

На правах рукописи



Головкин Сергей Алексеевич

**ПОВЫШЕНИЕ РАЗМЕРНОЙ ТОЧНОСТИ ШТАМПОВОК ЛОПАТОК
КОМПРЕССОРА ГТД ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6 И СТОЙКОСТИ
ШТАМПОВОГО ИНСТРУМЕНТА ЗА СЧЕТ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ШТАМПОВКИ**

Специальность 05.16.05 – Обработка металлов давлением

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Рыбинск – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева» на кафедре «Мехатронные системы и процессы формообразования».

Научный руководитель: - **Первов Михаил Леонидович**

доктор технических наук, профессор кафедры «Мехатронные системы и процессы формообразования» РГАТУ им. П.А. Соловьева

Официальные оппоненты: - **Корнилова Анна Владимировна** (г. Москва)

доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов», профессор Департамента строительства Инженерной академии

- **Гладков Юрий Анатольевич** (г. Москва)

кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, кафедра МТ-6 "Технологии обработки давлением"

Ведущая организация: - ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» г. Самара.

Защита диссертации состоится 17 июня 2020 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.16 в ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 121552, г. Москва, ул. Оршанская, д.3, аудитория № 523А.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, А-80, ГСП-3, МАИ, ученому секретарю диссертационного совета Палтиевичу Андрею Романовичу и по электронной почте paltievichar@mati.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета и на сайте <https://mai.ru/events/defence/>.

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
Д 212.125.16, к.т.н., доцент



Палтиевич А.Р.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. С момента внедрения титановых сплавов в конструкцию авиационных газотурбинных двигателей, доля деталей, изготавливаемых из них, постоянно увеличивается. Самыми массовыми деталями из титановых сплавов в современных ГТД, являются лопатки компрессора. Для удовлетворения предъявляемых к современным ГТД требований конструкция лопаток компрессора постоянно совершенствуется. Применение труднодеформируемых жаропрочных титановых сплавов в совокупности со сложной геометрией профиля пера лопаток являются причиной назначения больших припусков на штамповках. При этом качество и надёжность лопаток закладываются уже на начальных стадиях их производства – штамповке заготовок лопаток компрессоров ГТД.

Применение прогрессивного технологического процесса, такого как изотермическая штамповка, позволяет повысить размерную точность деталей и уменьшить припуски на механическую обработку. Одним из основных недостатков данного метода остается высокая стоимость изготовления и низкая стойкость дорогостоящего деформирующего инструмента.

Устранить данный недостаток можно путем разработки новых штамповых материалов, способных показывать более высокие прочностные характеристики при высоких температурах штамповки заготовок лопаток из титановых сплавов. Но при этом стоимость самих материалов и затраты на их обработку будут выше показателей, достигнутых в настоящее время. Другим направлением решения данной задачи является получение в заготовке из титанового сплава регламентированной структуры, за счет которой напряжения, действующие на материал штампа в процессе деформирования, будут ниже, и это соответственно позволит существенно увеличить сроки службы дорогостоящего инструмента с обеспечением заданных геометрических параметров обрабатываемых деталей.

Работа направлена на экспериментальное и теоретическое исследование структуры и механических свойств титанового сплава ВТ6 с ультрамелкозернистой структурой с целью совершенствования технологического процесса штамповки,

который обеспечит повышение размерной точности заготовок лопаток компрессора ГТД и увеличение стойкости штампового инструмента. УМЗ структура получена путем реализации процесса изотермического выдавливания по режимам, обеспечивающим протекание динамической рекристаллизации.

В настоящее время уникальные свойства УМЗ материалов и перспективы их практического использования являются предметом многочисленных исследований. Большой интерес к этим материалам вызван существенным отличием их физико-механических свойств от свойств обычных поликристаллов. В частности, они имеют более высокие твердость и предел текучести по сравнению с крупнокристаллическими металлами. Также, установлено, что металлы и сплавы с УМЗ структурой склонны к низкотемпературной и высокоскоростной сверхпластичности.

Цель и задачи исследований. Целью работы является повышение размерной точности штамповок лопаток компрессора ГТД из титанового сплава ВТ6 и стойкости штампового инструмента за счет совершенствования технологического процесса штамповки.

Для реализации этой цели необходимо решить следующие научно-технические задачи:

1. Исследовать влияние технологических режимов процесса изотермического выдавливания на формирование мелкозернистой структуры в титановом сплаве ВТ6.
2. Установить влияние размера зерна титанового сплава на сопротивление деформации при температурах деформации.
3. Разработать технологический процесс изготовления заготовок лопаток ГТД из титанового сплава под безразмерную обработку профиля пера.
4. Оценить стойкость штампового инструмента при использовании усовершенствованного технологического процесса.
5. Апробировать установленные закономерности при производстве заготовок лопаток компрессора ГТД из титановых сплавов производственных условиях.

