

На правах рукописи



СТЕПАНОВА Екатерина Николаевна

**ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ ВОДОРОДОМ НА ЗАКОНОМЕРНОСТИ
ФОРМИРОВАНИЯ СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ
И РАЗВИТИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ
В СПЛАВЕ Ti-6Al-4V**

Специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2010

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук
Институте физики прочности и материаловедения СО РАН
и ГОУ ВПО «Томский политехнический университет»

Научные руководители: доктор физико-математических наук,
профессор **Чернов Иван Петрович**

доктор физико-математических наук
Грабовецкая Галина Петровна

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор **Дударев Евгений Федорович**

доктор технических наук,
профессор **Ремнев Геннадий Ефимович**

Ведущая организация: Национальный исследовательский ядерный
университет «Московский инженерно-
физический институт»

Защита диссертации состоится «26» февраля 2010 г. в 16⁰⁰ часов на заседании
диссертационного совета Д 003.038.01 при ИФПМ СО РАН по адресу: 643021,
г. Томск, пр. Академический, 2/4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФПМ СО РАН.

Автореферат разослан: «25» января 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, профессор



О.В. Сизова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Двухфазные титановые сплавы ($\alpha + \beta$ типа) составляют около 90% используемых в настоящее время в промышленности сплавов титана. Эффективным способом повышения механических свойств титановых сплавов, существенно зависящих от микроструктуры и фазового состава, является измельчение зерна до нано- и субмикронного размера. В настоящее время одним из наиболее перспективных методов измельчения структуры труднодеформируемых титановых сплавов является метод, сочетающий обратимое легирование водородом и горячую пластическую деформацию. Однако, вследствие того, что водород оказывает огромное влияние на фазовый состав титановых сплавов, диффузионную подвижность легирующих элементов замещения и их перераспределение между α и β фазами, наметить и реализовать конкретные пути получения в титановых сплавах ультрамелкозернистых структур с заданными свойствами можно только на основе комплексного исследования эволюции структурно-фазового состояния в процессе формирования структуры. Поэтому такие исследования являются актуальными. Актуальным является также исследование влияния условий дегазации водорода на стабильность структурно-фазового состояния, формируемого при горячей деформации. В настоящее время для дегазации водорода из титановых сплавов используют вакуумный отжиг при температурах 873-973 К, что может приводить к росту нано- и субмикронных зерен. Температуру дегазации водорода можно понизить, используя явление неравновесного выхода водорода из металлических материалов в условиях облучения электронами. Однако, в настоящее время данные о влиянии облучения электронным пучком на стабильность нано- и субмикроструктурного состояний титановых сплавов в литературе отсутствуют.

Водород является примесью, способной в процессе эксплуатации приводить к хрупкости сплавов титана даже в том случае, если его концентрация не превышает предельно допустимого значения. Существуют данные, согласно которым формирование в титановых сплавах мелкозернистой структуры повышает их сопротивление водородному охрупчиванию. В то же время в литературе имеются лишь единичные работы, посвященные исследованию влияния водорода на механические свойства титановых сплавов с нано- и субмикроструктурной структурой. Между тем, перспектива использования титановых сплавов в нано- и субмикроструктурном состоянии в промышленности во многом зависит от их устойчивости к водородной хрупкости, т.к. известно, что поглощение водорода поликристаллическими материалами увеличивается с уменьшением размера зерна.

Целью работы является изучение влияния водорода на структурно-фазовое состояние, деформационное поведение и механические свойства ($\alpha + \beta$) титанового сплава Ti-6Al-4V с субмикроструктурной структурой, полученной с использованием обратимого легирования водородом.

Достижение поставленной цели потребовало решения следующих **задач**:

1. Экспериментальное исследование эволюции структурно-фазового состояния в титановом сплаве Ti-6Al-4V в процессе формирования структуры методом, сочетающим обратимое легирование водородом и горячую пластическую деформацию.
2. Выяснение влияния режимов дегазации водорода отжигом и облучением электронным пучком на фазовый состав и размерные характеристики структуры исследуемого сплава.
3. Изучение взаимосвязи характеристик структуры, деформационного поведения и механических свойств титанового сплава Ti-6Al-4V в субмикросталлическом состоянии.
4. Сравнительные исследования влияния легирования водородом на чувствительность к надрезу и длительную прочность сплава Ti-6Al-4V в субмикросталлическом и крупнозернистом состояниях.

