

*На правах рукописи*



**МИРОНОВА  
ЕКАТЕРИНА ВИКТОРОВНА**

**РАСПАД НЕРАВНОВЕСНЫХ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ  
И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТИТАНОВЫХ ЗАГОТОВОК  
ДЛЯ ЛОПАТОК ПАРОВЫХ ТУРБИН**

**Специальность: 05.16.09 – материаловедение (машиностроение)**

**АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**Санкт-Петербург – 2013**

Работа выполнена на кафедре «Машиноведение и основы конструирования» в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

**Научный руководитель:** **Скотникова Маргарита Александровна**  
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Машиноведение и основы конструирования», ФГБОУ ВПО «СПбГПУ», г. Санкт-Петербург

**Официальные оппоненты:** **Пряхин Евгений Иванович**  
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Материаловедение и технологии художественных изделий», ФГБОУ ВПО Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», г. Санкт-Петербург

**Трофимов Валерий Васильевич**  
кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник кафедры «Транспортные и технологические системы» ФГБОУ ВПО «СПбГПУ», г. Санкт-Петербург

**Ведущая организация:** ФГБУН «Институт проблем машиноведения» Российской академии наук, г. Санкт-Петербург

Защита состоится “ 17 ” декабря 2013 г. в 16 ч. на заседании диссертационного совета Д 212.229.19 в ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, лабораторно-аудиторный корпус, кафедра «Машины и технология обработки металлов давлением».  
Факс: +7(812) 552-64-29 e-mail: elmic@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан “ 15 ” ноября 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук,  
доцент



Кункин  
Сергей  
Николаевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Для увеличения мощности паровых турбин, необходимо увеличение длины рабочих лопаток цилиндра низкого давления, а значит, увеличение их габаритов и веса. В процессе горячей деформации и теплосмен, по сечению заготовок лопаток возникает повышенная склонность материала к структурно-химической неоднородности, которая приводит к разбросу результатов механических испытаний и к снижению их уровня, особенно вязко-пластических. Поэтому возрастают требования, предъявляемые к лопаточному материалу.

Практика показала, что наиболее перспективными материалами являются титановые сплавы, которые по сравнению со сталями, обладают в 2-2,5 раза более высокими значениями удельной прочности, коррозионно-эрозионной и усталостной стойкости. Применение титановых сплавов сделало возможным создать рабочую лопатку длиной 1400 мм, но для этого было необходимо совершенствовать технологию её изготовления.

Технология изготовления титановых заготовок (особенно больших толщин) основана на использовании горячей деформации и последующей термической обработки. Уже в процессе пластической деформации и на стадии последующей термообработки, имеет место распад неравновесных твердых растворов, вызывающий снижение вязко-пластических свойств титановых сплавов.

В связи с вышесказанным, работа по исследованию распада неравновесных твердых растворов и механических свойств титановых заготовок для лопаток паровых турбин, а также разработка путей создания регламентированной структуры с заданным и стабильным комплексом свойств, является, безусловно, **актуальной**.

**Цель работы и задачи исследования.** Цель настоящей работы заключалась в изучении закономерностей структурных и фазовых превращений, сопровождающихся релаксационным перераспределением избыточных легирующих элементов в объеме крупногабаритных титановых заготовок для лопаток паровых турбин при определенных высоких температурах, и в разработке путей создания регламентированной структуры металла лопаток с заданным и стабильным комплексом свойств.

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

**1.** Разработать кристаллогеометрическую модель высокотемпературного вакансионно - пересыщенного состояния ОЦК - твёрдого раствора, формирующегося при нагреве в результате полиморфного превращения из плотноупакованной ГПУ- модификации. Установить причины трудности измельчения зерен при нагреве полиморфного титана и его сплавов путем фазовой перекристаллизации;

**2.** Построить зависимости между абсолютными температурами нагрева ( $T$ ) под закалку и результатами количественной оценки содержания высокотемпературной  $\beta$ - фазы, далее определить температуры приведенные к одинаковому содержанию высокотемпературной  $\beta$ - фазы ( $T_\beta$ ) в материалах прутков из сплавов ВТ6 и ВТ20;

**3.** Разработать методику и компьютерную программу для электронно-микроскопической оценки типа и параметров кристаллической решётки дисперсных фаз титановых лопаточных материалов;

4. Изучить закономерности структурных и фазовых превращений в объёме титановых лопаток паровых турбин, сопровождающихся релаксационным перераспределением избыточных легирующих элементов.

5. Установить корреляционные зависимости структурно-химических параметров исследованных сплавов с комплексом механических свойств и разработать технологические рекомендации по выбору рационального режима окончательной штамповки материала лопаток паровых турбин из сплавов ВТ6 и ВТ20, с регламентированной *глобулярно-пластинчатой* структурой и с заданным и стабильным комплексом механических и служебных свойств.

### **Научная новизна.**

1. Установлено, что во время полиморфного  $\alpha_p \rightarrow \beta_p$ - превращения, высокотемпературная ОЦК- фаза, образуясь по *сдвиговому* механизму и наследуя дефекты низкотемпературной (ГПУ)- модификации, оказывается вакансионно - пересыщенным  $\beta$ - твердым раствором ( $\beta_{\text{перес}}$ ). Полное завершение полиморфного превращения и переход  $\beta_{\text{перес}}$  пересыщенной вакансиями в равновесное состояние ( $\beta_{\text{перес}} \rightarrow \beta_p$ ), протекает по *диффузионному* многостадийному механизму распада: на **1 стадии** возникает *микрорасслоение* (образование двух зон - обогащенной и обедненной вакансиями); на **2 стадии** внутри этих зон, соответственно, появляются когерентные с металлической матрицей предвыделения - вакансионные с  $\omega$  (ГПУ)- решеткой (хрупкое  $\omega$  - состояние) и – металлические с алмазоподобной решеткой (кристаллогеометрически упрочненное состояние). Далее, на **3 стадии** происходит перераспределение на вакантные места дислоцированных атомов, то есть “схлопывание” вакансионной и металлической подрешеток и формирование равновесного ОЦК - твердого раствора.

2. Установлено, что горячая деформация заготовок из сплавов ВТ20 и ВТ6 и воздушное охлаждение из температурно-временного интервала, соответствующего приведённой температуре **T65**, приводит к распаду, находящихся в вакансионно - пересыщенном ОЦК- состоянии неравновесных  $\beta_{\text{перес}}$ , твердых растворов с максимальной скоростью, так как распаду предшествуют структурные превращения по механизму полигонизации. На стадии *микрорасслоения* происходит *равномерное внутризёрненное* перераспределение вакансий и избыточных легирующих элементов вдоль малоугловых дислокационных границ субзёрен, вызывая изменение их химического и фазового состава. Наблюдается повышение прочности материала за счет упрочнения дислокационными границами субзёрен и сохранение вязко - пластических свойств за счет относительно равномерного распределение легирующих элементов в структуре сплавов.

3. Установлено, что горячая деформация заготовок из сплавов ВТ20 и ВТ6 и ускоренное охлаждение из температурно-временных интервалов, соответствующих приведённым температурам **T50** и **T75**, приводит к задержке распада, находящихся в вакансионно - пересыщенном ОЦК- состоянии неравновесных  $\beta_{\text{перес}}$ , твердых растворов, так как распаду предшествуют структурные превращения по механизму *непрерывной рекристаллизации*. Избыточные вакансии и легирующие элементы распадающихся фаз (по механизму восходящей диффузии) интенсивно перераспределялись на границы раздела рекристаллизованных зёрен или в пределы фаз,

не подвергнутых рекристаллизации, приводя к возрастанию их концентрационной неоднородности и к появлению крупных частиц (концентраторов) остаточной  $\beta$ - фазы. При этом отмечали снижение прочностных и вязко-пластических характеристик.

**4.** В результате проведенных исследований получены новые технические решения, подтвержденные патентом РФ № 2013610022 от 09.01.2013.

**Личный вклад автора** заключался в том, что: предложен алгоритм компьютерной программы для электронно-микроскопической оценки типа и параметров кристаллической решётки дисперсных фаз титановых лопаточных материалов; проведены исследования и установлены закономерности структурно-фазовых превращений, сопровождающихся перераспределением избыточных легирующих элементов в объеме титановых заготовок; получены экспериментальные результаты по оценке кратковременных механических и эксплуатационных свойств исследованных сплавов; даны рекомендации по разработке технологического процесса при штамповке заготовок из сплава ВТ20, позволяющего получить изделие с заданным и стабильным комплексом свойств и с регламентированной структурой металла.

