

АЛИМОВ АРТЕМ ИГОРЕВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
КОЛЕЦ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6 ПУТЕМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ**

Специальность 05.02.09 – Технологии и машины обработки давлением

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук



Москва – 2017

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана.

Научный руководитель: Евсюков Сергей Александрович
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Сосенушкин Евгений Николаевич
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО Московский государственный
технологический университет «Станкин»,
кафедра систем пластического деформирования

Стебунов Сергей Александрович
кандидат технических наук,
генеральный директор ООО «Кванторформ»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Тульский государственный
университет»

Защита состоится «___» апреля 2017 г. в 14:30 на заседании
диссертационного совета Д 212.141.04 в Московском государственном
техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу:
105005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д.5, стр. 1.

Телефон для справок 8 (499) 267-09-63.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью,
просим направлять по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского
государственного технического университета им. Н.Э. Баумана и на сайте
www.bmstu.ru.

Автореферат разослан «___» февраля 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.141.04
канд. техн. наук, доцент



Семенов В.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одними из наиболее широко применяемых материалов в современной технике являются титановые сплавы и, в частности, сплав ВТ6. Из этого сплава производят детали авиационных и ракетных двигателей, насосно-компрессорные трубы (НКТ) для шельфовых месторождений, оборудование химической промышленности, машиностроения и энергетики. При этом особый класс деталей составляют кольца, являющиеся в большинстве своем особо ответственными.

Одним из основных методов производства деталей из титановых сплавов является обработка давлением. Это связано с тем, что для многих титановых сплавов пластическая деформация является не только способом формоизменения, но и средством получения требуемой микроструктуры в отличие от большинства сталей и алюминиевых сплавов, в которых требуемую микроструктуру можно получить термической обработкой.

Выбор правильных режимов деформации и термообработки для титановых сплавов особенно важен, так как их механические свойства очень сильно зависят от типа и параметров микроструктуры. При неправильном выборе режима деформации в титановых сплавах могут произойти необратимые микроструктурные изменения, которые нельзя будет исправить термической обработкой.

Изучением технологических процессов изготовления колец, в том числе из титановых сплавов, занимались А.И. Целиков, П.И. Полухин, В.А. Костышев, И.Л. Шитарев, К.Н. Богоявленский, А.А. Королев, С.А. Микульчик, Е.В. Арышенский, E. Eruc, R. Shivpuri, J.B. Hawkyard, W. Johnson, A.G. Mamalis и другие исследователи.

Исследованием закономерностей формирования микроструктуры в титановых сплавах занимались Н.Ф. Аношкин, В.К. Александров, Г.А. Бочвар, А.А. Ильин, S.L. Semiatin, G. Lütjering, N. Stefansson и другие.

Низкая теплопроводность и высокий фактор трения титановых сплавов являются причиной локализации деформации и формирования неоднородной структуры. При этом в зонах интенсивной деформации за счет теплового эффекта деформации температура металла может значительно превышать температуру фазового превращения сплава. Из-за колебаний химического состава температура полного полиморфного превращения сплава ВТ6 может изменяться от 930 до 1010 °С.

Указанные факторы приводят к нестабильности получаемой микроструктуры поковок из сплава ВТ6, что, в свою очередь, приводит к нестабильности получаемых механических свойств.

Таким образом, работы, направленные на повышение стабильности механических свойств колец из титановых сплавов, являются **актуальными**.

Целью работы является обеспечение стабильности механических свойств колец из титанового сплава ВТ6 за счет управления технологическим процессом обработки давлением.

Для достижения цели необходимо решить следующие **задачи**:

- провести анализ методов изготовления колец из титановых сплавов и технологических факторов, влияющих на механические свойства колец из титановых сплавов;
- разработать математическую модель технологического процесса изготовления колец из титановых сплавов с учетом изменения микроструктуры;
- экспериментально определить параметры и коэффициенты математической модели технологического процесса изготовления колец из сплава ВТ6;
- исследовать влияние параметров технологического процесса изготовления колец из сплава ВТ6 на формоизменение, энергосиловые параметры и микроструктуру;
- разработать методику проектирования технологического процесса изготовления колец из сплава ВТ6 с учетом изменения микроструктуры.

Область исследования (по паспорту специальности). Закономерности деформирования материалов и повышения их качества при различных термомеханических режимах, установление оптимальных режимов обработки.

Объектом исследования является технология получения колец из титановых сплавов. В качестве **предмета исследования** выбраны параметры режима деформации при ковке и раскатке колец из титанового сплава ВТ6.

Методы исследования. Экспериментальные исследования проводились на современном сертифицированном оборудовании. Определение химического состава проводилось на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega 3 и спектрометре Спекс Лаэс Матрикс Континуум. Механические испытания проводились на универсальной испытательной машине Zwick/Roell Z050 и комплексе Gleeble-3800. Заливка образцов для металлографических исследований осуществлялась на установке для заливки образцов Struers CitoPress-20, шлифовка и полировка проводилась на полуавтоматическом шлифовально-полировальном станке Struers Tegramin-30. Металлографические исследования проводились при помощи микроскопа Olympus GX51, оборудованного специализированной цифровой камерой высокого разрешения UC30. Обработка изображений проводилась в бесплатных программах ImageJ 1.49v, IrfanView, Microsoft Image Composite Editor. Средний размер зерен рассчитывался методом подсчета пересечений границ зерен и методом измерения длин хорд, доля глобулярной α -фазы в бимодальной структуре определялась путем наложения сетки с размером ячейки 5х5 мкм.

Теоретические исследования базировались на положениях теории пластичности и теории обработки металлов давлением. Исследование проводилось путем математического моделирования в программном комплексе DEFORM 2D/3D 11.0 (лицензия № 8144) с использованием метода конечных элементов.

Все исследования проводились с использованием методов активного планирования экспериментов и многофакторного регрессионного анализа.

Достоверность результатов подтверждается многочисленными экспериментами, проведенными на современном оборудовании.

Получены следующие результаты, имеющие **научную новизну** и **выносимые на защиту**:

- конечно-элементная модель технологического процесса изготовления колец из сплава ВТ6, позволяющая определять напряженно-деформированное состояние заготовки, температуру и параметры микроструктуры на любой стадии технологии изготовления колец;
- методика прогнозирования микроструктуры титанового сплава ВТ6 при обработке давлением, учитывающая динамическую глобуляризацию, прямое и обратное полиморфное превращение;
- зависимости, позволяющие определять величину средней объемной доли глобулярной структуры от начальной температурыковки, времени выдержки между ударами и степени деформации при осадке.

