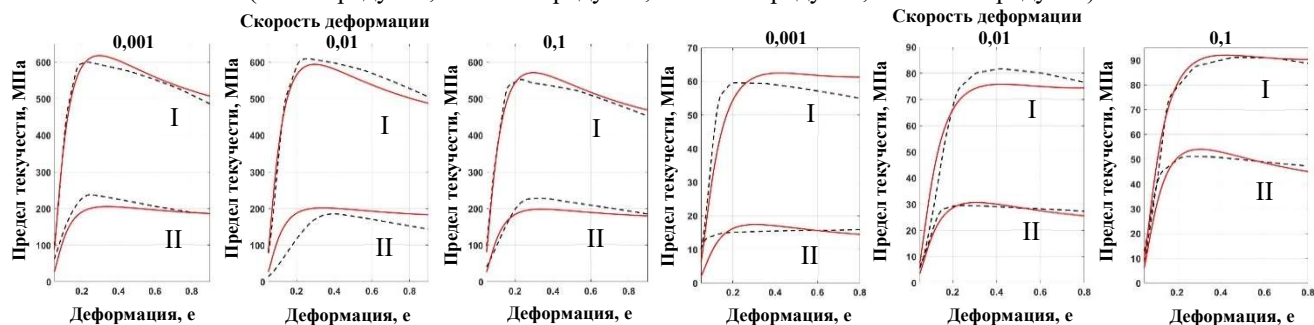


Рис. 14. Экспериментальные кривые текучести

(I – 20 градусов; II – 400 градусов; III – 600 градусов; IV – 800 градусов)



I-a – 20 градусов; II-a – 400 градусов; I-b – 600 градусов; II-b – 800 градусов

(--- данные эксперимента; — расчетная кривая (уравнение 2))

Рис. 15. Сравнение экспериментальных и расчетных напряжений текучести при осадке образцов с различными скоростями при температурах 20, 400, 600 и 800 °С

Таблица 2 – Найденные коэффициенты математической модели Хензеля-Шпиттеля

| Тип деформации | A | m ₁ | m ₂ | m ₃ | m ₄ | m ₅ | m ₇ | m ₈ | m ₉ |
|----------------|--------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 20 и 400° С | 10,032 | -0,013 | -0,747 | -0,017 | -0,192 | 0,001 | 0,319 | 0 | 1,305 |
| 600 и 800° С | 5,042 | 0,111 | 0 | 43,481 | -0,01 | 0,1 | 0,001 | -2,201 | -0,404 |

Найденная реологическая модель материала была применена для моделирования процесса осадки с кручением с применением программы QForm VX (температура заготовки-20° С, температура инструмента- 300° С, пуансон совершал вращение на 12 оборотов с линейной скоростью перемещения $V = 1$ мм/сек.) (рис. 16). Полученные результаты (рис. 17 и таблица 3) показывают, что расхождение расчетных и экспериментальных данных не превышает 10%.

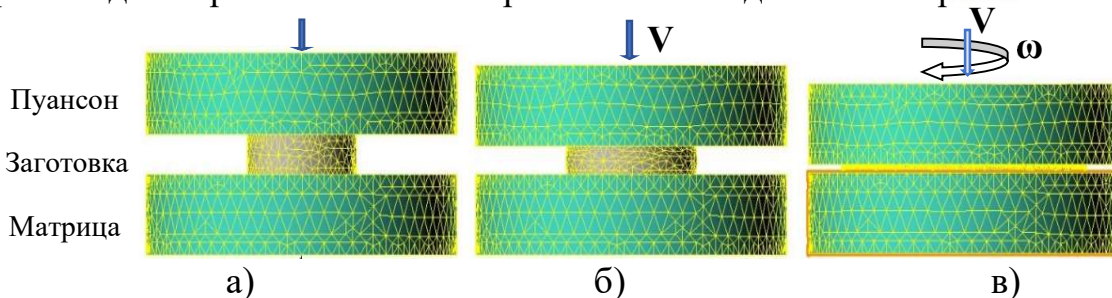


Рис. 16. Последовательность деформирования цилиндрического образца, а - исходное положение; б - осадка до высоты 8 мм; в - осадка с кручением до высоты 2 мм

Эта же реологическая модель материала была применена для моделирования процесса ротационной вытяжки в программе Qform VX детали типа «обтекатель» (заготовка диаметром 90,2 мм и толщиной $S_0 = 2$ мм, значение фактора трения $m=0,8$; частота вращения оправки - 300 об/мин., скорость продольного перемещения инструмента $s_v = 1$ мм/сек) (рис. 18).