Научная новизна. В диссертационной работе впервые:

- на примере сплава титана Ti-6Al-4V проведено комплексное исследование влияния водорода на эволюцию структурно-фазового состояния в процессе формирования субмикросталлической структуры в ($\alpha + \beta$) титановых сплавах методом, сочетающим обратимое легирование водородом и горячую пластическую деформацию;
- обнаружено, что горячая пластическая деформация при температурах (973 ÷ 1023) К в присутствии водорода инициирует в ($\alpha + \beta$) титановом сплаве Ti-6Al-4V, легированном водородом до концентраций (0,2 ÷ 0,33) мас.%, фазовое превращение $\beta \rightarrow \alpha$, способствующее формированию в сплаве однофазного нанокристаллического состояния;
- показано, что снижение температуры начала роста зерен в легированном водородом нано- и субмикросталлическом сплаве Ti-6Al-4V в условиях облучения электронами связано с уменьшением величины энергии активации собирательной рекристаллизации сплава, контролируемой самодиффузией титана по границам зерен;
- установлено, что, находясь в твердом растворе, водород повышает устойчивость субмикросталлического сплава Ti-6Al-4V к локализации пластической деформации в процессе растяжения при комнатной температуре и снижает при повышенных (873-973 К) температурах.

Практическая значимость. В работе выявлены основные закономерности формирования субмикросталлического состояния в титановом сплаве Ti-6Al-4V посредством метода, сочетающего обратимое легирование водородом и горячее прессование. Результаты этих исследований могут быть использованы при разработке режимов термо-водородной обработки титановых сплавов с целью получения структур с заданными прочностными и/или сверхпластическими свойствами.

Установлено, что метод, сочетающий обратимое легирование водородом и однократное прессование на 80%, позволяет сформировать в сплаве Ti-6Al-4V субмикросталлическое состояние.

Показано, что субмикроструктурная структура, формируемая методом, сочетающим обратимое легирование водородом и горячее прессование, стабильна при отжигах в интервале температур до 873 К. Это дает основание полагать, что субмикроструктурное состояние может быть сохранено и при дальнейших технологических обработках.

На примере сплава Ti-6Al-4V установлено, что формирование в ($\alpha + \beta$) двухфазных титановых сплавах субмикроструктурного состояния приводит к повышению их механических свойств и сопротивления водородной хрупкости при комнатной температуре.

Положения, выносимые на защиту:

1. Особенности формирования субмикроструктурного состояния в сплаве Ti-6Al-4V методом, сочетающим обратимое легирование водородом и горячую пластическую деформацию, заключающиеся в инициировании горячей пластической деформацией фазового превращения $\beta \rightarrow \alpha$ в присутствии водорода и наличии обратного фазового превращения $\alpha \rightarrow \beta$ при дегазации водорода путем отжига в вакууме при температуре 873 К или облучения электронами в интервале температур (523 ÷ 653) К, приводящих к сдвиговым деформациям, способствующим измельчению зерен до субмикронных размеров.
2. Снижение энергии активации и температуры начала собирательной рекристаллизации для нано- и субмикроструктурного сплава Ti-6Al-4V, легированного водородом, при дегазации водорода в условиях облучения электронным пучком по сравнению с отжигом в вакууме.
3. Особенности деформационного поведения субмикроструктурного сплава Ti-6Al-4V, легированного водородом до 0,33 мас.%, по сравнению с нелегированным водородом субмикроструктурным сплавом Ti-6Al-4V, заключающиеся в повышении при комнатной температуре и снижении при повышенных температурах устойчивости к локализации пластической деформации в условиях растяжения.
4. Увеличение концентрации водорода, соответствующей переходу к хрупкому разрушению при комнатной температуре, для легированного водородом сплава Ti-6Al-4V в субмикроструктурном состоянии по сравнению с крупнозернистым состоянием.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались на следующих конференциях и семинарах: V и VI Всероссийских школах-семинарах с международным участием «Новые материалы. Создание, структура, свойства» (Томск, 2005-2006); III, IV и V Международных конференциях студентов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (Томск, 2006-2008); Международной конференции по физической мезомеханике, компьютерному конструированию и разработке новых материалов (Томск, 2006); III, IV и V Всероссийских конференциях молодых ученых «Физика и химия высокоэнергетических систем» (Томск, 2007-2009); VIII и IX Международных научно-технических Уральских школах-семинарах металловедов-молодых ученых (Екатеринбург, 2007-2008); XIII и XIV Международных научно-практических конференциях студентов и молодых ученых «Современные техника и техноло-