Практическую значимость представляют следующие результаты:

- методика проектирования технологического процесса изготовления колец из сплава ВТ6, учитывающая изменение микроструктуры в процессе обработки давлением;
- пользовательские подпрограммы для программных комплексов DEFORM и QForm для расчета объемной доли глобулярной структуры сплава ВТ6 при обработке давлением;
- параметры режима технологии изготовления заготовки армирующего кольца сильфона ракетного двигателя РД-171 из сплава ВТ6, обеспечивающие формирование глобулярной микроструктуры.

Апробация работы. Основные положения работы были доложены на следующих конференциях и научных семинарах: Международный Форум «Инженерные системы», М., 2011, 2012, 2015; XI Конгресс «Кузнец-2012», Рязань, 2012; XVI Международная научно-техническая конференция «Достижения и проблемы развития технологий и машин обработки давлением», Краматорск, Украина, 2011; VI Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России», М., 2015; Международная научно-практическая конференция «Теоретические и прикладные задачи обработки металлов давлением и автотехнических экспертиз», Винница, 2011; Четвертая и Пятая Всероссийская научно-техническая конференция «Студенческая весна: Машиностроительные технологии», М., 2011, 2012.

Публикации. Основное содержание работы изложено в 16 научных работах общим объемом 4,93 печ. л., в том числе 5 в изданиях, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав основного текста, общих выводов. Общий объем диссертации составляет 160 страниц. Диссертация содержит 156 рисунков, 19 таблиц и список литературы из 164 наименований.

Работа выполнена в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса на 2014-2020 г.» при государственной поддержке Минобрнауки по Соглашению № 14.576.21.0030 от 30.06.2014 г. Уникальный идентификатор проекта RFMEFI 57614X0030.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрыта актуальность темы, определена цель и задачи исследования, сформулированы научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе охарактеризовано современное состояние технологии изготовления колец из титановых сплавов.

Проведен обзор основных методов изготовления колец. Обосновано, что ковка заготовки с последующей раскаткой является наиболее рациональным методом изготовления колец из титановых сплавов для аэрокосмической промышленности. Установлено, что для прогнозирования технологической наследственности свойств и структуры титановых сплавов необходимо учитывать в расчетах процессковки как предварительную операцию в технологическом процессе изготовления колец. При проведении анализа актуальной научно-технической литературы исследований по изучению технологической наследственности микроструктуры конечного изделия от режимовковки и раскатки при изготовлении колец из сплава ВТ6 не обнаружено.

Показано, что аналитические методы расчета параметров раскатки колец требуют введения большого числа допущений о процессе раскатки, что существенно снижает адекватность получаемых результатов. Наиболее универсальным методом расчета, позволяющим избежать введения большого числа допущений, является метод конечных элементов.

Показано, что тип и параметры микроструктуры оказывают существенное влияние на механические свойства титановых сплавов. На основе анализа существующих экспериментальных исследований было установлено, что наилучшим комплексом механических свойств обладает мелкозернистая глобулярная структура либо бимодальная структура с мелкозернистой первичной α -фазой и тонкопластинчатым строением β -превращенной фазы.

Установлено, что наиболее важным с практической точки зрения является процесс превращения ламеллярной структуры в глобулярную в процессе деформации, то есть динамическая глобуляризация. Анализ обнаруженных в литературе исследований кинетики динамической глобуляризации показал, что сведения о моделях, описывающих изменение микроструктуры в сплаве ВТ6 при обработке давлением, являются противоречивыми, поэтому для построения модели изменения микроструктуры сплава ВТ6 при обработке давлением требуется проведение дополнительных экспериментальных исследований.

Отмечено, что существующие методы расчетов процессов изготовления колец не позволяют прогнозировать микроструктуру конечного изделия, поэтому необходимо создание новой методики проектирования технологического процесса изготовления колец из сплава ВТ6 с учетом изменения микроструктуры.

Сформулированы цель и задачи исследования.

Вторая глава посвящена разработке математической модели технологического процесса раскатки колец из сплава ВТ6. Разработанная математическая модель позволяет установить напряженное и деформированное

состояние заготовки на любой стадии процесса, определить распределение температуры по объему поковки, предсказать возникновение дефектов, рассчитать энергосиловые параметры и спрогнозировать изменение микроструктуры.

Основные допущения модели:

- процесс деформации считался квазистатическим, динамические и волновые эффекты не учитывались;
- материал заготовки сплошной, однородный, изотропный;
- материал заготовки вязкопластический с нелинейным упрочнением;
- материал заготовки является несжимаемым;
- материал инструментов абсолютно жесткий;
- вопросы разрушения заготовки и стойкости инструмента не рассматривались;
- массовыми и объемными силами пренебрегали;
- температура инструмента постоянная;
- трение учитывалось по модели Зибеля;
- фактор трения считался постоянным;
- критерием пластичности был выбран критерий Губера-Мизеса.

При решении тепловой задачи в модели учитываются конвекция и излучение со свободной поверхности заготовки, конвективный теплообмен с инструментами через смазку, тепловой эффект пластической деформации. Теплотехнические характеристики сплава ВТ6 и графитовой смазки взяты из существующих экспериментальных исследований.

Ковка осуществляется на ковочном паровоздушном молоте М1345. Выбор данного технологического оборудования обусловлен его наличием в кузнечнопрессовом цехе АО «НПО Энергомаш имени академика В. П. Глушко».

Последовательность ковки кольцевой заготовки состоит из трех операций (Рисунок 1): осадка, прошивка, пробивка перемычки.

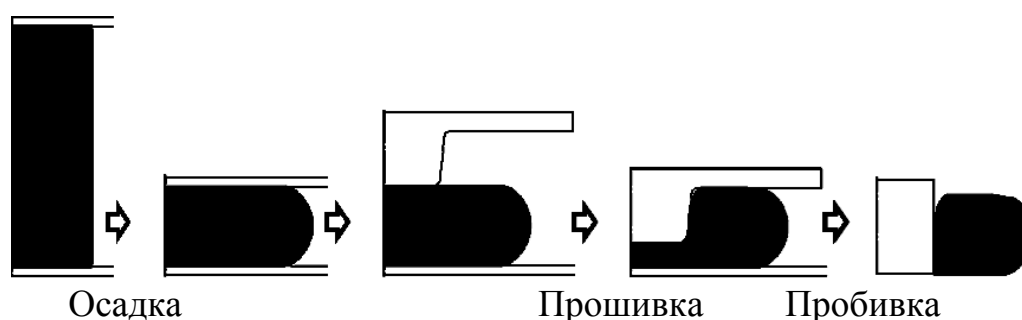


Рисунок 1. Последовательность ковки кольцевой заготовки из сплава ВТ6

При расчете ковки принимались следующие допущения:

- масса падающих частей 3150 кг;
- энергия удара 80 кДж;
- температура инструментов постоянная;
- начальная температура заготовки задавалась постоянной по объему;
- в паузе между ударами при осадке боек не контактировал с заготовкой;

- в паузе между ударами при прошивке инструмент оставался в контакте с заготовкой;
- пробивка моделируется логическим вычитанием объекта из заготовки.