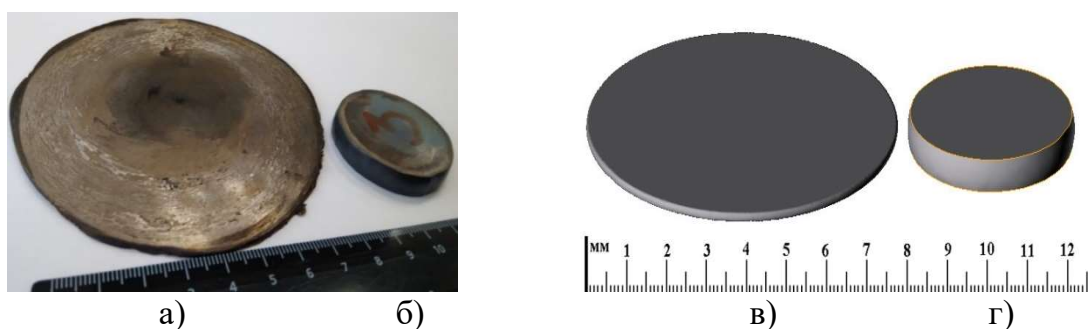


Рис. 17. Деформирование образцов титана и результаты моделирования, экспериментальная заготовка после осадки с кручением (а) и без кручения (б); заготовка, полученная моделированием осадки с кручением (в) и без кручения (г)

Таблица 3 - Результаты деформирования образцов и моделирования (Р-сила; М-момент; Н, D – высота и диаметр заготовок до и после деформации).

| № | Тип деформации | Эксперимент | | | | Моделирование | | | |
|---|---------------------|-------------|---------|---------|-------|---------------|---------|-------|-------|
| | | Р, кН | М, кН.м | Н, мм | D, мм | Р, кН | М, кН.м | Н, мм | D, мм |
| 1 | Осадка с кручением | 8,49 | 12,4 | 1,7-2 | 82-85 | 7,86 | 14,6 | 2 | 78,6 |
| 2 | Осадка с кручением | 8,49 | 12,4 | 1,5-2 | 84-90 | 7,86 | 14,6 | 2 | 78,6 |
| 3 | Осадка с кручением | 8,49 | 12,4 | 1,5-2 | 81-89 | 7,86 | 14,6 | 2 | 78,6 |
| 4 | Осадка без кручения | 11,67 | - | 7,2-7,5 | 40-41 | 12,53 | - | 7 | 42 |

Полученные результаты моделирования (рис. 19) указывают на возможность формообразования детали. Таким образом, полученные реологические характеристики титана ВТ1-0 могут быть использованы для моделирования технологических операций холодной, теплой и горячей штамповки и направлены на улучшение производственных процессов и повышение уровня производства и качества заготовок.

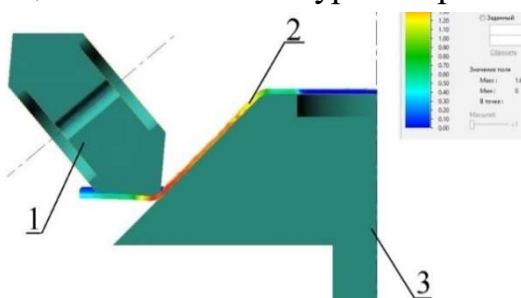


Рис. 18. Моделирование процесса РВ заготовки детали «обтекатель» (1 – формообразующий ролик, 2 – заготовка, 3 – оправка)



Рис. 19. Ротационная вытяжка заготовки детали «обтекатель» и заготовка после ротационной вытяжки

В четвертой главе приведены результаты обработки технологических процессов осадки с кручением и ротационной вытяжки для последующего изготовления полых осесимметричных деталей обтекаемой формы.

Исследования восьми поперечных шлифов, вырезанных из различных мест заготовки в сочетании с результатами моделирования (рис. 20) показали, что структура однородна по всему сечению и состоит из ультрамелких зерен максимальным размером до 3,7 мкм. Средняя величина предела текучести образцов находилась в пределах 572 – 624 МПа.

Результаты замера микротвердости в точках согласно схеме (рис. 21) приведены в таблице. Как видно, результаты практически одинаковые и находятся в пределах ошибки измерения (таблица 4).