Научная новизна работы заключается в том, что:

- разработан метод получения регламентированной ультра мелкозернистой структуры в двухфазном титановом сплаве путем интенсивной пластической деформации при изотермическом выдавливании по режимам, обеспечивающим протекание динамической рекристаллизации;
- установлена регрессионная зависимость, связывающая параметры процесса (коэффициент вытяжки, скорость деформирования и температура деформации) изотермического выдавливания и размер, получаемого в результате, зерна в титановом сплаве ВТ6 при динамической рекристаллизации;
- установлено, что при уменьшении размеров зерна в титановом сплаве ВТ6 в 2 раза напряжение течения при температуре $T = 800 \text{ }^\circ\text{C}$ снижается на 42 %.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

- разработан способ получения заготовок с регламентированной структурой под дальнейшую изотермическую штамповку методом изотермического выдавливания (Способ выдавливания малопластичных материалов и устройство для его осуществления защищен патентом RU №2637451);
- разработаны технологические режимы изотермической штамповки, обеспечивающие уменьшение сопротивления деформации штампуемого материала, повышение стойкости штамповой оснастки при изотермической штамповке и повышение размерной точности штамповок лопаток ГТД (Способ изготовления штамповок лопаток из титановых сплавов защищен патентом RU №2614294).
- разработан штамп для получения заготовок дисков с лопатками из титанового сплава методом изотермической штамповки (Изотермический штамп для получения дисков с лопатками защищен патентом RU №142904);
- результаты диссертационной работы используются при разработке технологических процессов штамповки заготовок лопаток компрессора ГТД из титанового сплава ВТ6 в ПАО «ОДК - Сатурн».

- разработанные по результатам исследований математические модели, используются в учебном процессе на кафедре «Мехатронные системы и процессы формообразования» РГАТУ им. П.А. Соловьева.

Методология и методы исследования. В работе использовались: основы обработки металлов давлением; теория пластического деформирования.

Положения и результаты, выносимые на защиту

- учет выявленных в исследовании зависимостей между размером зерна в титановом сплаве ВТ6 и величиной сопротивления деформации при испытании на сжатие позволяет снизить температуру штамповки;

- использование разработанной математической модели процесса изотермического выдавливания титановой заготовки, позволяет прогнозировать возможность получения ультрамелкозернистой структуры в титановом сплаве в ходе протекания процесса динамической рекристаллизации;

- применение предложенного технологического процесса штамповки лопаток компрессора ГТД из титанового сплава ВТ6 позволяет получать заготовки под безразмерную обработку профиля пера.

Достоверность результатов работы обеспечивается корректностью постановки задач, обоснованным использованием допущений, применением известных математических методов и подтверждается качественным и количественным согласованием результатов теоретических исследований с проведенными исследованиями автора, а также использованием комплекса современных методов исследования пластической деформации и структуры. Оценка параметров механического поведения материалов проведена в соответствии с требованиями стандартов. Анализ пластической деформации титанового сплава ВТ6 проводили с использованием конечно-элементного комплекса QForm 3D.

Личный вклад автора состоит в:

1. в постановке и формулировании задач диссертационной работы;
2. в подготовке материалов и постановке экспериментов по изотермическому выдавливанию по различным режимам заготовок из титанового

сплава ВТ6;

3. в подготовке образцов и проведении испытаний на универсальной испытательной динамической машине «LABTEST 6.125H.50»;

4. анализе и обобщении полученных экспериментальных данных и формулировании выводов по ним;

5. проектировании технологии высокопроизводительной штамповки лопаток компрессора с малым припуском, обеспечивающей повышенную стойкость штампового инструмента.

Апробация работы. По содержанию диссертационной работы был сделан ряд докладов на научно-технических конференциях, в том числе: в рамках I, II и VI Международных технологических форумов «Инновации. Технологии. Производство», 2014 г., 2015 г., 2019 г. Симпозиум «SCHULER AEROSPACE в университете Машиностроения» (г. Москва, 2015 г.) XLII Гагаринские чтения Международная молодежная научная конференция (г. Москва, МАИ, 2016г.).

Публикации. Основные результаты работы представлены в 5 публикациях, из них 3 – в ведущих научных журналах, входящих в перечень рецензируемых изданий, рекомендованных ВАК. По теме диссертации опубликовано 3 патента РФ.

Структура и объем работы. Работа состоит из 5 глав, библиографического списка, 2-х приложений и изложена на 144 страницах, содержит 62 рисунка, 16 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования отмечена научная новизна и практическая ценность диссертационной работы.

В первой главе выполнен анализ состояния вопроса в области изготовления лопаток компрессора ГТД; способов получения ультрамелкозернистой структуры в металлах; особенности способа получения заготовок методом выдавливания; особенности протекания процесса рекристаллизации. Выяснено, что при внедрении в производство точной изотермической штамповки существует проблема низкой стойкости ковочных штампов. Это связано со спецификой

процесса формообразования, который происходит при высоких температурах (рисунок 1). Решением данной проблемы может быть уменьшение нагрузки на штамп за счет увеличения пластичности штампуемого материала. Согласно зависимости Холла-Петча сопротивление деформации металла напрямую зависит от размера его зерен. Вопрос получения ультрамелкозернистой структуры в металлах рассматривается в работах многих как отечественных, так и зарубежных ученых, среди них: Я.Е. Бейгельзимер, В.Н. Варюхин, Г.А. Солищев, О.А. Кайбышев, Н. Цужи, В.М. Сегал, Р.В. Валиев, Г.И Рааб.