Раскатка осуществляется на кольцераскатной машине мод. 044 с номинальной силой 400 кН. Основные допущения, принимаемые при расчете раскатки колец:

- стадии выравнивания толщины стенки кольца и калибровки не моделировались;
- проскальзывание в калибре отсутствует;
- изгиб кольца не учитывался.
- главный валок вращается с постоянной угловой скоростью;
- оправка движется с постоянной линейной скоростью;

Была разработана методика прогнозирования микроструктуры сплава ВТ6 при обработке давлением, учитывающая динамическую глобуляризацию, прямое и обратное полиморфное превращение (Рисунок 2).

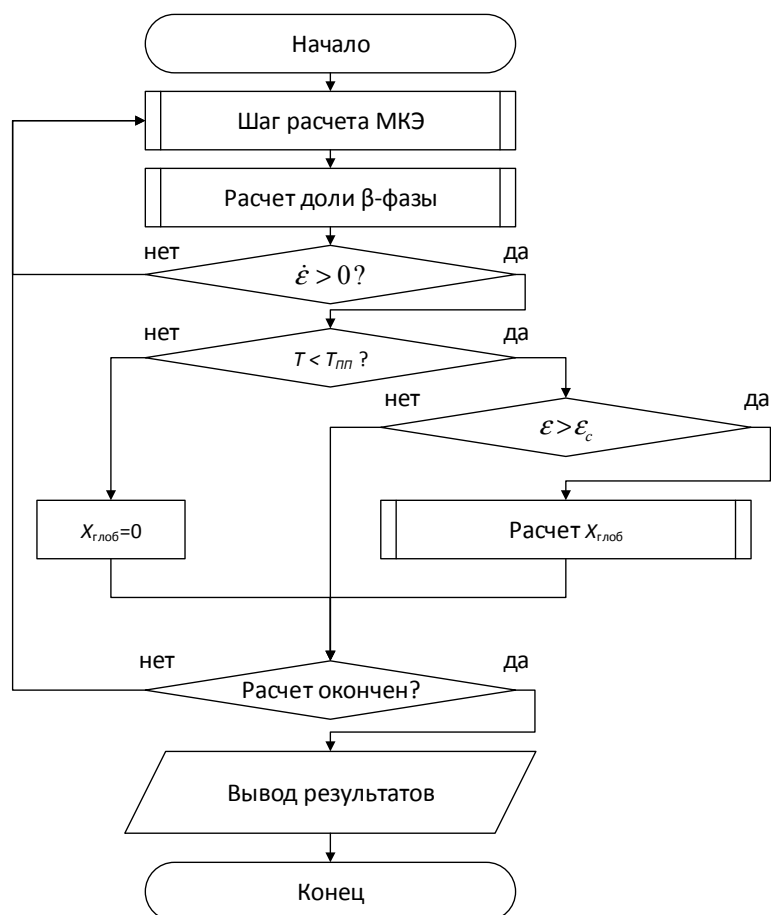


Рисунок 2. Укрупненная блок-схема алгоритма прогнозирования микроструктуры сплава ВТ6

Были введены следующие допущения:

- огрубление структуры не происходит за счет сдерживающего влияния межзеренной β -фазы;
- полиморфное превращение происходит при достижении температуры полного полиморфного превращения;

- продуктом обратного полиморфного превращения является ламеллярная структура с параметрами, идентичными исходной;
- влияние типа и параметров исходной микроструктуры на кинетику динамической глобуляризации не учитывается.
- кинетика динамической глобуляризации описывается уравнением Джонсона-Мейла-Аврами-Колмогорова:

$$X_{\text{глоб}} = 1 - \exp \left[-\beta_d \cdot \left(\frac{\varepsilon}{a \dot{\varepsilon}^m \cdot \exp \left(\frac{Q}{RT} \right)} \right)^{k_d} \right], \quad (1)$$

где a, m, β_d, k_d, Q – константы.

Проведен анализ влияния учета теплопроводности инструментов на результаты решения тепловой задачи. Было установлено, что допущение о постоянстве температуры инструмента не оказывает существенного влияния на результаты расчета.

В третьей главе описаны экспериментальные исследования, проведенные на сплаве ВТ6 производства ПАО «Корпорация ВСППО-АВИСМА». Фактический химический состав приведен в Таблице 1.

Таблица 1.
Химический состав сплава ВТ6, использованного в исследовании

	Fe	C	Si	V	Al	Zr	Ti
ГОСТ 19807-91	до 0,6	до 0,1	до 0,1	3,5 - 5,3	5,3 - 6,8	до 0,3	основа
Факт. хим. состав	0,13	0,05	0,03	4,36	5,94	0,04	

Заготовки нагревались до 1040 °С, выдерживались при данной температуре 10 минут и закаливались в воду. Данная термообработка использовалась для получения ламеллярной структуры, которая характерна для слитков и полуфабрикатов, обработанных в β -области. Микроструктура сплава ВТ6 после закалки представлена на Рисунке 3. Средний размер зерен β -фазы составил 337,4 мкм, средняя толщина пластин α -фазы 1,43 мкм.

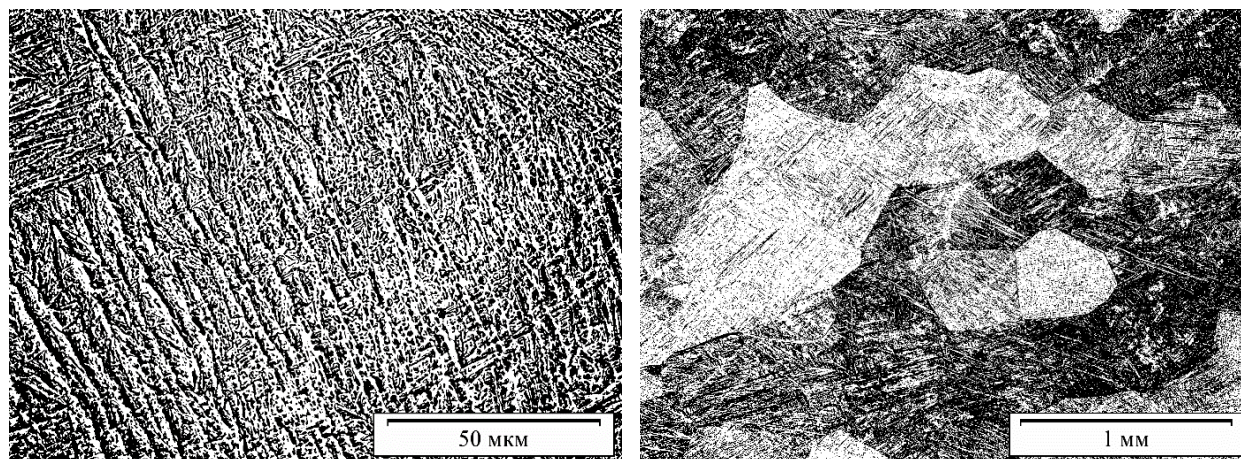


Рисунок 3. Микроструктура сплава ВТ6 после закалки с 1040 °С в воду

Температура полного полиморфного превращения сплава ВТ6 была определена согласно инструкции ВИАМ № 1054-76 и составила 955 °С.