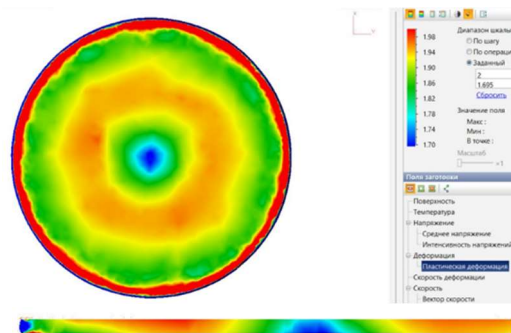


Рис. 20. Результаты моделирования процесса осадки образцов с кручением

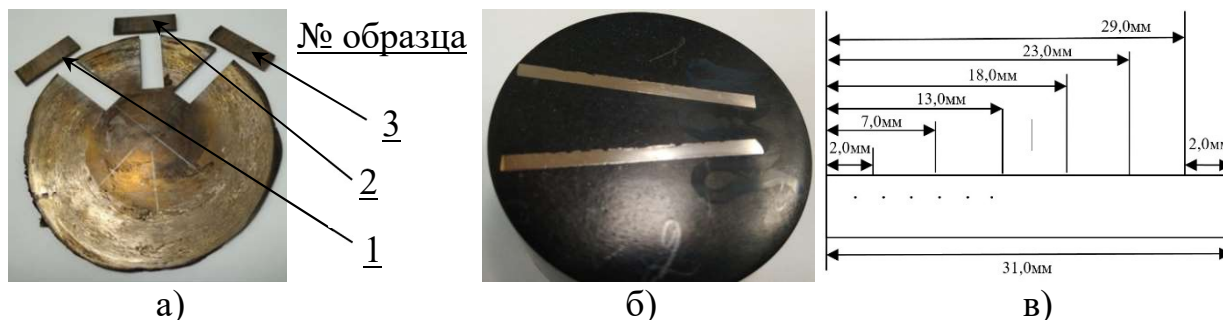


Рис. 21. Схема вырезки образцов (а), шлиф для измерения микротвердости (б) и схема мест замера микротвердости (в)

Таблица 4 – Результаты замера микротвердости

| № образца | Среднее значение микротвердости, НV | | | | | |
|-----------|-------------------------------------|--------|---------|---------|---------|---------|
| | Расстояние от края образца, мм | | | | | |
| | 2,0 мм | 7,0 мм | 13,0 мм | 18,0 мм | 23,0 мм | 29,0 мм |
| 1 | 201 | 188 | 192 | 188 | 191 | 192 |
| 2 | 200 | 193 | 192 | 188 | 191 | 190 |
| 3 | 198 | 192 | 189 | 187 | 187 | 190 |

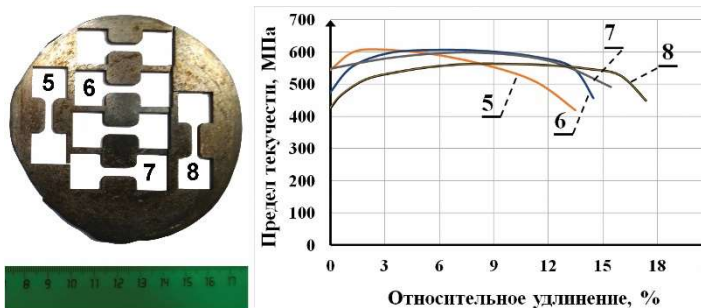


Рис. 22. Свойства материала при испытании образцов на растяжение

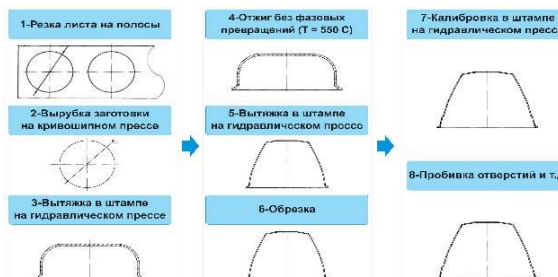


Рис. 23. Схема существующей технологии для изготовления детали «обтекатель»

Таким образом, показано, что интенсивнаяковка прутковых заготовок с последующей их осадкой с кручением обеспечивает получение тонких осесимметричных заготовок с изотропными прочностными характеристиками (рис. 22). Разработанная схема изготовления детали типа «обтекатель» показана на рис. 23 и 24.



Рис. 24. Схема экспериментальной технологии (а); схема предлагаемой технологии (б)

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В работе решена актуальная научно-техническая задача, заключающаяся в теоретическом обосновании технологических режимов ИПД заготовок из титана ВТ1-0, заключающейся в комбинации интенсивнойковки с последующей осадкой с кручением, обеспечивающих повышение прочностных характеристик и снижение массы осесимметричных тонкостенных изделий типа «обтекатель» летательных аппаратов, решение которой имеет существенное значение для двигателестроения. В процессе теоретических и экспериментальных исследований получены следующие основные результаты и сделаны **выводы**:

1. В диссертационной работе содержится решение задачи по определению закономерностей влияния термомеханических режимов (температуры, скорости и величины деформации) заготовок технического титана ВТ1-0 комбинированной обработки в виде реологической модели напряжения текучести, работоспособной в двух диапазонах температур ($20-400^{\circ}\text{C}$, $600-800^{\circ}\text{C}$) при скоростях деформации $10^{-3}-10^{-1} \text{ с}^{-1}$, позволяющей повысить точность компьютерного имитационного моделирования процессов формообразования осесимметричных тонкостенных заготовок.