Установлено, что существует множество способов получения ультрамелкозернистой структуры в металлах такие как: РКУ прессование, всесторонняя изотермическая ковка, деформация кручением, винтовая экструзия.

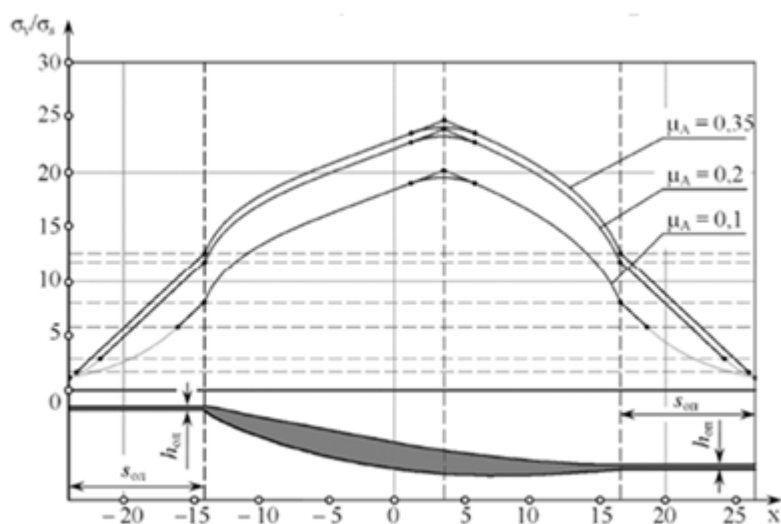


Рисунок 1 - Влияние величины контактного трения μ_A на форму эпюры и величину относительных нормальных напряжений σ_y/σ_s ,

где: $h_{ол}$, $h_{оп}$ – высота обля соответственно у входной (слева) и выходной (справа) кромках пера лопатки, $s_{ол}$, $s_{оп}$ – ширина обля соответственно у входной (слева) и выходной (справа) кромках пера лопатки

Данные методы имеют множество недостатков, которые затрудняют внедрение их в серийное производство. Сделан вывод о том, что эффективным способом фасонирования заготовок под дальнейшую штамповку является выдавливание, которое позволяет существенно сократить количество переходов по сравнению, например, с высадкой, кроме того позволяет получать более точные

заготовки. Получение УМЗ структуры в металлических заготовках возможно при помощи термомеханических методов обработки. К таким процессам относится динамическая рекристаллизация. Динамическая рекристаллизация может проходить по различным схемам и поэтому важной задачей является определения тех режимов, при которых будет происходить одновременно и фасонирование заготовки под дальнейшую штамповку и получение ультрамелкозернистой структуры.

Во второй главе освещены вопросы методов и способов проведения исследований. При разработке технологических процессов обработки металлов давлением приходится сталкиваться с необходимостью определения расчетным путем усилия, работы и мощности деформации.

Кроме того, для расчета прочности и износостойкости кузнечного

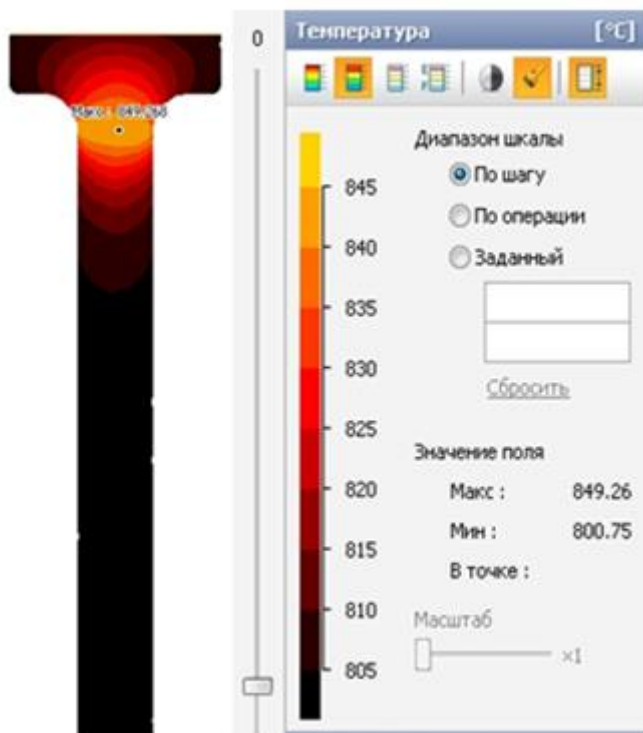


Рисунок 2 – Распределение температурного поля в заготовке в конце выдавливания

инструмента (штампов, контейнеров, матриц и т. п.) нужно знать контактные (на поверхностях деформируемый металл - инструмент) нормальные и касательные напряжения. Для исследования напряженно-деформированного состояния заготовки и распределения температурных полей при прямом изотермическом выдавливании используем программный комплекс Q Form 3D (рисунок 2). Данный комплекс позволяет производить расчет