Был разработан и реализован полнофакторный план эксперимента для определения реологической модели сплава ВТ6 в диапазоне температур от 800 °С до 1040 °С и скоростей деформации от 0,01 с⁻¹ до 50 с⁻¹.

Механические испытания при скоростях деформации от 0,01 до 1 с⁻¹ проводились в изотермических условиях на универсальной испытательной машине Zwick/Roell Z050 с номинальной силой 50 кН. Машина оборудована трехзонной печью сопротивления с максимальной температурой 1200 °С и системой подачи аргона в зону деформации для проведения испытаний в защитной атмосфере. Контроль температуры осуществляется тремя термопарами ХА. Механические испытания со скоростью деформации 50 с⁻¹ проводились на комплексе Gleeble 3800. Для предотвращения окисления испытание проводилось в вакууме. Нагрев осуществлялся электроконтактным способом, а охлаждение – сжатым воздухом. Температура контролировалась по термопаре ХА, приваренной к образцу.

Для учета неоднородности деформации, теплового эффект деформации и трения использовался усовершенствованная методика инверсного анализа, укрупненный алгоритм которой приведен на Рисунке 4. Данная методика позволяет определять семейство кривых течения. При расчетах начальная температура заготовки считалась постоянной по объему. Расчетная скорость деформирования соответствовала реальной скорости деформирования при испытаниях. Семейство кривых течения задается в табличном виде. Определение кривых течения осуществлялось путем минимизации целевой функции:

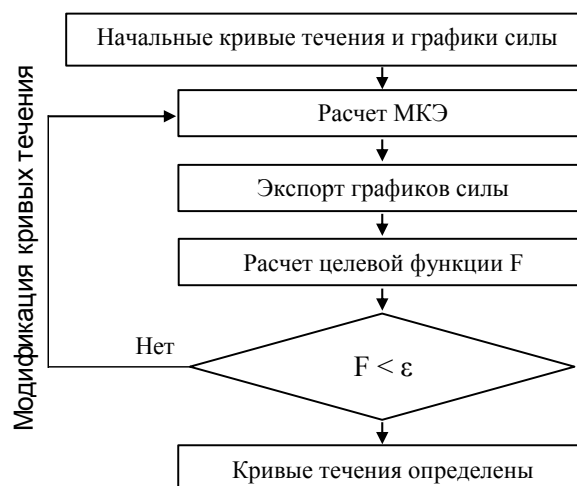


Рисунок 4. Укрупненная блок-схема алгоритма инверсного анализа

$$F = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K \frac{1}{N_j} \sum_{i=1}^N \left(\frac{F_{ij} - f_{ij}}{F_{ij}} \right)^2, \quad (2)$$

где K – количество кривых течения;
 N – число точек, аппроксимирующих кривую течения;
 F_{ij} – экспериментально определенная сила в точке, Н;
 $f_{ij}(p)$ – рассчитанная сила в точке, Н.

При помощи усовершенствованной методики инверсного анализа были получены кривые течения, представленные на Рисунке 5.

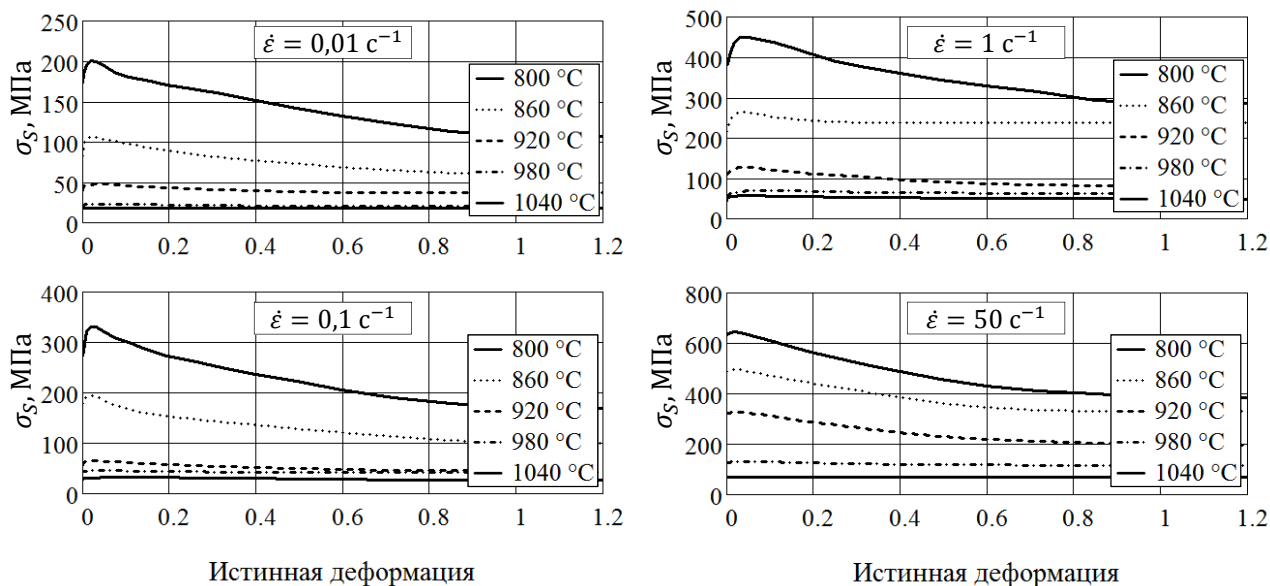


Рисунок 5. Кривые течения сплава ВТ6

Верификация полученной реологической модели показала, что ошибка расчета силы деформирования не превышает 10% для скоростей деформации от 0,01 до 1 с⁻¹ и 21,5% для скорости деформации 50 с⁻¹ (Рисунок 6). Точками показаны экспериментальные данные.