2. Установлены на базе разработки и реализации матрицы активного эксперимента закономерности повышения прочностных свойств заготовок титана ВТ1-0 в зависимости от режимов ИПД в комбинации с последующими термомеханическими обработками, в т.ч. от температуры нагрева штампа, от температуры нагрева исходной заготовки, от угла поворота инструмента при осадке с кручением.

3. Полученные в работе результаты позволили оценить влияние интенсивнойковки нагретых до температуры с 400°C заготовок инструментом нагретым до температуры 300°C и последующей осадки с кручением заготовок с величиной зерна в диапазоне от 30-70 мкм до 150-250 нм в температурном интервале $20-300^{\circ}\text{C}$ инструментом нагретым в температурном интервале $200-300^{\circ}\text{C}$ и с углом поворота верхнего инструмента $0-720^{\circ}$ на прочностные характеристики тонкостенных изотропных заготовок титана ВТ1-0.

4. Полученные в работе результаты позволили разработать усовершенствованный технологический процесс получения осесимметричных тонкостенных заготовок изделий обтекаемой формы за счет ротационной

вытяжки изготовленных интенсивной пластической деформацией тонкостенных заготовок с частотой вращения оправки 300 об/мин и скоростью продольного перемещения инструмента 1 мм/сек. Это обеспечило получение партии опытных образцов тонкостенных осесимметричных изделий с изотропными свойствами с уменьшенной на 15-20% массой.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В ПУБЛИКАЦИЯХ

1. Бач Ву Чонг. Повышение прочности технического титана VT1-0 методом интенсивной пластической деформации / Латыш В.В., Бурлаков И.А., Забельян Д.М., Алимов А.И., Петров П.А., Степанов Б.А., Бач Ву Чонг // Проблемы машиностроения и надежности машин. - 2018. - № 6. - С. 54-60.
2. Bach Vu Chong. Increasing the strength of commercial titanium VT1-0 using the method of severe plastic deformation / V. V. Latysh, I. A. Burlakov, D. M. Zabel'yan, A. I. Alimov, P. A. Petrov, B. A. Stepanov, Bach Vu Chong // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. - 2018. - Vol. 47. - No. 6. - P. 525-531.
3. Бач Ву Чонг. Повышение прочности технического титана VT1-0 методом интенсивной пластической деформации / Бач Ву Чонг // XIV-государственная конференция по механике твердого тела. - Хошимин, Вьетнам. - № 6. - 2018. - С. 23-28.
4. Бач В.Ч. Эволюция микроструктуры технического титана VT1-0 при интенсивной пластической деформации / Петров А.Н., Бурлаков И.А., Бач В.Ч., Логинов Б.А. // Цветные металлы. - № 6. - 2019. - С. 71-77.
5. Бач Ву Чонг. Применение метода активного эксперимента для определения структуры и пластичности в зависимости от технологических режимов осадки с кручением / Бурлаков И.А., Забельян Д.М., Петров П.А., Степанов Б.А., Бач Ву Чонг // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. - 2019, - № 6. - С. 228-235.
6. Бач Ву Чонг. Определение рациональных режимов осадки с кручением заготовок титана VT1-0 с применением метода активного эксперимента / Бурлаков И.А., Забельян Д.М., Петров П.А., Степанов Б.А., Бач Ву Чонг // Заготовительные производства в машиностроении. - № 5, - 2019. - С. 203-207.
7. Бач Ву Чонг. Технологические возможности штамповки с кручением при изготовлении деталей из титана VT1-0 / Бач Ву Чонг., Бурлаков И.А., Степанов Б.А., Петров П.А. // Технология легких сплавов. - № 2, - 2019. - С. 51-58.
8. Бач Ву Чонг. Влияние температурно-скоростных режимов деформации на напряжение текучести технического титана VT1-0 / Бурлаков И.А., Костюков А.А., Петров П.А., Бач Ву Чонг // Международная научно-техническая конференция «машиностроение и техносфера XXI века». - Севастополь. - 2019. - С. 58-61.
9. Бач Ву Чонг. Определение кривых текучести технического титана VT1-0 с мелкозернистой структурой / Бурлаков И.А., Константинов Д.А., Мангасарян Г.А., Петров П.А., Бач Ву Чонг // Заготовительные производства в машиностроении. - № 2, - 2020. - с. 69-74.

Ву Чонг Бач

Совершенствование технологии изготовления осесимметричных тонкостенных изделий на основе применения метода интенсивной пластической деформации
Автореф. дисс. на соискание ученой степени кандидата технических наук