холодной, теплой и горячей объемной штамповки. Предсказывается возникновение различных штамповочных дефектов, таких как незаполнение гравюры, зажимы и прострелы. Характер течения металла может быть оценен по рассчитываемым

Лагранжевым линиям в заготовке. Геометрия инструмента и заготовки в процессе



Рисунок 3 – Вид заготовки, разбитой на конечно-элементную сетку

расчета течения металла аппроксимируется квадратичными поверхностными конечными элементами. Сетка внутри заготовки и инструментов создается на основе линейных тетраэдров (рисунок 3). Для определения условий протекания процесса динамической рекристаллизации при изотермическом прямом выдавливании двухфазного титанового сплава типа ВТ6 и подтверждения выносимых на защиту положений необходимо

проведение экспериментов. Для того, чтобы реализовать рациональное количество опытов с различными исходными данными нужно определить число и условия проведения опытов, необходимых и достаточных для решения поставленной задачи с требуемой точностью. Методы планирования эксперимента подробно рассмотрены в работах Адлера Ю.П., Красовского Г.И., Барабашука В.И.. Использование данных методов при проведении исследований позволяет минимизировать число необходимых испытаний, установить рациональный порядок и условия проведения исследований в зависимости от их вида и требуемой точности результатов.

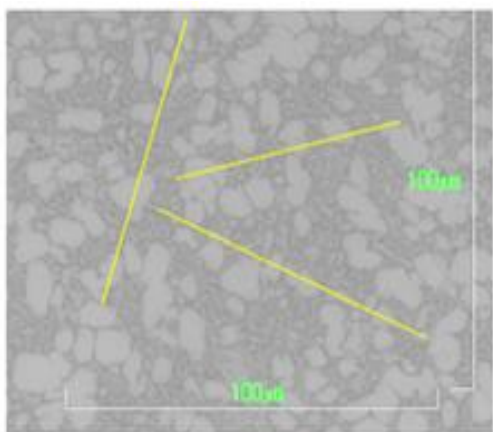


Рисунок 4– Схема определения размера зерна по методу длин хорд

Для определения величины зерна, в исследуемых образцах, был применен метод измерения длин хорд по ГОСТ 5639—82. Метод основан на замере линейных размеров отрезков — хорд, отсекаемых в зернах прямыми линиями, и применяется для определения величины зерна в разномзернистой структуре (рисунок 4).

Испытания на сжатие проводились на универсальной испытательной динамической машине «LABTEST 6.125H.50», представленной



Рисунок 5 - Универсальная испытательная динамическая машина «LABTEST 6.125H.50»

на рисунке 5. Данная машина предназначена для использования в лабораториях предприятий и исследовательских лабораториях. Она позволяет проводить испытания материалов на растяжение, сжатие, изгиб, кручение, сдирающие, отрывающие, проникающие и трущие испытания со статическим и динамическим приложением нагрузки на образцы и целые изделия.

Третья глава посвящена проведению исследований процесса изотермического выдавливания и определению его

параметров для протекания динамической рекристаллизации.

Таблица 1 - План полного факторного эксперимента

№ опыта	λ	V , мм/с	$T_{\text{деф}}$, °С
1	7,84	0,1	800
2	7,84	0,3	800
3	7,84	0,1	930
4	7,84	0,3	930
5	1,96	0,1	800
6	1,96	0,3	800
7	1,96	0,1	930
8	1,96	0,3	930

Из анализа литературных источников, проведенного в главе 1 выделены для дальнейшего исследования следующие факторы: коэффициент вытяжки при выдавливании (λ), скорость деформирования (V), которая равна скорости перемещения инструмента и температура деформации ($T_{\text{деф}}$) и интервалы их варьирования (таб. 1).

Компьютерное моделирование процесса изотермического выдавливания выполнялось в программном комплексе QForm 3D. Предварительно по результатам



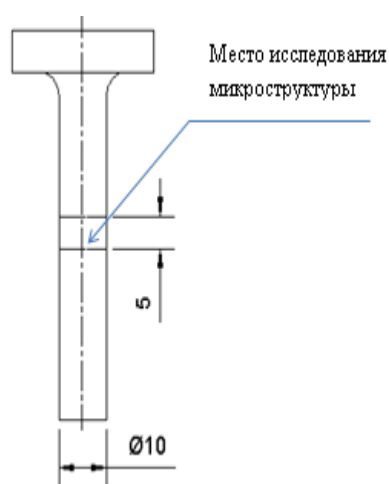
Рисунок 6 - Экспериментальный штамп для изотермического выдавливания

моделирования можно сделать вывод, что наиболее благоприятными условиями процесса изотермического выдавливания для измельчения структуры будут $V = 0,3 \text{ мм/с}$, $\lambda = 7,84$, $T_{\text{деф}} = 800^\circ\text{C}$. Для подтверждения данных, полученных при компьютерном моделировании, провели натурный эксперимент в экспериментальном штампе (рисунок 6).