гии» (Томск, 2007-2008); Первой Международной научной конференции «Наноструктурные материалы-2008: Беларусь – Россия – Украина (НАНО-2008)» (Минск, 2008); 9th International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows (Tomsk, 2008); Международной школе-семинаре «Многоуровневые подходы в физической мезомеханике. Фундаментальные основы и инженерные приложения» (Томск, 2008); XI Международной конференции «Дислокационная структура и механические свойства металлов и сплавов» (Екатеринбург, 10-14 апреля 2008); IV Международной конференции «Фазовые превращения и прочность кристаллов» (Черноголовка, 4-8 сентября 2006); IV Всероссийской конференции молодых ученых «Материаловедение, технологии и экология в 3-м тысячелетии» (Томск, 19-21 октября 2009).

Публикации. Результаты диссертационной работы опубликованы в 5 статьях в рецензируемых журналах и 15 сборниках трудов и материалов российских и международных конференций. Список публикаций приведен в конце автореферата.

Личный вклад автора в проведение исследований и получение результатов является определяющим. Все результаты, представленные в диссертации, получены либо самим автором, либо при ее непосредственном участии.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения и списка цитируемой литературы. Объем диссертации составляет 157 страниц, включая 58 рисунков, 12 таблиц и список литературы из 151 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении описано современное состояние проблемы, обоснована актуальность диссертационной работы и изложены основные положения, выносимые на защиту.

Первый раздел «Объемные нано- и субмикроструктурные металлы и сплавы» посвящен обзору основных методов получения, деформационного поведения и механических свойств субмикроструктурного состояния в титане и его сплавах.

Во втором разделе «Обратимое легирование водородом как способ модификации микроструктуры титановых сплавов» рассмотрены структурно-фазовые превращения в системе титан – водород и титановый сплав – водород, а также такие явления, как водородофазовый наклеп и пластифицирующее влияние водорода на титан и его сплавы.

Третий раздел «Постановка задачи. Материал и методы исследования».

На основании анализа данных, представленных в обзоре, сформулированы цель и задачи исследования, обоснован выбор материала и обсуждены методики проведения экспериментов.

Для исследования в работе был использован двухфазный ($\alpha + \beta$) титановый сплав Ti-6Al-4V двух составов: марки Е11 и марки ВТ6. Субмикроструктурную структуру в сплаве получали методом, сочетающим легирование водородом и горячую пластическую деформацию путем однократного одноосного

сжатия на 80%. Легирование сплава Ti-6Al-4V водородом до концентраций (0,2 ÷ 0,45) мас.% осуществляли путем отжига в среде водорода в высоковакуумной установке типа Сиверста (РСИМ) при температуре 973 К.

Для дегазации водорода из сплава использовали отжиг образцов в вакууме $5 \cdot 10^{-3}$ Па при температуре 873 К и облучение электронами с энергией (35 ÷ 40) кэВ в вакууме 10^{-4} Па при различных температурах в течение 1 часа. Изучение динамики процессов миграции и выхода водорода под действием ускоренных электронов проводили методом масс-спектрометрии на высоковакуумной установке. Концентрацию водорода в образцах измеряли кулонометрическим методом определения массовой доли водорода и при помощи установки RHEN602 на платформе Windows.

Основные методы исследования структурно-фазового состояния: оптическая металлография, просвечивающая и растровая электронная микроскопия, рентгеноструктурный анализ.

Испытания на растяжение и длительную прочность образцов с различным содержанием водорода были проведены на модернизированной машине ПВ-3012М. Для испытания использовались плоские образцы в виде двойной лопатки с размерами рабочей части $3 \times 1 \times 15$ мм³ с надрезом и без надреза на рабочей части. Глубина надреза 0,7 мм, угол – 50°, радиус закругления надреза 0,25 мм.