**Практическая значимость работы** заключается в том, что:

- Проведенные исследования позволили предложить рациональные режимы термомеханической обработки материала титановых лопаток паровых турбин, путем создания регламентированной структуры с заданными и стабильными механическими свойствами на основании комплексных исследований температурно-временных особенностей формирования и распада неравновесных твердых растворов, имеющей важное народно-хозяйственное значение.
- Результаты работы были использованы на предприятиях ОАО “ЛМЗ”, ООО “Орис - ММ”, ОАО «Красный октябрь».
- Результаты работы нашли отражение в разработке методических указаний и учебного пособия в рамках проводимых лабораторных работ по дисциплине «Физика технологических процессов в машиностроении».
- Экономический эффект от внедрения результатов работы составил 350 тыс. руб.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

- Разработка кристаллогеометрической модели высокотемпературного вакансионно - пересыщенного состояния ОЦК - твёрдого раствора, формирующегося в результате полиморфного превращения при нагреве титановых сплавов.
- Закономерности структурных и фазовых превращений в объёме титановых лопаток паровых турбин, после различных технологических режимов их изготовления;
- Закономерности распределения избыточных легирующих элементов отдельно в  $\alpha$ - и  $\beta$ - фазах после различных технологических режимов изготовления лопаток;
- Проведение механических испытаний. Установление корреляций между структурно-химическими параметрами и комплексом механических и служебных свойств исследованных сплавов.

**Достоверность результатов** обеспечивается использованием фундаментальных положений физики твёрдого тела, большим объемом экспериментов, выполненных с привлечением современных методов исследования (стандартных и специально разработанных).

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы и результаты исследований докладывались и обсуждались на 7 научно-технических конференциях и семинарах, в том числе на: XVII Международной конференции «Физика прочности и пластичности материалов», СГТУ, Самара, 2009; XIX «Петербургских чтениях по проблемам прочности», Санкт-Петербург, 2010; IX Международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности», Санкт-Петербург, 2010; The 12<sup>th</sup> World Conference on Titanium, Beijing, China, 2011; The World Conference Friction, Wear and Wear Protection, Aachen, German, 2011; XLI Неделя науки СПбГПУ, 2012; 3-я Международная научно-практическая конференция «Современное машиностроение. Наука и образование», Санкт-Петербург, 2013; на научно-технических семинарах кафедры «Машиноведение и основы конструирования» СПбГПУ 2009-2013 г.г.

**Публикации.** Основное содержание работы отражено в 14 печатных работах, в том числе в 1 патенте. 4 работы опубликованы в рецензируемом научном журнале, рекомендованном ВАК. Библиографический список основных работ приведён в конце автореферата.

Диссертационная работа была выполнена автором в рамках целевой программы "Развитие научного потенциала высшей школы" на тему «Повышение каплеударной эрозионной стойкости титановых лопаток паровых турбин атомных электростанций, как результат понимания и контроля структурно-фазовых превращений протекающих в материале зоны динамического контактного взаимодействия» № 2.1.2/1147 (2009-2011 гг.) (н.р. проф. М.А. Скотникова).

За выступление с докладом на XLI Неделе науки в СПбГПУ, 2012 г., автор награждена дипломом 1 степени за высокие достижения в научно-исследовательской работе.

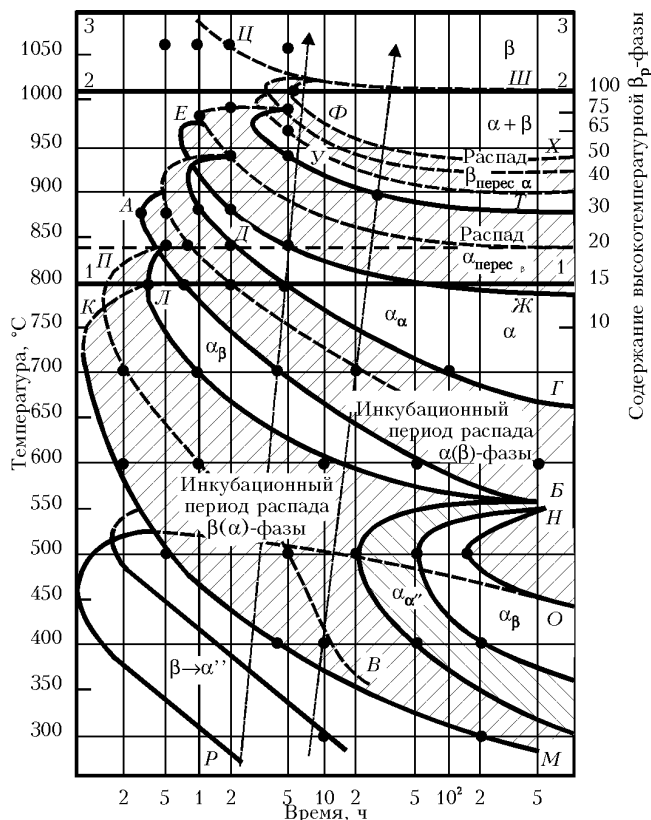
**Структура и объем работы** Работа состоит из введения, 5 глав, общих выводов, списка литературы из 132 наименований и приложений, изложена на 205 страницах, включая: 34 - таблицы, 92 рисунка.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулирована цель исследования, поставлены основные задачи. Показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов, даны сведения об апробации работы.

**В первой главе** приведён обзор теоретических и экспериментальных результатов работ, посвящённых исследованию особенностей каплеударной эрозии лопаток паровых турбин. Проведён анализ состояния вопроса, о закономерностях структурных и фазовых превращений, сопровождающихся перераспределением легирующих элементов в деформированных титановых заготовках.

**Во второй главе** сделано обоснование выбора материалов и методов исследования: оптической металлографии, просвечивающей и растровой электронной микроскопии, рентгеноструктурного, микрорентгеноспектрального анализа, испытания на микротвердость. Механические испытания были выполнены как при комнатной так и при высоких температурах. Материалом для исследования явились как готовые лопатки паровых турбин, так и их штампованные заготовки после различных режи-



**Рис. 1.** Кинетическая диаграмма структурных и фазовых превращений в сплавах титана в зависимости от температуры нагрева абсолютной ( $T$ ) и приведенной к одинаковому содержанию высокотемпературной  $\beta$ - фазы ( $T_\beta$ ).

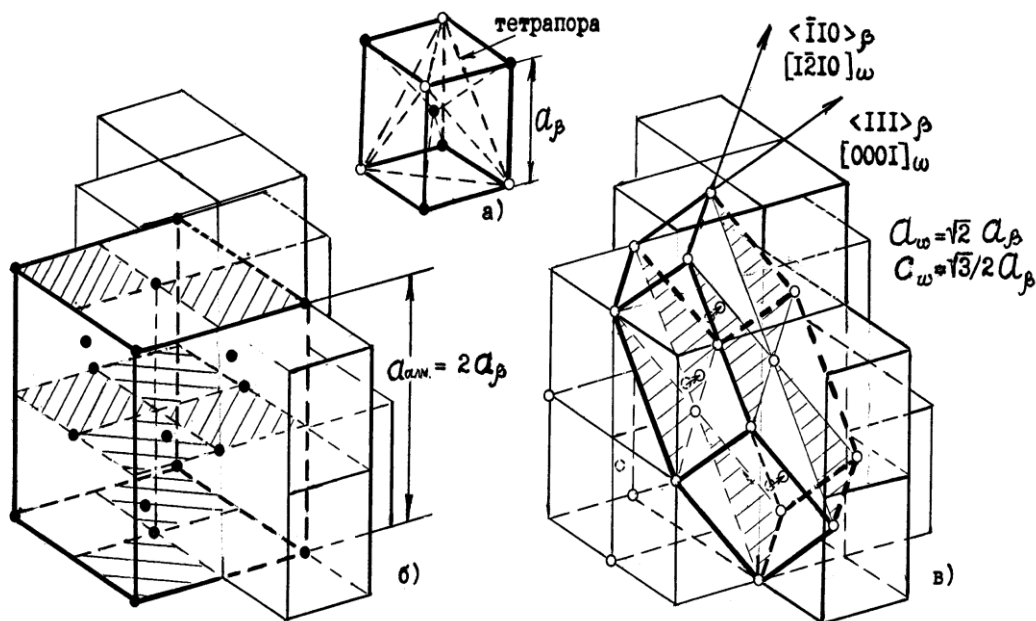
**В третьей главе** проведено теоретическое и экспериментальное исследование высокотемпературного распада вакансионно - пересыщенных ОЦК - твёрдых растворов при полиморфном  $\alpha \leftrightarrow \beta$  превращении лопаточных сплавов титана.