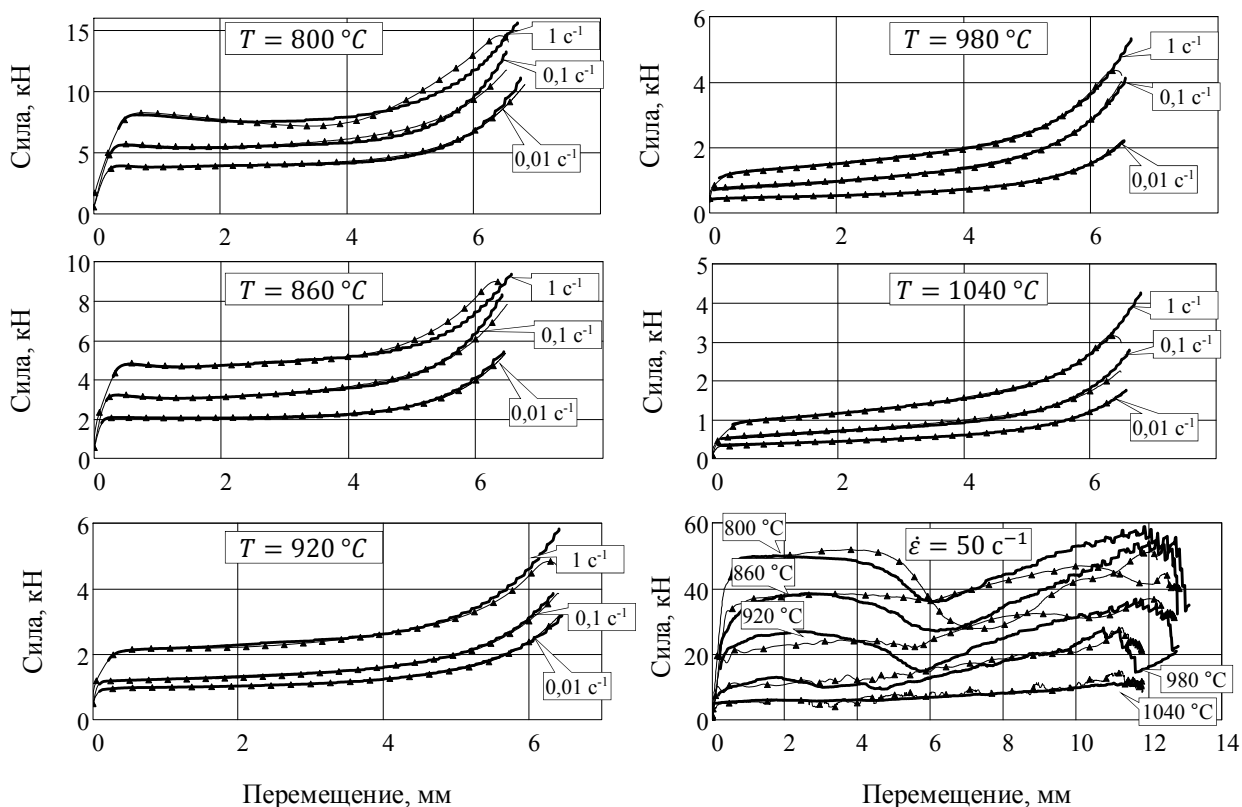


Рисунок 6. Верификация реологической модели сплава ВТ6

Определение фактора трения сплава ВТ6 осуществлялось при помощи метода осадки кольца. Фактор трения при использовании различных смазок представлен в Таблице 2.

Таблица 2.
Фактор трения сплава ВТ6

Смазка	Фактор трения
Без смазки	0,98
Графит	0,80
WS ₂	0,78

Экспериментально обосновано допущение об отсутствии статической глобуляризации сплава ВТ6. Исследование проводилось в диапазоне температур от 800 до 920 °С, истинных деформаций от 0,12 до 0,4, скоростей деформации от 0,01 до 1 с⁻¹ и времени выдержки после деформации от 10 до 180 с. Установлено, что микроструктура образцов после испытаний является ламеллярной. Были сделаны следующие выводы:

- статическая глобуляризация не происходит при температурно-скоростных параметрах и времени выдержки, реализуемых в технологическом процессе изготовления колец;
- критическая деформация начала динамической глобуляризации превышает 0,4.

Разработан и реализован план эксперимента для идентификации параметров математической модели динамической глобуляризации сплава ВТ6 (Таблица 3).

Получены снимки структуры в центральной точке образцов (Рисунок 7). Средний размер зерен рассчитывался методом подсчета пересечений границ зерен и методом измерения длин хорд, доля глобулярной α -фазы в бимодальной структуре определялась путем наложения сетки с размером ячейки 5х5 мкм. Глобулярной считалась морфология α -фазы с соотношением сторон менее 3 к 1.

Расчетное значение среднего размера зерен глобулярной α -фазы сплава составило $1,39 \pm 0,19$ мкм, поэтому можно считать его не зависящим от температурно-скоростных условий деформации.

Для оценки неоднородности деформации, обусловленной действием сил трения на поверхностях контакта образца с инструментом и тепловым эффектом пластической деформации, проводилось моделирование испытаний в программном комплексе DEFORM. Размеры образцов и режим деформирования полностью соответствуют экспериментам. В результате моделирования были получены значения средней температуры, средней скорости деформации и накопленной деформации в центральной точке образца.

Таблица 3.
План эксперимента по исследованию динамической глобуляризации сплава ВТ6

№, п/п	T, °C	$\dot{\epsilon}$, с ⁻¹	ϵ
1	790	0,01	0,6
2	790	1	1,1
3	790	0,1	1,5
4	840	0,01	0,6
5	840	1	1,1
6	840	0,1	1,5
7	890	0,01	0,6
8	890	1	1,1
9	890	0,1	1,5