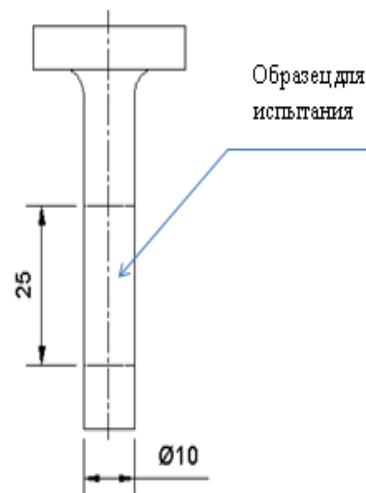
На следующем этапе из стержневой части выдавленных заготовок были вырезаны образцы (рисунок 7) для проведения исследований микроструктуры и пластических свойств



а



б



в

Рисунок 7 - Выдавленная заготовка:

а) общий вид; б) место вырезки образцов для исследования микроструктуры; в) схема вырезки образцов для испытания

Анализ микроструктуры (рисунок 8) подтвердил выводы, сделанные при компьютерном моделировании. Затем были проведены испытания на сжатие на

испытательной машине LabTest 6.125Н при температуре штамповки лопаток ($T_{\text{исп}} = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$) и скорости перемещения захватов 0,1 мм/мин.

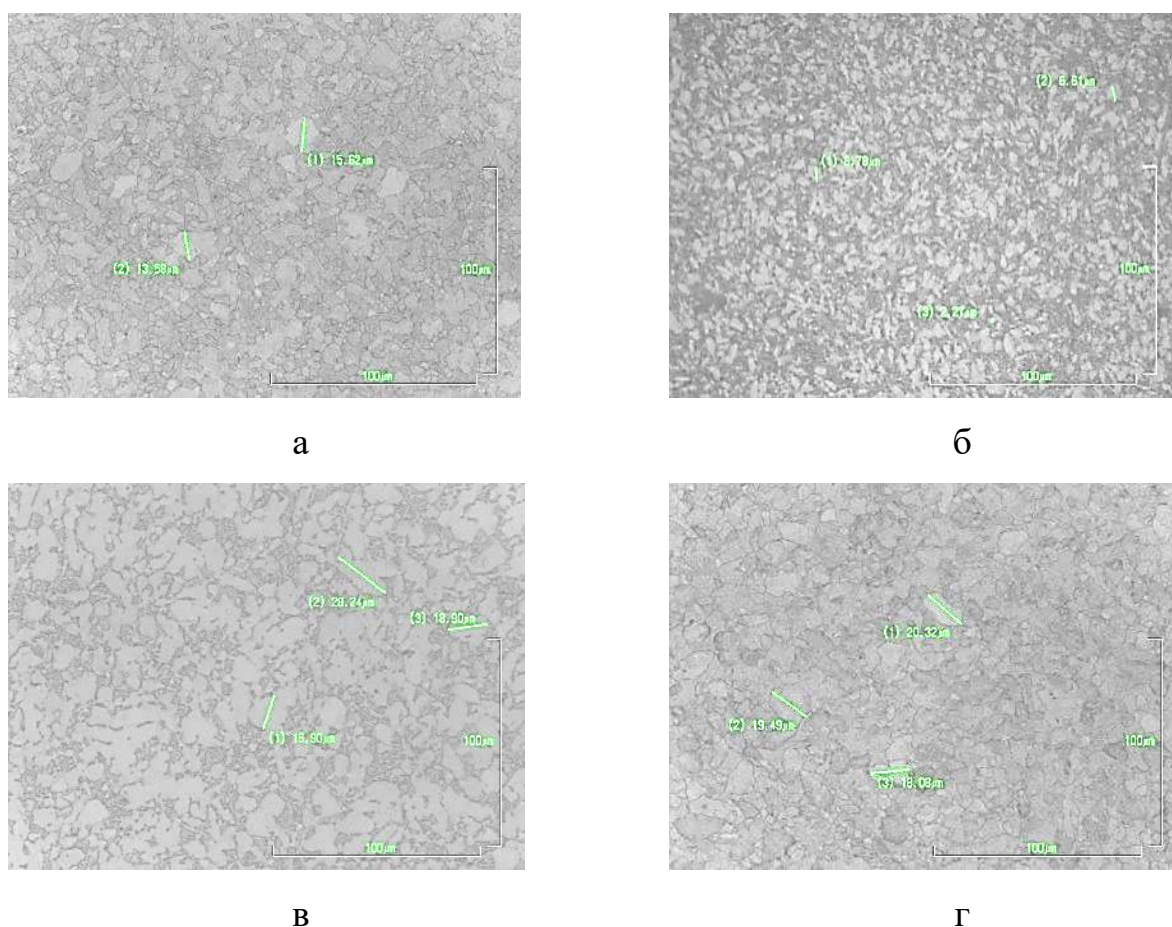


Рисунок 8 - Структура образцов из сплава ВТ6 после изотермического выдавливания при различных температурах (T) и скорости выдавливания (V), коэффициенте вытяжки $\lambda = 7,84$ при выдавливании, увеличение 500:

а) $T = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V = 0,1\text{ мм/с}$; б) $T = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V = 0,3\text{ мм/с}$; в) $T = 930\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V = 0,1\text{ мм/с}$; г) $T = 930\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V = 0,3\text{ мм/с}$