Как показывают расчеты, при температуре  $882^\circ\text{C}$  полиморфного  $\alpha_p \rightarrow \beta_p$ - превращения в равновесном состоянии, концентрация вакансий в ГПУ-  $\text{Ti}$  на 8 порядков больше чем в ОЦК-  $\text{Ti}$ . Поэтому, в работе развивается представление о том, что во время  $\alpha_p \rightarrow \beta_p$ - превращения, высокотемпературная ОЦК- фаза, образуясь по *сдвиговому* механизму и наследуя дефекты низкотемпературной  $\alpha$ - модификации, оказывается вакансионно - пересыщенным и упорядоченным  $\beta$ - твердым раствором ( $\beta_{\text{перес.}}$ ). Его пространственная кристаллическая решетка состоит из 8 элементарных ОЦК- ячеек с тетравакансиями **рис.2,а**. Полное завершение полиморфного превращения и переход  $\beta_{\text{перес.}}$  в равновесное состояние ( $\beta_{\text{перес.}} \rightarrow \beta_p$ ), протекает по *диффузионному* многостадийному механизму распада: на **1 стадии** возникает *микрорасслоение* (образование двух зон - обогащенной и обедненной вакансиями); на **2 стадии** внутри этих зон, соответственно, появляются две, когерентные с металлической матрицей, кристаллические подрешетки предвыделений, вставленные одна в другую: *металлическая*, **рис. 2.б**, образующая решетку алмаза (кристаллогеометрически упрочненное состояние), с параметром  $a_{\text{алмаз}} = 2a_\beta$  (равным удвоенному параметру ОЦК- решетки) и *вакансионная*, **рис. 2.в**, с гексагональной  $\omega$ - решеткой (хрупкое  $\omega$ - состояние), с параметрами  $a_\omega = \sqrt{2} \cdot a_\beta$ ,  $c_\omega = \sqrt{3}/2 \cdot a_\beta$ .

мов термомеханической обработки из титановых сплавов ВТ20, ВТ6, ВТ3-1 с пластинчатой и глобулярно - пластинчатой структурой.

На основании ранее разработанной обобщенной кинетической диаграммы структурных и фазовых превращений в деформированных титановых сплавах в широком температурно-временном интервале, **рис. 1**, была установлена связь структуры и свойств титановых сплавов в зависимости от температуры абсолютной ( $T$ ), и приведенной к одинаковому содержанию высокотемпературной  $\beta$ - фазы ( $T_\beta$ ).

Установлено, что чем больше неравновесные  $\beta(\beta)$ - и  $\alpha(\alpha)$ - твердые растворы содержали одноименных им  $\beta$ - и  $\alpha$ - легирующих элементов, тем они более устойчивы, а их многостадийный распад, происходил при более низких температурах, и за большее время.



**Рис. 2.** Вакансионно-пересыщенная и упорядоченная ОЦК– решетка (а), как суперпозиция двух кристаллических подрешеток вставленных одна в другую: металлической (б), образующей решетку алмаза и вакансионной (в) с  $\omega$ -решеткой

Далее на **3 стадии** под действием внутренних напряжений происходит перераспределение на вакантные места дислоцированных атомов основы, то есть “схлопывание” (рекомбинация) металлической и вакансионной подрешеток и обособление равновесной  $\beta_p$  – фазы. Если в высокотемпературной ОЦК – модификации титана, пересыщенной вакансиями ( $\beta_{перес}$ ) присутствуют избыточные  $\alpha$ - стабилизирующие легирующие элементы, то на 3 стадии произойдет релаксационное их перераспределение в вакансионную гексагональную подрешетку и в результате «схлопывания» сформируются и обособятся две высокотемпературные равновесные  $\beta$ - и  $\alpha$ - фазы ( $\alpha_p \rightarrow \beta_{перес} \rightarrow \alpha + \beta$ ). Завершением 3 стадии  $\alpha_p \rightarrow \beta_{перес} \rightarrow \beta_p$  является формирование равновесного  $\beta_p$ - твердого раствора в результате гомогенного распределения атомов и вакансий в уже обособленной ОЦК– решетке.

Вероятно, пересыщенный вакансиями ОЦК– твердый раствор будет иметь наибольший объем (“распухание”) в конце 1 стадии, когда в нем, в результате микро-расслоения сформируются микрообъемы пересыщенные вакансиями, и наименьший объем в начале 3 стадии после «схлопывания» двух подрешеток под действием внутренних напряжений.

Экспериментальное подтверждение перехода титана и его сплавов в вакансионно - пересыщенное состояние вблизи точки полиморфного превращения, было выполнено с привлечением термического анализа, дилатометрии **рис.3.а**, микрокалориметрии **рис.3.б**, высокотемпературной металлографии, высокотемпературных механических испытаний **рис.4**. Действительно, как показали результаты, в титане и его сплавах, при нагреве и переходе через точку начала полиморфного превращения, возникает аномальное пересыщение вакансиями их ОЦК - модификации.

Фаза-  $\beta_{перес}$  зародившись из  $\alpha$ - фазы по сдвиговому механизму и оказавшись в условиях сильного вакансионного пересыщения, претерпевает “распухание”, уменьшающее разность удельных объемов фаз (объемную дилатацию) в точке полиморфного превращения, **рис.3**, которая составляет только 0,17%. Нагрев такого



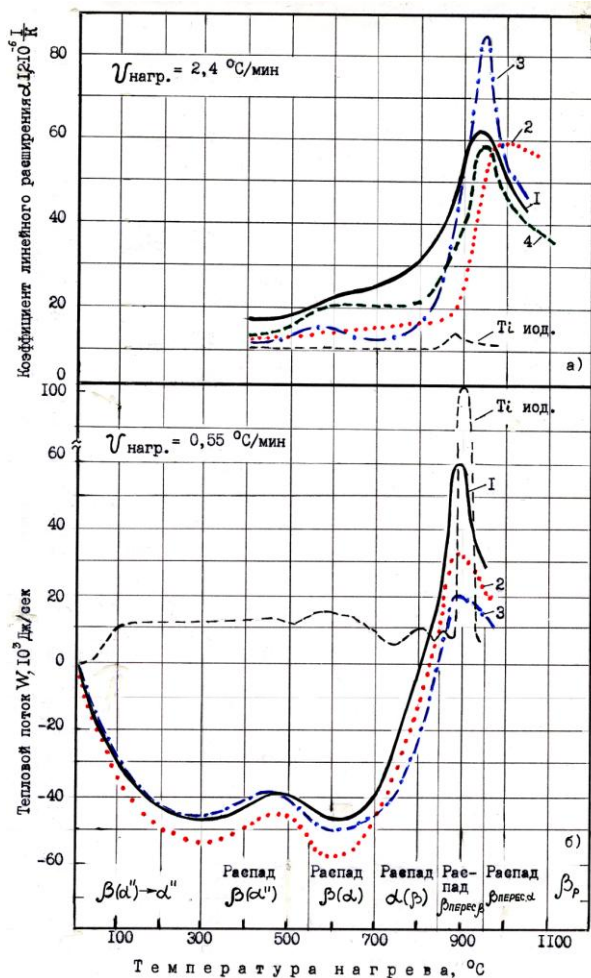


Рис.3. Дилатометрические (а) и микрокалориметрические (б) кривые исследованных титановых сплавов