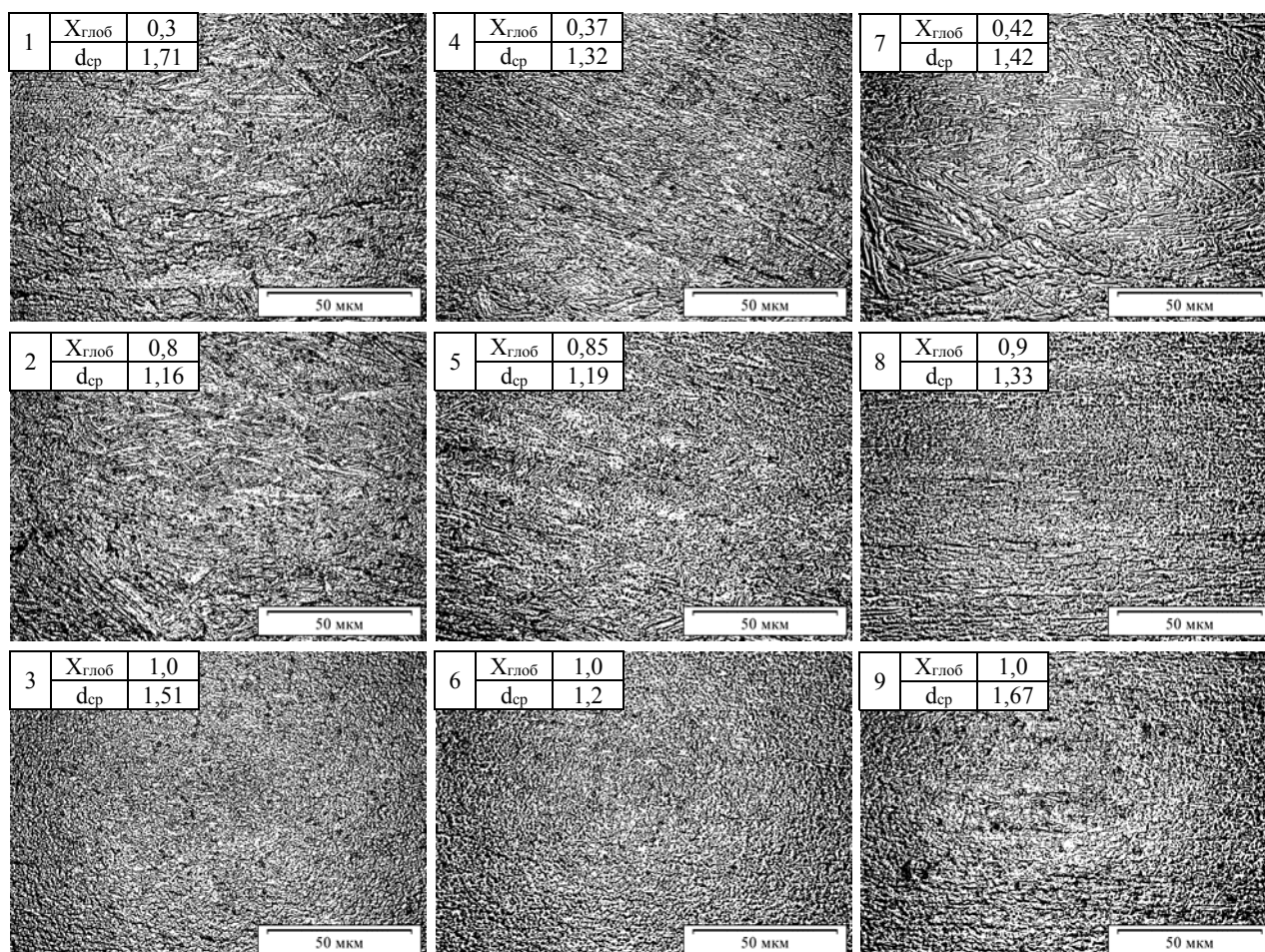


Рисунок 7. Микроструктура образцов из сплава ВТ6

По результатам исследования для доверительной вероятности 0,95 была построена модель динамической глобуляризации сплава ВТ6:

$$X_{\text{глоб}} = 1 - \exp \left[-0,693 \cdot \left(\frac{\varepsilon}{0,132 \varepsilon^{-0,07} \cdot \exp \left(\frac{21500}{RT} \right)} \right)^2 \right] \quad (3)$$

$\varepsilon_c = 0,5$
 $d_{\text{ср}} = 1,39 \text{ мкм}$

В четвертой главе с помощью математического моделирования выполнено исследование технологического процесса изготовления колец за две операции: ковку и раскатку. В качестве факторов варьирования при исследовании процесса ковки были выбраны начальная температура, выдержка между ударами и общая степень деформации при осадке (Таблица 4).

Была построена зависимость объемной доли глобулярной структуры ($\bar{X}_{\text{глоб}}$) от начальной температуры ковки (T), времени выдержки между ударами (t) и степени деформации при осадке (ε):

$$\bar{X}_{\text{глоб}} = 1,733 \cdot 10^{-3} T \varepsilon + 0,048 t \varepsilon + 2,911 \varepsilon^2 - 5,183 \varepsilon + 3,372 \cdot 10^{-4} T t - 3,784 \cdot 10^{-3} t^2 - 0,247 t - 14,053 + 0,04 T - 2,582 \cdot 10^{-5} T^2 \quad (4)$$

Полученная модель аппроксимирует данные моделирования с множественным коэффициентом детерминации, равным 0,975. Было установлено, что наибольшее влияние на долю глобулярной структуры послековки оказывает начальная температура и время выдержки между ударами. Наибольшая доля глобулярной структуры была получена при начальной температуре 875 °С, выдержке между ударами 8 с и степени деформации при осадке 0,77.

Данный расчет использовался для исследования технологического процесса раскатки колец. В качестве факторов варьирования были выбраны начальная температура заготовки и скорость оправки (Таблица 5).

Результаты исследования представлены на Рисунке 8. Установлено, что сила и момент раскатки увеличиваются с уменьшением начальной температуры и увеличением скорости оправки, причем влияние скорости оправки увеличивается с уменьшением температуры. Увеличение средней объемной доли глобулярной структуры при раскатке незначительно зависит от начальной температуры и скорости оправки и составляет, в среднем, 0,2. Средняя объемная доля глобулярной структуры после раскатки во всех исследованных случаях была более 90%.

Относительный внутренний диаметр кольца после раскатки увеличивался с увеличением скорости оправки и практически не зависел от начальной температуры. Относительное уширение кольца после раскатки увеличивалось с повышением начальной температуры и увеличением скорости оправки, при этом уширение кольца отсутствовало при скорости оправки 2 мм/с. Максимальная ширина кольца после раскатки увеличивается с увеличением повышения начальной температуры и увеличением скорости оправки.

Для проверки возможности исправления ламеллярной структуры, получаемой при ковке, было проведено моделирование в программном комплексе QForm VX. Проводилось исследование технологического процесса с режимомковки, который привел к формированию наименьшей средней объемной доли глобулярной структуры. Было установлено, что после раскатки кольцо имеет неоднородную структуру: наружная часть кольца имеет глобулярную структуру, в то время как часть материала внутри поковки имеет ламеллярную структуру. Таким образом, брак, получаемый на стадииковки, последующей раскаткой не может быть исправлен.

Таблица 4.

Уровни факторов при исследовании процессаковки

Варьируемые факторы	Уровни варьирования
Начальная температура, °С	$T_{пп} - 130 = 825$
	$T_{пп} - 80 = 875$
	$T_{пп} - 30 = 925$
Выдержка между ударами, с	2
	5
	8
Степень деформации при осадке	0,67
	0,72
	0,77

Таблица 5.