Для обработки полученных результатов с целью построения кривых упрочнения (рисунок 9) по полученным при испытаниях значениям затраченного усилия были рассчитаны напряжения, соответствующие деформации. Напряжение рассчитывается как отношение развитого усилия (P_i) к площади поперечного сечения (F_i) в данный момент времени:

$$\sigma = \frac{P_i}{F_i} \quad (1)$$

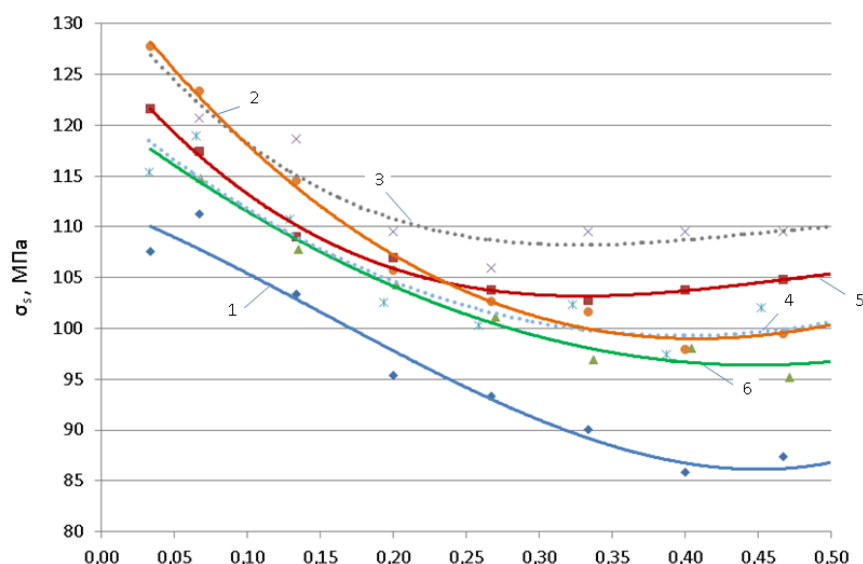


Рисунок.9 - Кривые упрочнения титанового сплава ВТ6 после изотермического выдавливания по режимам:

- 1) $T=800\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\lambda=7,84$, $V=0,3\text{ мм/с}$, 2) $T=800\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\lambda=1,96$, $V=0,3\text{ мм/с}$, 3) $T=930\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\lambda=1,96$, $V=0,3\text{ мм/с}$, 4) $T=930\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\lambda=1,96$, $V=0,1\text{ мм/с}$, 5) $T=800\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\lambda=7,84$, $V=0,1\text{ мм/с}$, 6) $T=930\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\lambda=7,84$, $V=0,1\text{ мм/с}$

Для возможности прогнозирования получаемой структуры в зависимости от изменения условий протекания процесса изотермического выдавливания разработана математическая модель (2):

$$y = 8.254 * 10^{-6} + 1.653 * 10^{-6}x_1 + 0.134x_2 + 1.067 * 10^{-8}x_3 - 0.054x_1x_2 - 1.891 * 10^{-9}x_1x_3 - 1.415 * 10^{-4}x_2x_3 + 5.907 * 10^{-5}x_1x_2x_3 \quad (2)$$

Адекватность разработанной математической модели составляет 98% относительно полученных экспериментальных данных.

В четвертой главе рассмотрен вопрос разработки перспективного технологического процесса штамповки заготовок компрессора ГТД из титанового сплава ВТ6 с припуском под безразмерную обработку профиля пера с использованием результатов исследований, выполненных в главе 3.

Рассмотрев недостатки существующих технологических процессов изготовления заготовок лопаток из титановых сплавов, предложен новый технологический процесс, состоящий из следующих операций:

- резка мерных заготовок;
- изотермическое выдавливание;

- объемная изотермическая штамповка;
- обрезка в штампе с прижимом;
- термообработка;
- термофиксация (по необходимости).

Для интенсификации операции изотермического выдавливания разработано и запатентовано устройство для изотермического выдавливания в штампе с локальной подачей смазывающего материала в очаг деформации (рисунок 10).

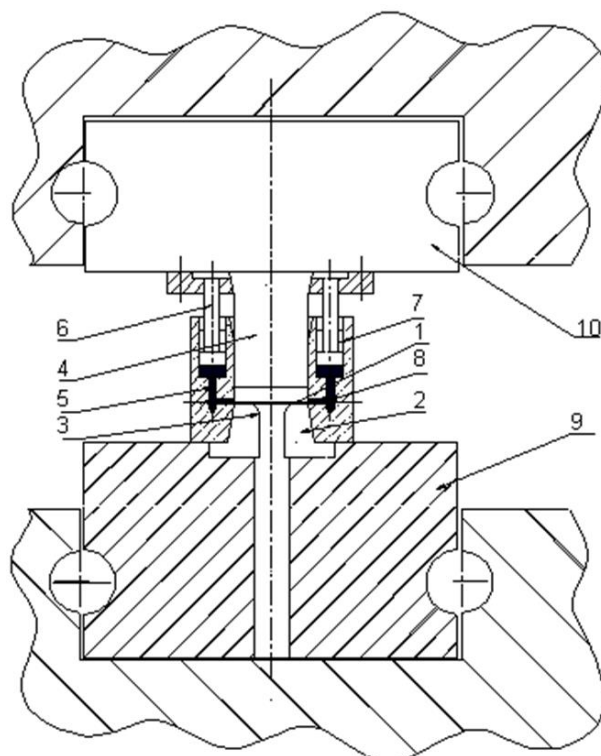


Рисунок 10 - Общий вид устройства для осуществления изотермического выдавливания титановых заготовок.