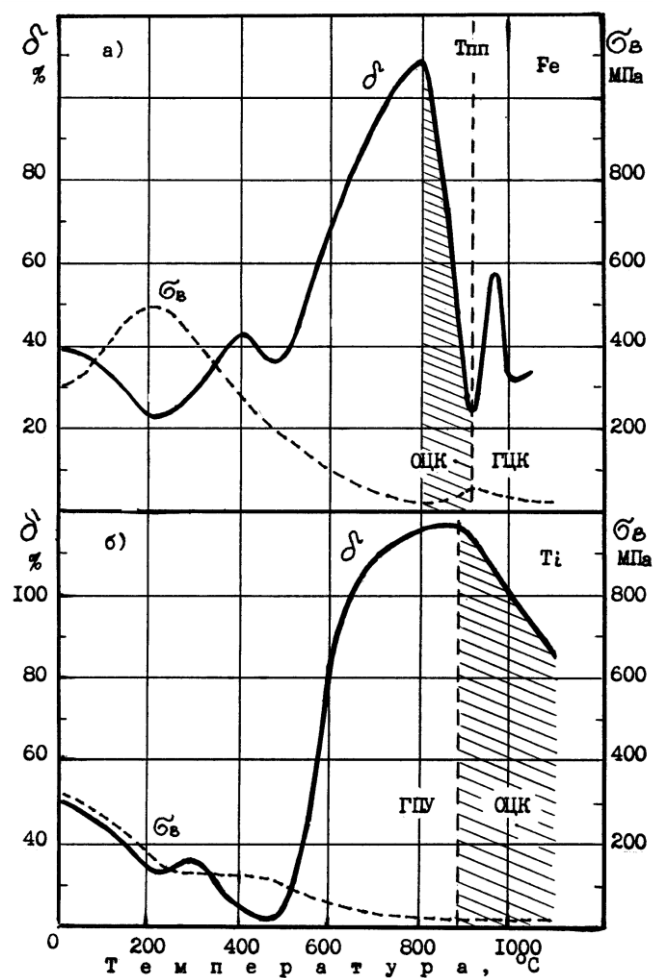


Рис.4. Температурные зависимости относительного удлинения и предела прочности железа (а) и титана (б).

$\beta_{\text{перес.}}$  - твердого раствора не сопровождается фазовым наклепом, что объясняет трудность измельчения зерна титана и его сплавов при нагреве путем фазовой перекристаллизации.

Как видно из **рис.4**, во время высокотемпературных механических испытаний чистых металлов железа и титана, с увеличением температуры нагрева, наблюдали их кристаллогеометрическое упрочнение (повышение прочности и снижение пластичности), когда они находились в вакансионно - пересыщенном ОЦК- состоянии вблизи точки полиморфного превращения.

**В четвёртой главе** представлены результаты исследования структурно-фазовых превращений и перераспределения легирующих элементов после нагрева и воздушного охлаждения из температурно-временной области распада вакансионно - пересыщенных ОЦК - твёрдых растворов в горячедеформированных сплавах титана VT20 и VT6 с *пластинчатой* структурой.

В работе выдвигается представление о том, что в процессе технологической обработки, аккумуляция внешней энергии системой атомов основы и легирующими элементами, вызывает их смещение из своих равновесных положений (узлов кристаллической решетки), что создает в объеме деформированного полуфабриката сложное упруго-напряженное поле на всех структурных уровнях. Образующиеся

при этом дислоцированные (смещенные) атомы и вакансии являются носителями избыточной энергии и способствуют повышению предела растворимости фаз.

Деформация в двухфазной области и последующее ускоренное охлаждение приводят к формированию сразу двух неравновесных  $\alpha(\beta)$ - и  $\beta(\alpha)$ - твердых растворов, пересыщенных вакансиями и разноименными им стабилизирующими легирующими элементами. Такие растворы, находясь в упруго-напряженном состоянии стремятся к распаду. При последующем нагреве, происходит выделение избыточной энергии и снятие внутренних напряжений. Для своей самоорганизации и перехода к относительному равновесию, система реализует два релаксационных механизма: структурный и концентрационный. *Структурная релаксация* проявляется в направленных атомно-кристаллических сдвигах дислоцированных (смещенных) атомов основного металла и реализуется в виде структурных превращений (отдыха, полигонизации, рекристаллизации). *Концентрационная релаксация* проявляется в атомно-кристаллических сдвигах атомов другого сорта: вакансий, примесных и легирующих атомов и реализуется в виде фазовых превращений (изменения химического состава и типа кристаллической решётки).

В данной работе автор придерживается мнения, что наиболее точной температурной характеристикой, отражающей закономерности структурно-фазовых превращений и изменения свойств сплавов титана, является температура не абсолютная ( $T$ ), а приведенная к одинаковой объемной доле высокотемпературной  $\beta$ - фазы ( $T_\beta$ ).

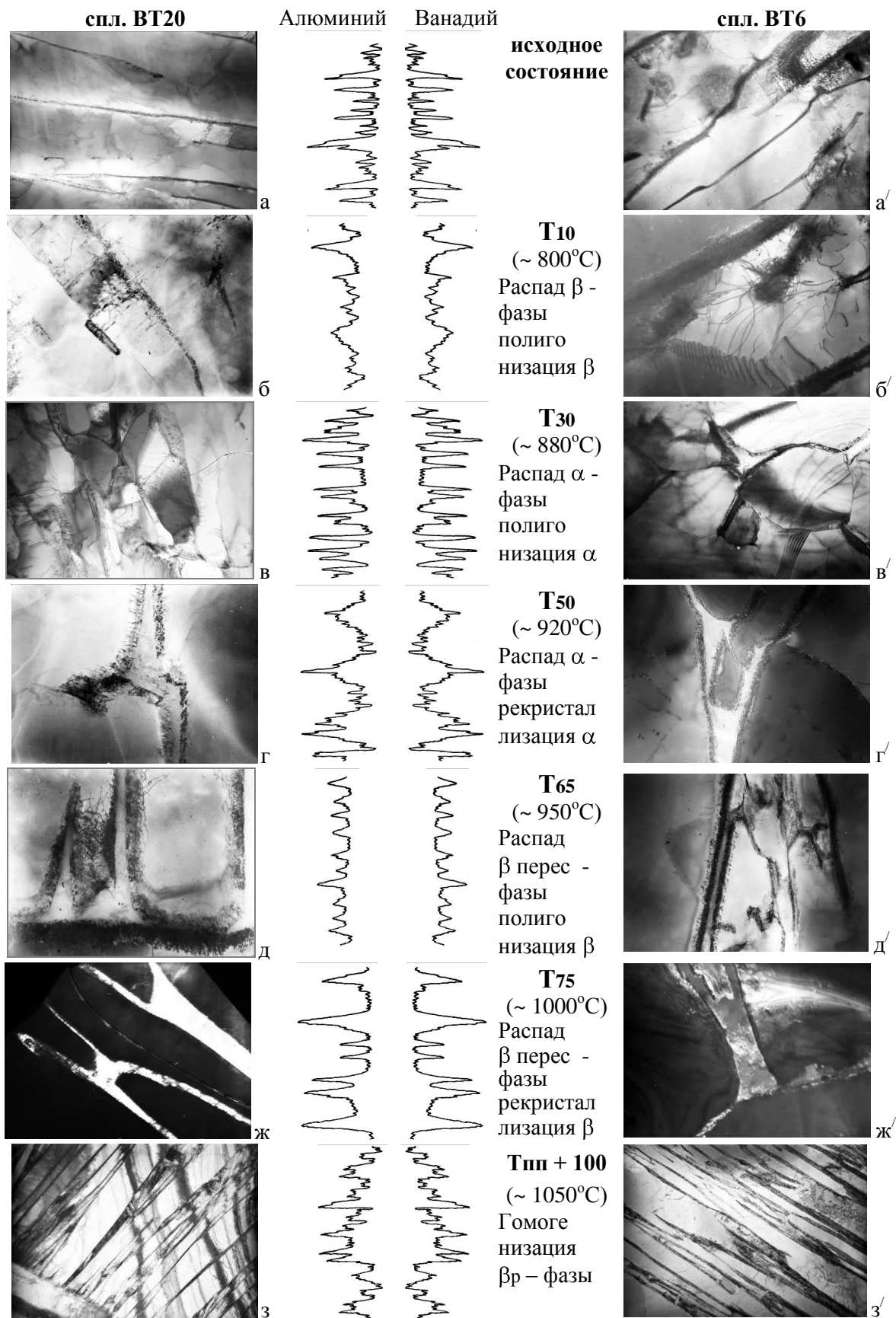
Поэтому методом отжига с последующей закалкой были выполнены количественные оценки содержания высокотемпературной  $\beta$ - фазы в зависимости от различных температур закалки в материалах прутков турбинной лопатки из сплавов ВТ20 и ВТ6. В исследованных сплавах содержание высокотемпературной  $\beta$ - фазы экспоненциально возрастало с увеличением температуры нагрева. После приведения всех экспериментальных результатов к одинаковой доле высокотемпературной  $\beta$ - фазы, были установлены соответствующие приведённые температуры нагрева ( $T_\beta$ ).