Уровни факторов при исследовании раскатки

Варьируемые факторы	Уровни варьирования
Начальная температура, °С	825
	875
	925
Скорость оправки, мм/с	2
	4
	6

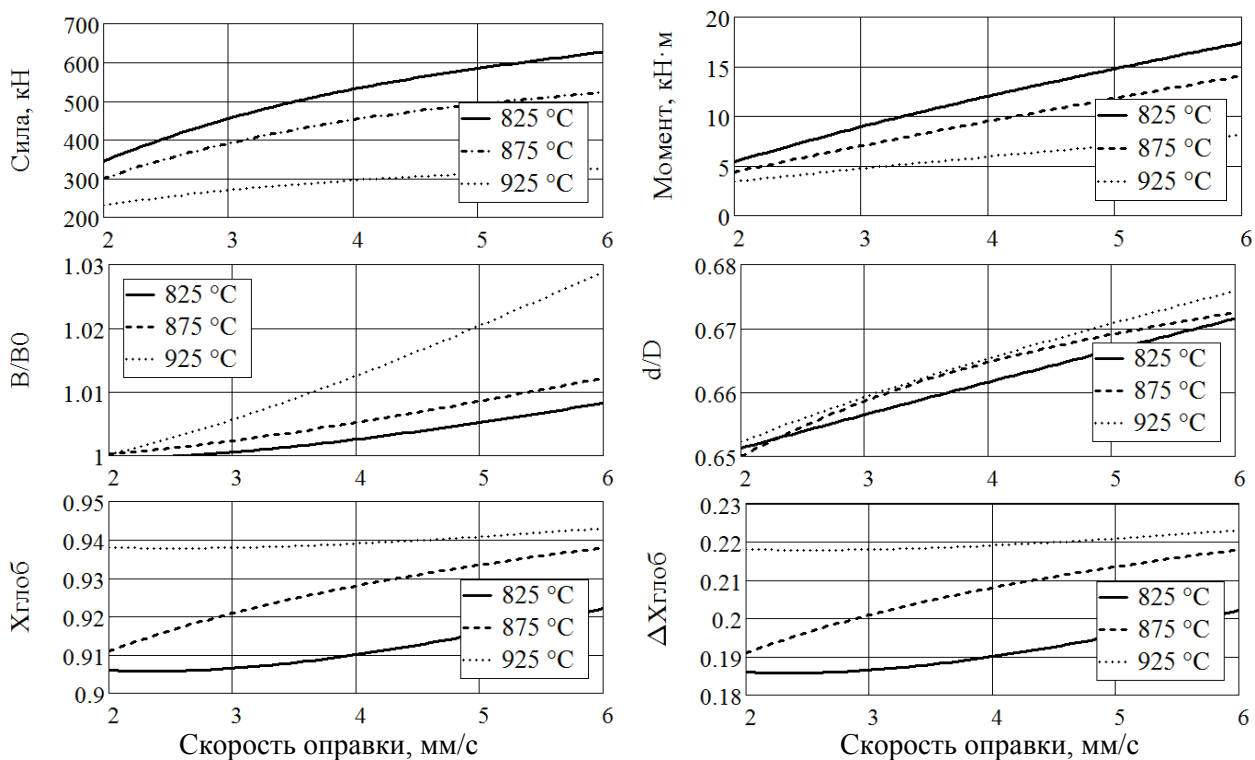


Рисунок 8. Результаты исследования раскатки колец

В пятой главе описывается практическое использование результатов работы. Разработана методика проектирования технологического процесса изготовления колец из сплава ВТ6 с учетом изменения микроструктуры, блок-схема алгоритма которой представлена на Рисунке 9.

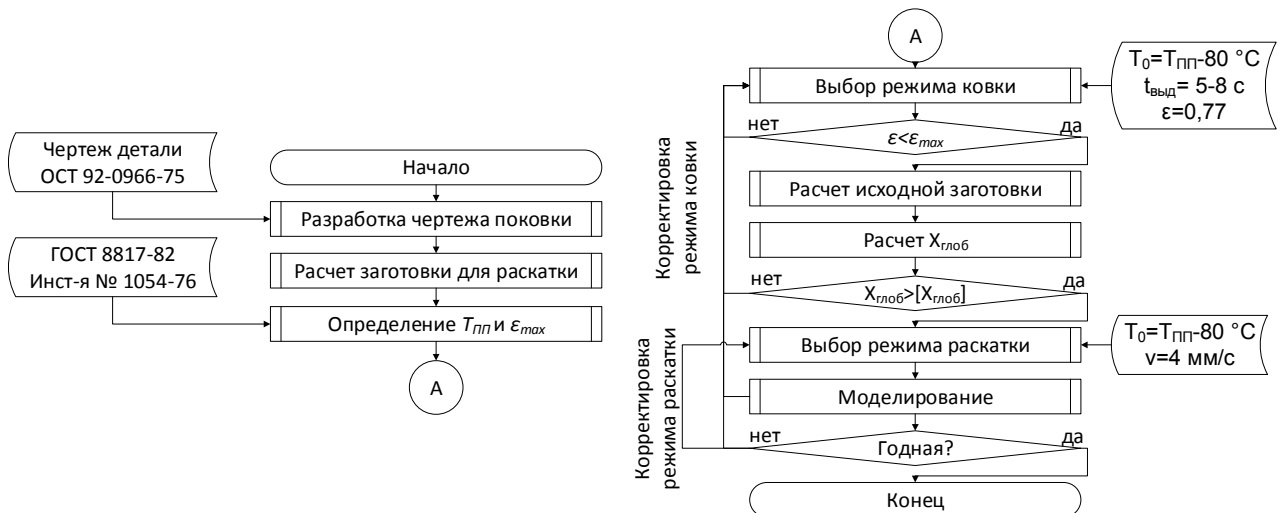


Рисунок 9. Блок-схема укрупненного алгоритма методики проектирования технологического процесса изготовления колец

Результаты проектирования конкретного технологического процесса были переданы для использования в АО «НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко». По запросу ООО «ЧТПЗ-Инжиниринг» было проведено моделирование технологии получения конической резьбы на шельфовых трубах с использованием разработанной методики прогнозирования микроструктуры. Результаты диссертационной работы также были использованы в ООО «Кванторформ».

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Анализ технической литературы показал, что в настоящее время исследований по изучению технологической наследственности микроструктуры конечного изделия от режимовковки и раскатки при изготовлении колец из сплава ВТ6 не обнаружено.

2. В результате проведенных экспериментальных исследований определены кривые течения, параметры трения и кинетики глобуляризации сплава ВТ6, позволяющие использовать разработанную математическую модель для исследования влияния параметров технологического процесса изготовления колец из сплава ВТ6 на формоизменение, энергосиловые параметры и микроструктуру.