- 1) заготовка; 2) матрица; 3) рабочее отверстие матрицы; 4) рабочий пуансон; 5) смазка; 6) вспомогательные пуансоны; 7) полости для смазки; 8) каналы для подачи смазки; 9) контейнер; 10) верхняя плита штампа

Заготовки, полученные указанным способом, формируются за один переход и уже имеют форму и геометрию максимально приближенную к геометрии окончательной штамповки.

Пятая глава посвящена оценке стойкости штампового инструмента в результате внедрения предложенного технологического процесса штамповки лопаток ГТД.

Основным показателем работоспособности штампового материала при изотермической штамповке предложено считать отношение предела текучести материала штампа к пределу текучести деформируемого материала при температуре деформации. Это отношение определяет коэффициент запаса по пределу текучести (рисунок 12).

По методике расчета стойкости деформирующего инструмента через определение скорости деформирования, учитывающей ползучесть материала штампа, была рассчитана стойкость штампов в случае штамповки по существующей технологии и по предложенной в диссертации.

$$\bar{n} = \frac{a}{\sigma_i^k \tau_{ц}} = \frac{aV^{1-mk}}{\sigma_{i0}^k A^k \Delta H} \quad (3)$$

где ΔH – ход пуансона, м; A – коэффициент, зависящий от условий деформирования (геометрической формы заготовок и инструмента, наличия трения), (м/с)-мк.

По выполненным выше расчетам можно сделать вывод о том, что при изотермической штамповке заготовок, имеющих ультрамелкозернистую структуру, расчетная стойкость ковочных штампов в 2,5 раза выше, чем при штамповке по серийной технологии.

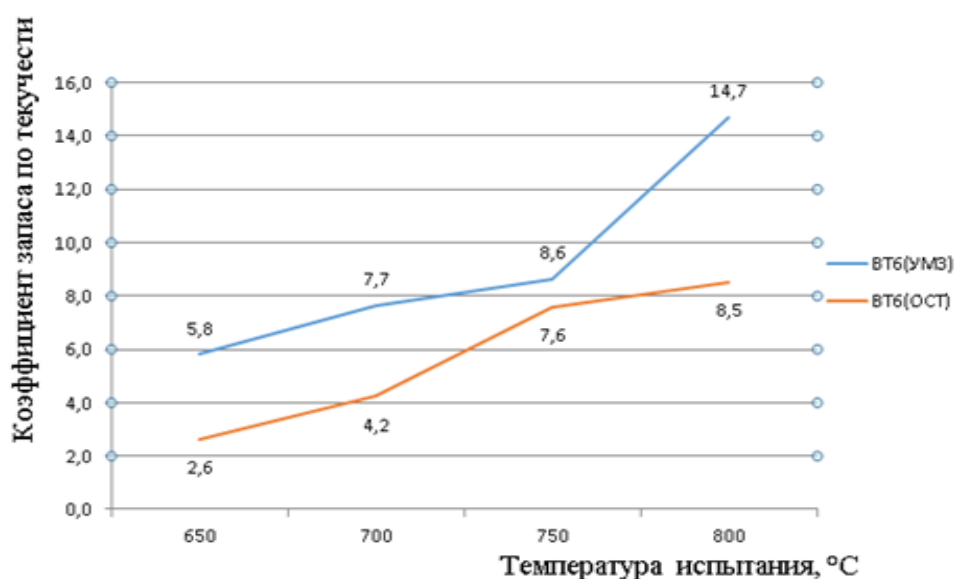


Рисунок 11 - График изменения коэффициента запаса по пределу текучести ЖС6У от ВТ6 в зависимости от температуры

Снижение температуры процесса при выполнении операции изотермической штамповки за счет формирования регламентированной структуры в заготовках позволяет использовать в качестве штамповых менее жаропрочные материалы по сравнению с традиционной технологией. Эти материалы в свою очередь имеют меньшую стоимость и хорошо поддаются обработке давлением и резанием. Выше перечисленные особенности позволяют сделать вывод о возможности значительного удешевления стоимости изготовления и ремонта штампов для изотермической штамповки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, являющейся законченной научно-технической квалификационной работой, изложены новые научно обоснованные технические решения и разработки, имеющие существенное значение для машиностроительной отрасли и авиадвигателестроения в частности и являющиеся частью предложенного технологического процесса изготовления высокоточных заготовок лопаток ГТД из титанового сплава под безразмерную обработку профиля пера, обеспечивающий высокую стойкость дорогостоящей штамповой оснастки.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи и сделаны выводы:

1. Методами экспериментальных исследований и математического моделирования исследовано влияние технологических режимов процесса изотермического выдавливания на формирование мелкозернистой структуры в титановом сплаве ВТ6. Определены взаимосвязи влияющих факторов и разработана математическая модель процесса изотермического выдавливания титановой заготовки, позволяющая исследовать процесс изотермического выдавливания с целью получения ультрамелкозернистой структуры в титановом сплаве в ходе протекания процесса динамической рекристаллизации.