С помощью просвечивающей электронной микроскопии, микрорентгеноспектрального анализа и механических испытаний, на примере сплавов ВТ20 и ВТ6 с пластинчатой структурой, **рис.5**, были установлены закономерности изменения структурно-фазовых превращений, перераспределения легирующих элементов и изменение механических свойств в зависимости от температуры нагрева, приведенной к одинаковому содержанию высокотемпературной  $\beta$ - фазы ( $T_\beta$ ).

Оказалось, что при температурах  $T_{10}$ ,  $T_{30}$ ,  $T_{65}$ , распад неравновесных, соответственно,  $\beta(\alpha)$ -,  $\alpha(\beta)$ -,  $\beta_{\text{перес}\beta}$ - твердых растворов происходил с максимальной скоростью, так как фазовые превращения протекали одновременно со структурными превращениями по механизму *полигонизации*.

При температурах  $T_{20}$ ,  $T_{50}$ ,  $T_{75}$  распаду, соответственно,  $\beta(\alpha)$ -,  $\alpha(\beta)$ -,  $\beta_{\text{перес}\beta}$ - твердых растворов предшествовали структурные превращения по механизму непрерывной *рекристаллизации*, вызывая округление и увеличение размера частиц.

Показано, что высокими технологическими свойствами титановые заготовки обладают после нагрева и воздушного охлаждения из температурно-временного интервала двухфазной ( $\alpha+\beta$ )- области ( $T_{50}$ ,  $T_{65}$ ,  $T_{75}$ ) при температурах содержания высокотемпературной  $\beta$ - фазы 50, 65 и 75%, соответственно.



**Рис.5.** Электронно-микроскопические изображения и распределение основных легирующих элементов (AL, V) в сплавах ВТ20, ВТ6 с пластинчатой ( $\alpha + \beta$ )- структурой в исходном состоянии (а, а') и после охлаждения от приведённых температур: **T10** (полигонизация  $\beta$ - фазы) (б, б'); **T30** (полигонизация  $\alpha$ - фазы) (в, в'); **T50** (рекристаллизация  $\alpha$ - фазы) (г, г'); **T65** (полигонизация  $\beta$ - перес.) (д, д'); **T75** (рекристаллизация  $\beta$ - перес.) (ж, ж'); **T100** (после охлаждения из  $\beta$ - области) (з, з').

Нагрев и воздушное охлаждение заготовок из температурно-временного интервала, соответствующего приведённой температуре **T65**, приводили к распаду, находящихся в вакансионно - пересыщенном ОЦК- состоянии  $\beta_{\text{перес}}$  - твердых растворов. Фазовые превращения протекали одновременно со структурными превращениями по механизму *полигонизации*, **рис. 5 д, д'**. На стадии *микрорасслоения* происходило *равномерное внутризёрное* перераспределение избыточных легирующих элементов вдоль дислокационных границ субзёрен, вызывая изменение их химического и фазового состава. Наблюдалось повышение прочности материала за счет упрочнения дислокационными границами и сохранение вязко - пластических свойств за счет относительно равномерного распределение легирующих элементов в структуре.

Нагрев и воздушное охлаждение заготовок из сплавов ВТ20 и ВТ6 из температурно-временных интервалов, соответствующих приведённым температурам **T50** и **T75**, приводили к задержке распада неравновесных  $\alpha$ - и  $\beta_{\text{перес}}$ , твердых растворов, так как распаду предшествовали структурные превращениями по механизму *непрерывной рекристаллизации*, соответственно,  $\alpha$ - фазы, **рис. 5 г, г'** и  $\beta_{\text{перес}}$ - фазы, **рис.5, ж, ж'**. Избыточные вакансии и легирующие элементы распадающихся фаз (по механизму восходящей диффузии) интенсивно перераспределялись на границы раздела рекристаллизованных зёрен или в пределы фаз, не подвергнутых рекристаллизации, приводя к возрастанию их концентрационной неоднородности и к появлению крупных частиц (концентраторов) остаточной  $\beta$ - фазы. При этом отмечали снижение прочностных и вязко-пластических характеристик.

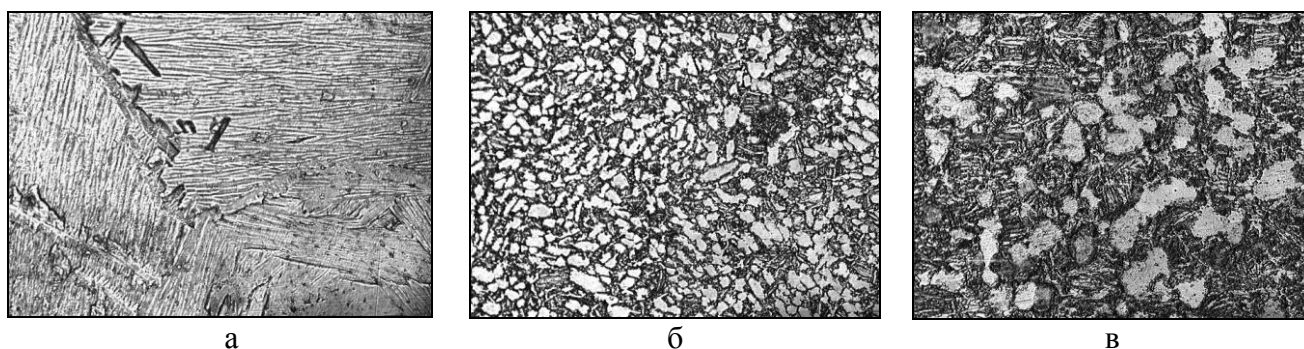
Таким образом, в работе установлено, что нестабильность результатов механических испытаний, а также снижение вязко-пластических свойств в горячедеформированных титановых заготовках, особенно больших толщин, обусловлены многообразием развивающихся в них структурных и фазовых превращений в соответствующих температурно-временных интервалах. Термодинамическим стимулом для формирования пересыщенных твердых растворов являются внутренние напряжения, возникающие в объеме деформированных полуфабрикатах на всех структурных уровнях под влиянием термического и механического воздействия. В работе предложен научно-обоснованный принцип создания более совершенной технологии металлургического передела титановых сплавов на основе установленных закономерностей структурных и фазовых превращений. В качестве путей создания регламентированной структуры металла лопаток с заданным и стабильным комплексом свойств, предлагается выбор оптимального режима окончательной температуры нагрева и деформирования вблизи **T65**.

**В пятой главе** представлены результаты исследования структурно-фазовых превращений и перераспределения легирующих элементов в материалах промышленных титановых лопаток из сплавов ВТ20 и ВТ6 с *глобулярно - пластинчатой* структурой после окончательной штамповки вблизи приведённых температур **T50**, **T65** и **T75**. Рассмотрен вопрос о возможности научно-обоснованного выбора температуры окончательной штамповки лопаток, как результат понимания структурно - фазовых превращений в деформированных титановых сплавах.

Известно, что ковка титановых прутковых полуфабрикатов в  $\beta$  - области не подходит для изготовления крупногабаритных лопаток, так как образующаяся при

этом *пластинчатая* структура, **рис. 6 а**, имеет низкую ударную вязкость (см. **табл. 1**) и большой разброс свойств. Всесторонняя ковка в двухфазной  $\alpha + \beta$  - области, напротив, обеспечивает получение *равноосной* структуры, **рис. 6 б**, которая имеет несколько меньшую прочность, но большую пластичность и ударную вязкость.

Принципиально новым шагом в развитии производства крупногабаритных лопаток турбин из сплавов титана явилось создание, так называемой «бимодальной» то есть, глобулярно – пластинчатой структуры, **рис. 6 в**, с благоприятным сочетанием служебных свойств и их однородности по длине лопатки. Такая структура формировалась в результате  $\beta$  - закалки слитка, а также окончательной штамповки пруткового полуфабриката после всесторонней ковки в  $\alpha + \beta$  - области со степенью пластической деформации не менее 60%.