3. Разработанная математическая модель технологического процесса изготовления колец из титановых сплавов позволяет установить напряженное и деформированное состояние заготовки на любой стадии процесса, определить распределение температуры по объему поковки, предсказать возникновения дефектов, рассчитать энергосиловые параметры и спрогнозировать изменение микроструктуры. В результате анализа модели было установлено, что для получения наибольшей объемной доли глобулярной структуры колец необходимо:

- снижать начальную температурыковки до $T_{пп} - 80\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- увеличивать время выдержки между ударами до 5-8 с;
- увеличивать относительную степень деформации при осадке до 0,77;
- проводить раскатку с начальной температурой $T_{пп} - 80\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- задавать скорость оправки от 2 до 4 мм/с.

4. Верификация математической модели технологического процесса изготовления колец из сплава ВТ6 показала:

- ошибка расчета силы деформирования не превышает 10% для скоростей деформации от 0,01 до 1 с^{-1} и 21,5% для скорости деформации 50 с^{-1} ;
- максимальная ошибка определения наружного и внутреннего диаметра при расчете испытания на осадку кольца не превышает 1,53 %;
- средняя ошибка определения доли глобулярной структуры сплава ВТ6 составила 0,8%. максимальная – 11,5%;
- зависимость средней объемной доли глобулярной структуры от начальной температурыковки, времени выдержки между ударами и степени деформации при осадке аппроксимирует данные моделирования с множественным коэффициентом детерминации, равном 0,975.

5. Разработанная методика проектирования технологического процесса изготовления колец из сплава ВТ6 позволяет определять параметры режима технологического процесса изготовления колец с наибольшей долей глобулярной микроструктуры, что обеспечивает стабильность механических свойств.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Воронежский Е.В., Евсюков С.А., Алимов А.И. Исследование влияния режимов деформации на формирование структуры и свойств поковок из сплава ВТЗ-1 // Труды НПО Энергомаш им. академика В.П. Глушко. 2011. № 28. С. 229-239. (0,88 печ. л. / 0,3 печ. л.)
2. Воронежский Е.В., Евсюков С.А., Алимов А.И. Влияние термомеханической обработки на свойства титановых штамповок // Заготовительные производства в машиностроении. 2012. №1. С. 17-20. (0,25 печ. л. / 0,1 печ. л.)
3. Алимов А.И., Воронежский Е.В. Математическое моделирование эволюции микроструктуры поковки в процессе термомеханической обработки // «Наука и образование: электронное научно – техническое издание». 2011. Вып. 8. Рег. № ФС 77 - 48211.
URL: <http://technomag.edu.ru/doc/216920.html>. (0,94 печ. л. / 0,8 печ. л.)
4. Воронежский Е.В., Евсюков С.А., Алимов А.И. Влияние термомеханической обработки на свойства титановых штамповок // «Наука и образование: электронное научно – техническое издание». 2011. 9. Рег. № ФС 77 - 48211.
URL: <http://technomag.edu.ru/doc/218401.html>. (0,69 печ. л. / 0,25 печ. л.)
5. Исследование процесса получения конической резьбы на НКТ методом штамповки / А.И. Алимов [и др.] // Нефтяное хозяйство. 2015. № 15. С. 124-126. (0,19 печ. л. / 0,1 печ. л.)
6. Алимов А.И., Евсюков С.А. Совершенствование технологического процесса горячей раскатки колец из сплава ВТ6 // Восьмая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России»: сборник докладов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. С. 170-172. (0,19 печ. л. / 0,15 печ. л.)
7. Алимов А. И. Компьютерное моделирование эволюции микроструктуры никелевых сплавов в процессе горячей обработки // Сборник тезисов международной научно-практической конференции "Инженерные системы-2011". Москва: РУДН. 2011. С. 121-125. (0,31 печ. л.)
8. Алимов А.И. Математическое моделирование эволюции микроструктуры поковки в процессе термомеханической обработки // Теоретические и прикладные задачи обработки металлов давлением и автотехнических экспертиз. Сборник тезисов международной научно-технической конференции. Винница: ВНТУ. 2011. С. 170-172. (0,19 печ. л.)
9. Алимов А.И., Евсюков С.А. Исследование технологического процесса получения титановых колец радиальной раскаткой // Инженерные системы: Труды Международного форума. Москва. 2012. С. 190-195. (0,38 печ. л. / 0,3 печ. л.)
10. Алимов А.И., Евсюков С.А. Исследование технологического процесса получения титановых колец ковкой на молотах // Инженерные системы: Труды Международного форума. Москва. 2012. С. 184-189. (0,31 печ. л. / 0,25 печ. л.)

11. **Алимов А.И.**, Евсюков С.А. Исследование технологических процессов получения титановых колец // Перспективы инновационного и конкурентно способного развития кузнечно-прессового машиностроения и кузнечно-штамповочных производств. Сборник докладов и материалов XI конгресса «Кузнец-2012». Рязань, 2012. С. 280-292. (0,81 печ. л. / 0,7 печ. л.)
12. **Алимов А.И.**, Власов А.В., Евсюков С.А. Влияние трения на точность определения напряжения текучести при построении кривых упрочнения с помощью испытаний на одноосное сжатие // Обработка материалов давлением: Сб. науч. трудов. Краматорск: ДГМА, 2013. № 2 (35). С. 53-59. (0,44 печ. л. / 0,25 печ. л.)
13. **Алимов А.И.**, Шитиков А.А., Евсюков С.А. Определение кривых текучести сплава ВТ6 с помощью инверсного анализа // Восьмая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России»: Сборник докладов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. С. 172-174. (0,19 печ. л. / 0,1 печ. л.)
14. **Алимов А. И.**, Воронежский Е.В. Математическое моделирование эволюции микроструктуры поковки в процессе термомеханической обработки [Электронный ресурс] // Четвертая Всероссийская научно-техническая конференция «Студенческая весна 2011: Машиностроительные технологии». Москва, 2011. URL: <http://studvesna.qform3d.ru?go=articles&id=312>. (0,63 печ. л. / 0,4 печ. л.)
15. Воронежский Е.В., **Алимов А.И.** Исследование причин получения заниженных пластических свойств материала ВТ3-1 [Электронный ресурс] // Четвертая Всероссийская научно-техническая конференция «Студенческая весна 2011: Машиностроительные технологии». Москва, 2011. URL: <http://studvesna.qform3d.ru?go=articles&id=431>. (0,44 печ. л. / 0,1 печ. л.)
16. **Алимов А.И.** Моделирование технологических процессов получения титановых колец [Электронный ресурс] // Труды Всероссийской научно-технической конференции «Студенческая весна 2012: Машиностроительные технологии». М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. URL: <http://studvesna.qform3d.ru?go=articles&id=667>. (0,63 печ. л.)