2. В результате экспериментальных исследований установлено влияние размера зерна титанового сплава на сопротивление деформации при температурах

деформации: напряжение течения при штамповке заготовок, полученных изотермическим выдавливанием в условиях, обеспечивающих протекание динамической рекристаллизации, на 42% ниже по сравнению с образцом, полученным по серийной технологии.

3. На основании проведенных исследований разработан опытный технологический процесс изготовления штамповок лопаток ГТД из титанового сплава ВТ6 с припуском под безразмерную обработку профиля пера, включающий в себя прямое изотермическое выдавливание титановой заготовки, имеющей геометрию максимально приближенную к окончательной детали, в условиях, обеспечивающих протекание динамической рекристаллизации, изотермическую штамповку при пониженной температуре, обеспечивающей повышенную стойкость ковочного инструмента, обрезку в штампе с прижимом, термообработку и термофиксацию, выполняемую при необходимости по результатам замеров геометрии профиля пера. Получен патент РФ на способ изготовления штамповок лопаток из титановых сплавов.

4. Выполнен анализ стойкости ковочного инструмента при штамповке заготовок, имеющих ультрамелкозернистую структуру в сравнении с аналогичной штамповкой по серийной технологии. Установлено, что в случае штамповки заготовок с ультрамелкозернистой структурой стойкость штампа повысится в 2,5 раза по сравнению с серийной технологией.

5. Полученные результаты апробированы и используются на ПАО «ОДК-Сатурн» при разработке технологических процессов изготовления заготовок лопаток компрессора ГТД из титановых сплавов методом объемной изотермической штамповки.

6. Результаты исследований диссертационной работы используются в учебном процессе при подготовке бакалавров, обучающихся по направлению 15.03.01 «Машиностроение» и магистров, обучающихся по направлению 15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» на кафедре «Мехатронные системы и процессы формообразования» им. С.С. Силина в РГАТУ им. П.А. Соловьева.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:**

1. Изотермическая штамповка точных заготовок лопаток ГТД под безразмерную обработку профиля пера. / С.А. Головкин, М.Л. Первов, М.В. Воздвиженская, А.С. Скобелева // Заготовительные производства в машиностроении. 2016. №9. С. 24-27.
2. О совершенствовании технологии изотермического деформирования для получения точных заготовок лопаток из титановых сплавов для ГТД. / С.А. Головкин, М.Л. Первов, А.С. Скобелева // Технология легких сплавов: научно-технический журнал / Всероссийский институт легких сплавов. - Москва: ВИЛС. 2019. №1. С. 62-66.
3. Технологическая схема процесса получения бездефектной структуры на лопатках из титановых сплавов. / Н.В. Рассудов, С.А. Головкин // Заготовительные производства в машиностроении. 2019. №9. С. 396-403.

Патенты:

1. Пат 142904 Российская Федерация, МПК51 В21К3/04 В21J13/02 Изотермический штамп для получения дисков с лопатками / Скобелева А.С., Первов М.Л., Головкин С.А., Непомнящий В.В. заявитель патентообладатель ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева». - № 2014104603/02; заявл. 10.02.2014; опубл. 10.07.2014, Бюл. №19
2. Пат 2637451 Российская Федерация, МПК51 В21J3/00 В21J13/02 В21С23/32 В21С25/00 Способ выдавливания малопластичных материалов и устройство для его осуществления/ Первов М.Л., Скобелева А.С., Головкин С.А. заявитель патентообладатель ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева». - № 2016129120; заявл. 15.07.2016; опубл. 14.12.2017, Бюл. №34
3. Пат 2614294 Российская Федерация, МПК51 С22F1/18 В21J1/00 В21J5/06 F01D5/28 Способ изготовления штамповок лопаток из титановых сплавов/ Первов

М.Л., Скобелева А.С., Головкин С.А. заявитель патентообладатель ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева». - № 2016112814; заявл. 04.04.2016; опубл. 24.03.2017, Бюл. №9

Конференции:

1. Технология изготовления из титановых сплавов лопаток ГТД с использованием изотермического выдавливания/ С.А. Головкин // Международный технологический форум «Инновации. Технологии. Производство»: Сборник тезисов докладов. – Рыбинск: РГАТУ им. П.А. Соловьева, 2014. с. 67-68.
2. Влияние режимов изотермического выдавливания на структуру и сопротивление деформации сплава ВТ6 / С.А. Головкин // Гагаринские чтения – 2016: XLII Международная молодёжная научная конференция: Сборник тезисов докладов: В 4 т. М.: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2016. Т.3. с. 507.