**Рис.6.** Микроструктура металла прутков (а, б) и лопатки (в) из сплава ВТ6, (а) - серийная технология ковки в  $\beta$ - области, (б) - технология с всесторонней ковкой в  $\alpha + \beta$ - области, (в) - штамповка заготовки рабочей лопатки.  $\times 500$  (а, в)  $\times 300$  (б)

Как видно из **табл. 1**, деформированный сплав ВТ6 с *пластинчатой* структурой имеет преимущество по прочностным ( $\sigma_B$ ,  $\sigma_{0,2}$ ) и уступает по пластическим свойствам ( $\delta$ ,  $\psi$ ), по сравнению со сплавом ВТ6 с *глобулярной* структурой. В *глобулярной* структуре велика работа зарождения трещины и относительно низка её работа распространения. Поэтому здесь оказываются низкими вязкость разрушения ( $K_{1C}$ ). Формирование *пластинчатой* структуры повышает работу распространения трещины по всей толщине изделия, и тем самым продлевается срок его эксплуатации. Бимодальная *глобулярно – пластинчатая* структура, обеспечивает торможение зарождения и распространения трещин, и является оптимальной.

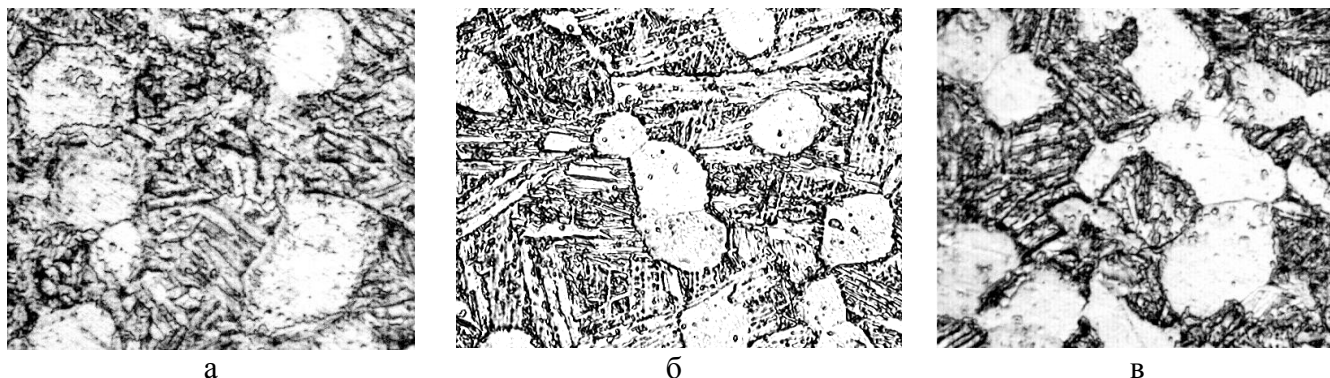
Таблица 1. Механические свойства исследованных штамповок из сплава ВТ6.

Механические свойства	E, МПа	$\sigma_{0,2}$ МПа	$\sigma_B$ МПа	$\delta$ %	$\Psi$ %	KCU Дж/см <sup>2</sup>	$K_{1C}$ МПа· м <sup>1/2</sup>
Тип структуры							
Пластинчатая	119000	850	1040	7	21	40	3550
Глобулярная	107000	830	1000	16	48	47	1800
Бимодальная	114000	908	974	15,5	47	48	2430

С помощью просвечивающей электронной микроскопии, микрорентгеноспектрального анализа и механических испытаний, на примере материалов промышленных рабочих лопаток турбин из сплавов ВТ20 и ВТ6 с *глобулярно-пластинчатой* структурой, **рис.7**, **рис.8**, были установлены закономерности изменения структурно-

фазовых превращений, перераспределения легирующих элементов и изменение механических свойств в зависимости от температуры окончательной штамповки в  $\alpha+\beta$ - области вблизи приведенных температур  $T_{50}$ ,  $T_{65}$  и  $T_{75}$ , при абсолютных температурах  $\sim 925^{\circ}\text{C}$ ,  $\sim 945^{\circ}\text{C}$  и  $\sim 955^{\circ}\text{C}$ , соответственно.

Как показали результаты, во всех случаях  $\alpha$  - фаза имела как форму *глобул* ( $\alpha_I$ ) размером 11 - 21 мкм, так и форму вытянутых *пластин* ( $\alpha_{II}$ ) шириной 1 - 3 мкм, разделенных прослойками  $\beta_{II}$  - фазы шириной 0,1-1 мкм. Расстояние между *глобулами* составляло в среднем 16 - 31 мкм, в которых доля *пластинчатой* ( $\alpha_{II} + \beta_{II}$ ) - структуры (55 - 76%) преобладала над долей *глобулярной*  $\alpha_I$  - структуры (24 - 45%), **рис. 7**.



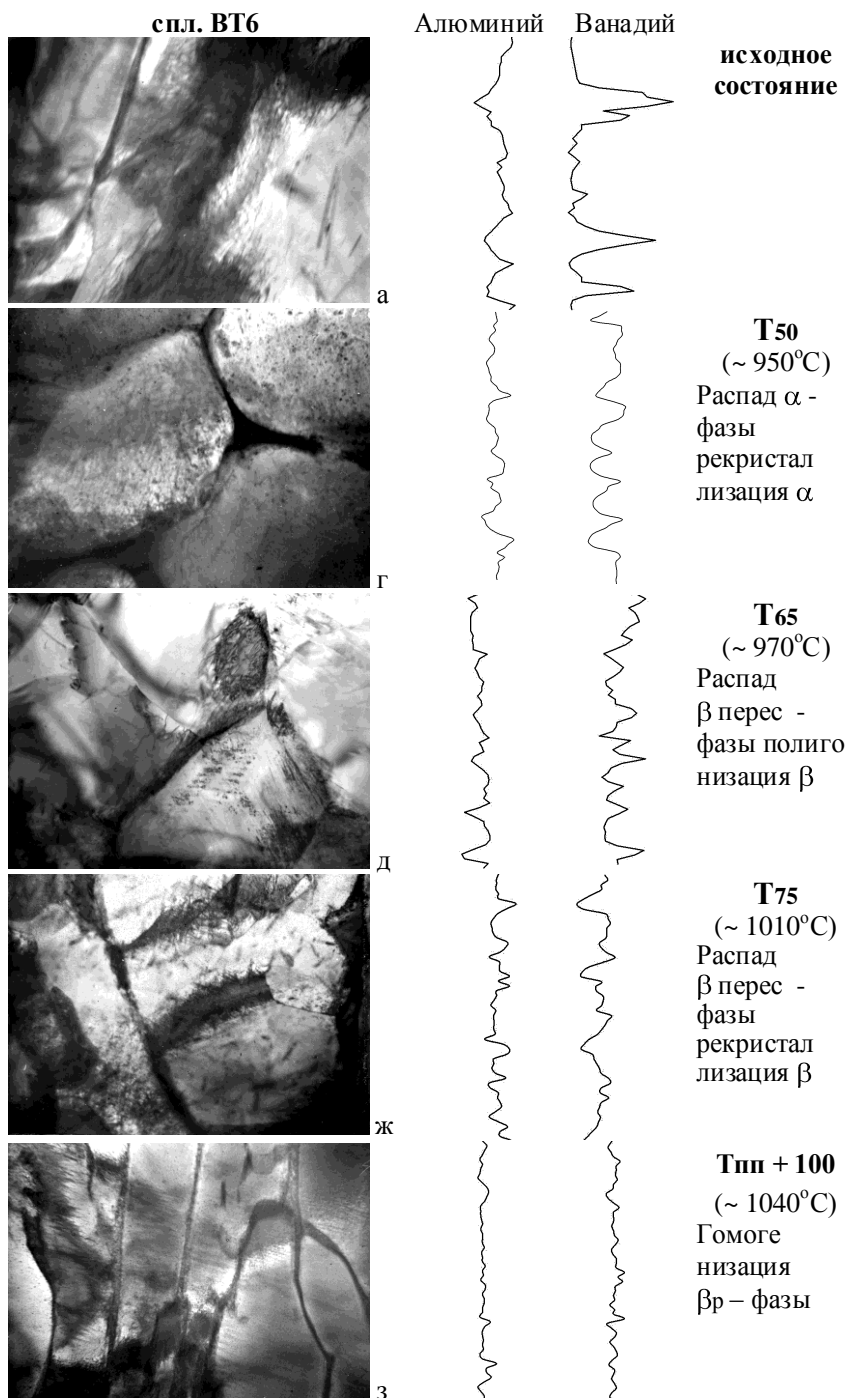
**Рис.7.** Микроструктура металла промышленных заготовок рабочих лопаток турбин из сплава ВТ6 с бимодальной структурой, полученных по трём технологическим схемам, после окончательной деформации штамповкой в  $\alpha+\beta$ - области вблизи приведенных температур  $T_{50}$  (а),  $T_{65}$  (б), и  $T_{75}$  (в), при абсолютных температурах  $\sim 925^{\circ}\text{C}$ ,  $\sim 945^{\circ}\text{C}$  и  $\sim 955^{\circ}\text{C}$ , соответственно.  $\times 1000$

В материалах лопаток из сплава ВТ6 изготовленных по всем 3 технологиям, пластины вторичной  $\alpha_{II}$  - фазы имели химический состав, который приблизительно соответствовал среднему составу сплава Ti-6Al-4V. В глобулах первичной  $\alpha_I$  - фазы, по сравнению с пластинами  $\alpha_{II}$  - фазы, в среднем содержалось ванадия меньше на 2,2 % и алюминия больше на 1,3 % (вес).

Материал лопатки, изготовленный по *второй* технологии ( $T_{65}$ ), по сравнению с *первой* ( $T_{50}$ ), и *третьей* ( $T_{75}$ ), обладал относительно более высокими прочностными свойствами, при сохранении вязко-пластических, **рис. 9**. Микроструктура *второй* лопатки обладала оптимальным сочетанием структурно-химических параметров: самыми широкими пластинами «твёрдой»  $\alpha_{II}$  - фазы и прослойками «мягкой»  $\beta_{II}$  - фазы, обогащенными  $\beta$ - стабилизаторами, в частности ванадием, 3,9 и 8,7 %, соответственно. В то же время в первичных глобулах  $\alpha_I$  - фазы содержалось повышенное количество  $\alpha$ - стабилизаторов, в частности алюминия 7,1%.

Как видно из **табл. 2**, в материале лопаток изготовленных по *второй* технологии ( $T_{65}$ ), по сравнению с *первой* и *третьей*, уровень микротвердости  $\alpha_{II}$  - фазы был наиболее высоким, что подтверждает её упрочнение за счёт дислокационных границ раздела, что вероятно, обеспечивает равнопрочность (близкую микротвердость)  $\alpha_I$  и ( $\alpha_{II} + \beta_{II}$ )- фазовых составляющих материала под нагрузкой и может гарантировать высокую работоспособность материала третьей лопатки.

Как показали электронно-микроскопические исследования, в субструктуре металла лопаток, полученных по *первой* технологии ( $T_{50}$ ), **рис. 8 г**, в стыках рекристал



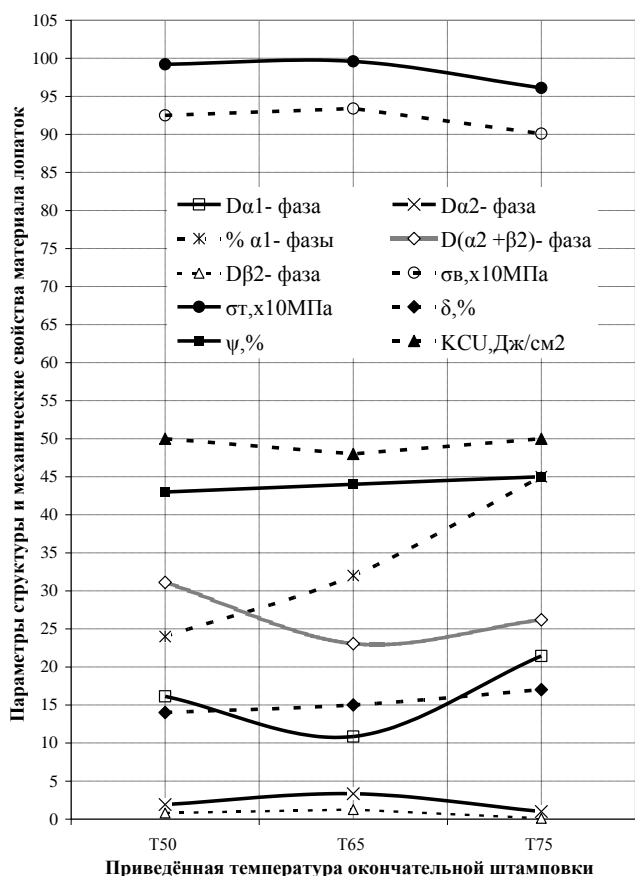
**Рис.8.** Электронно-микроскопические изображения и распределение основных легирующих элементов (AL, V) в сплаве, **BT6** с *глобулярно-пластинчатой* ( $\alpha+\beta$ )- структурой в **исходном** состоянии (а) и после окончательной штамповки от приведённых температур: **T50** (рекристаллизация  $\alpha$ - фазы) (г); **T65** (полигонизация  $\beta$ -перес.) (д); **T75** (рекристаллизация  $\beta$ -перес.) (ж); **T100** (после деформация в  $\beta$ - области) (з).  $\times 24000$

лизованных  $\alpha$ - зёрен наблюдалось возрастание концентрации неоднородности распределения легирующих элементов и появление крупных частиц (концентраторов) остаточной  $\beta$ - фазы, что приводит к снижению прочностных и вязкопластических характеристик.

В субструктуре металла лопаток, полученных по *второй* технологии (**T<sub>65</sub>**), **рис. 8 д**, по сравнению с *третьей* (**T<sub>75</sub>**), **рис. 8 ж**, границы всех фазовых составляющих  $\alpha_1$ ,  $\alpha_{II}$ ,  $\beta_{II}$  были значительно лучше отрелаксированы, за счёт дислокационных подстроек. Было меньше и число изгибных экстинкционных контуров, обычно свидетельствующих о присутствии внутренних напряжений. В теле вторичной  $\alpha_{II}$ - фазы были обнаружены дислокационные границы субзёрен (полигоны), за счёт которых, вероятно, достигался наибольший уровень микротвердости  $\alpha_{II}$ - фазы и прочности материала.

Таким образом, материал лопаток с бимодальной структурой, изготовленный при рекомендованной температуре, соответствующей 65% - му содержанию высокотемпературной  $\beta$ - фазы

(**T<sub>65</sub>**), обладал высокими прочностными свойствами при заданном уровне вязкопластических свойств, а так же регламентированной структурой: прослойками  $\beta_{II}$ - фазы и глобулами первичной  $\alpha_1$ - фазы, обогащенными одноименными  $\beta$ - и  $\alpha$ - стабилизирующими легирующими элементами, соответственно, что обеспечивало большую равнопрочность (близкую микротвердость) структурных составляющих.



**Рис.9.** Изменение структурно-механических свойств в зависимости от технологии изготовления

Таблица 2. Размер частиц, содержание легирующих элементов и микротвёрдость фазовых составляющих металла лопаток из сплава ВТ6, изготовленных по трём технологиям						
Фаза	После первой технологии, (T <sub>50</sub> )		После второй технологии, (T <sub>65</sub> )		После третьей технологии, (T <sub>75</sub> )	
Размер частиц фаз, [мкм]						
$\alpha_I$	16,1		10,9		21,4	
$\alpha_{II}$	1,9		3,3		0,9	
$\beta_{II}$	0,8		1,2		0,1	
$\alpha_{II} + \beta_{II}$	30,5		15,9		25,4	
Концентрация легир.элемент., [вес. %]						
	AL	V	AL	V	AL	V
$\alpha_I$	7,30	1,35	7,06	1,80	6,97	2,04
$\alpha_{II}$	6,01	3,60	5,80	3,91	5,68	4,21
$\beta_{II}$	4,14	9,64	4,55	8,72	4,61	8,28
Микротвёрдость частиц фаз, [МПа]						
$\alpha_I$	3550 ±240		3607±195		3664 ±429	
$\alpha_{II}$	3830 ±241		4156±200		4091 ±232	
$\beta_{II}$	2584 расчет		2794 расчет		2900 расчет	
$\alpha_{II} + \beta_{II}$	2999 ±248		3225±190		3120 ±351	

Известно, что при циклических нагрузках твердые пластины вторичной  $\alpha_{II}$  – фазы оконтуровываемые относительно мягкими прослойками  $\beta_{II}$  – фазы и равнопрочные глобулы  $\alpha_I$  – фазы, затрудняют преждевременную локализацию пластической деформации и зарождение трещины в отдельных фазах. А на стадии распространения, трещине труднее увеличивать свою длину в ( $\alpha_{II} + \beta_{II}$ ) – пластинчатой структуре, так как она все время тормозится мягкими прослойками  $\beta_{II}$  – фазы и вынуждена изменять свою траекторию, огибая глобулярные частицы  $\alpha_I$  – фазы. При этом эксплуатационные свойства материала изделия повышаются.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

**1.** Разработана кристаллогеометрическая модель высокотемпературных вакансионно - пересыщенных состояний ОЦК – твёрдых растворов, формирующихся в результате полиморфного  $\alpha \leftrightarrow \beta$  превращения сплавов титана.

Установлена причина затруднённости измельчения зерен при нагреве полиморфного титана и его сплавов путем фазовой перекристаллизации. Причина заключается в температурно-временном вакансионном пересыщении и “распухании” высокотемпературной  $\beta$ – фазы, позволяющих при нагреве *сохранить* сокращающийся в точке полиморфного превращения удельный объем элементарной ОЦК–ячейки, который снижается только на 0,17%.

**2.** Построены экспоненциальные зависимости между абсолютными температурами нагрева под закалку и результатами количественной оценки содержания высоко-



котемпературной  $\beta$ - фазы, далее, в прутковых материалах лопаток из сплавов ВТ6 и ВТ20 определены температуры приведенные к одинаковому содержанию высокотемпературной  $\beta$  – фазы ( $T_\beta$ ). *Приведенные температуры нагрева* ( $T_\beta$ ), наряду с абсолютными ( $T$ ) позволили выбрать температуру окончательной штамповки лопаток, как результат понимания структурно – фазовых превращений в деформированных титановых сплавах.

**3.** Разработана методика и компьютерная программа для электронно-микроскопической оценки типа и параметров кристаллической решётки дисперсных фаз титановых лопаточных материалов. Получено свидетельство государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013610022 от 09.01.2013.

**4.** Изучены закономерности структурных и фазовых превращений в объёме деформированных полуфабрикатов из сплавов ВТ6 и ВТ20 с *пластинчатой структурой*, сопровождающиеся релаксационным перераспределением избыточных легирующих элементов после нагрева и последующего воздушного охлаждения в широком интервале приведённых температур ( $T_\beta$ ).

**5.** Установлены корреляционные зависимости структурно-химических параметров исследованных сплавов с комплексом механических и служебных свойств, на базе которых разработаны технологические рекомендации по выбору рационального режима окончательной штамповки материала лопаток паровых турбин из сплавов ВТ6 и ВТ20, с регламентированной *глобулярно-пластинчатой* структурой и с заданным и стабильным комплексом механических свойств. Материал лопаток, изготовленный при рекомендованной приведённой температуре ( $T_{65}$ ), соответствующей 65% -му содержанию высокотемпературной  $\beta$ – фазы, обладает относительно более высокими прочностными свойствами при сохранении высоких вязко - пластических свойств. Разработанная технология в условиях завода ОАО «Красный Октябрь» позволила получить экономический эффект 350 тыс. руб., что подтверждено актом.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ:**

**1.** Скотникова, М.А. Высокотемпературный распад твёрдых растворов при полиморфном  $\alpha \leftrightarrow \beta$  превращении деформированных сплавов титана / М.А. Скотникова, Е.В. Миронова, Н.А. Крылов, А.В. Соколов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия Наука и образование. – 2013. - №1. - С. 41-52. (*Журнал из перечня изданий, рекомендованных ВАК*).

**2.** Скотникова, М.А. Влияние микродобавок бора на анизотропию механических свойств плоских заготовок из титановых сплавов / М.А. Скотникова, М.М. Радкевич, Е.В. Миронова, А.В. Соколов // Журнал «МИТОМ» - М. – 2013. - № 10 (100). - С. 29-38. (*Журнал из перечня изданий, рекомендованных ВАК*).

**3.** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013610022 РФ. Микродифракционный фазовый анализ кристаллических веществ / Снетков В.В., Скотникова М.А., Миронова Е.В. – №2012619476; заявл. 06.11.2012; зарег. 09.01.2013 (*Журнал из перечня изданий, рекомендованных ВАК*).

**4.** Миронова, Е.В. Выбор оптимального режима термообработки титанового сплава ВТ20 с применением количественной металлографии и анализа химического со-

става фаз / **Е.В. Миронова** // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия Наука и образование.* – 2013. - №4. - С. 41-45. (*Журнал из перечня изданий, рекомендованных ВАК*).

5. Скотникова, М.А. Выбор оптимального режима термообработки титановых сплавов типа ВТ20 с применением количественной металлографии и анализа химического состава фаз / М.А. Скотникова, В.М. Алексеев, **Е.В. Миронова** // «Физика прочности и пластичности материалов»: Сб. трудов XVII Международная конференция. – Самара: СГТУ, 2009. - С. 85-86.

6. Скотникова, М.А. Напряжённо-деформированное состояние и микрогеометрия поверхности сплава АМЦ после нанесения регулярного микрорельефа. / М.А. Скотникова, Г.В. Цветкова, С.В. Цветков, **Е.В. Миронова** // «Физика прочности и пластичности материалов»: Сб. трудов XVII Международная конференция. – Самара: СГТУ, 2009. - С. 87-88.

7. Скотникова, М.А. Выбор оптимального режима термообработки титановых сплавов с применением количественной металлографии и анализа химического состава фаз / М.А. Скотникова, В.М. Алексеев, **Е.В. Миронова** // Сб. трудов «Петербургские чтения по проблемам прочности». Санкт-Петербург. - 2010.- С. 159-162.

8. Скотникова, М.А. Напряжённо-деформированное состояние и микрогеометрия поверхности деталей после нанесения регулярного микрорельефа. / М.А. Скотникова, Г.В. Цветкова, С.В. Цветков, **Е.В. Миронова** // Сб. трудов «Петербургские чтения по проблемам прочности». Санкт-Петербург. - 2010. - С. 162-165.

9. Скотникова, М.А. Повышение качества поверхности изделий из сплава АМЦ после нанесения регулярного микрорельефа. / М.А. Скотникова, Г.В. Цветкова, С.В. Цветков, **Е.В. Миронова**, А.В. Соколов // Высокие технологии и фундаментальные исследования: Сборник трудов Девятой международной научно-практической конференции: "Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности". Т.1. 09-11 декабря 2010. - СПб. - С. 315-319

10. Margarita A. Skotnikova, Nikolay A. Krylov, Jury I. Mescheryakov, Michael M. Radkevich, Evgenie K. Ivanov, **Ekaterina V. Mironova** Formation of Rotation in Titanium Alloys at Shock Loading // 12- th World Conference on Titanium – 2011. Abstract of the Conference of the Nonferrous Metals Society of China, held in Beijing, China, June 19-24, 2011, p. 797-800.

11. M.Skotnikova, G.Tsvetkova, N.Krylov, E.Ivanov, S.Funikov, **E.Mironova** Wearproof structural and phase status of the surface of preparation of steel 45 after Plasma spraying // World Conference Friction, Wear and Wear Protection. Abstracts of the Conference of the Deutsche Gesellschaft & Materialkunde (DGM), German, held in Aachen, October 26-28, 2011, p.46.

12. Margarita A. Skotnikova, Nikolay A. Krylov, Jury I. Mescheryakov, Michael M. Radkevich, Evgenie K. Ivanov, **Ekaterina V. Mironova** Formation of Rotation in Titanium Alloys at Shock Loading // 12- th World Conference on Titanium – 2011. Proceedings of the Conference of the Nonferrous Metals Society of China, held in Beijing, China, June 19-24, 2011, p. 540-543.

13. **Миронова, Е.В.** Выбор оптимального режима термообработки титановых сплавов типа ВТ20 с применением количественной металлографии и анализа химического состава фаз. / **Е.В. Миронова** // XLI Неделя науки СПбГПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. Ч.IV. – СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2012. – С. 140-142.

14. М.А. Skotnikova, **E.V. Mironova**, А.А. Lanina, N.A. Krylov, E.V. Homchenko. Structural and Phase Transformation in material of Blades of Steam Turbines from titanium Alloy after Technological Treatment. Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы Междунар. науч.-практ. конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – С. 256–264.