Четвертый раздел «Формирование нано- и субмикроструктурной структуры в титановом сплаве Ti-6Al-4V методом, сочетающим обратимое легирование водородом и горячую пластическую деформацию» посвящен изучению эволюции структурно-фазового состояния сплава Ti-6Al-4V в процессе наводороживания, горячей пластической деформации и дегазации посредством отжига в вакууме и облучения электронным пучком.

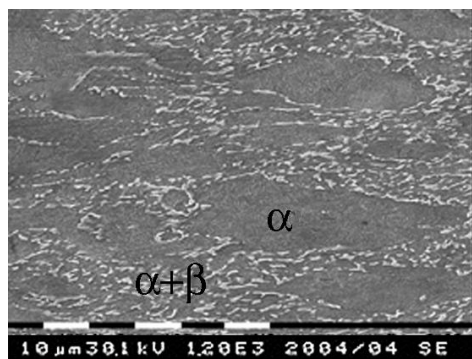


Рис. 1. Микроструктура сплава Ti-6Al-4V в исходном состоянии

В состоянии поставки сплав Ti-6Al-4V имеет неоднородную структуру, состоящую из однофазных областей α фазы размерами 10-40 мкм, окруженных двухфазными (α + β) областями (рис. 1). Согласно данным рентгеноструктурных исследований, объемная доля β фазы в сплаве составляет 11%.

Наводороживающий отжиг при температуре 1073 К, (0,5 ÷ 1) час до концентраций (0,2 ÷ 0,45) мас.% существенно не изменяет структуру сплава. Последующая закалка в воду от 1223 К приводит к формированию в сплаве Ti-6Al-4V-(0,2 ÷ 0,45)H зерен размерами 50-150 мкм, имеющих в объеме типичную для мартенсита структуру: пакеты пластин толщиной от 0,1 до 1 мкм. При нагреве и изотермической выдержке при температуре деформации ($T_d = 1023$ К, 7 мин) в сплаве наблюдается α → β превращение, о чем свидетельствует появление на дифрактограмме сплава рефлекса β фазы (рис. 2, а). Объемная доля β фазы в зависимости от концентрации водорода в сплаве составляет ~8–20%. В процессе горячего прессования в сплаве происходит обрат-

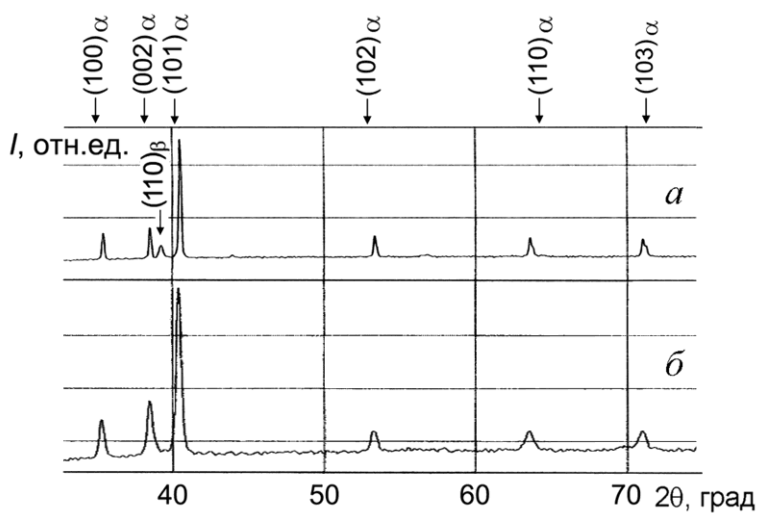


Рис. 2. Участки дифрактограмм образцов сплавов Ti-6Al-4V-(0,2÷0,33)H в различных состояниях: *a* – состояние 1 после легирования водородом, закалки в воду от 1223 К и последующей выдержки при температуре 1023 К; *б* – состояние 1 + прессование при $T = 1023\text{ К}$ на 80% и закалка в воду от 1023 К

Электронно-микроскопические исследования показали, что горячая пластическая деформация прессованием на 80% приводит к формированию в сплавах с содержанием водорода (0,2 ÷ 0,33) мас.% однородной нанокристаллической структуры со средним размером зерен, равным (0,08 ÷ 0,09) мкм (рис. 3).

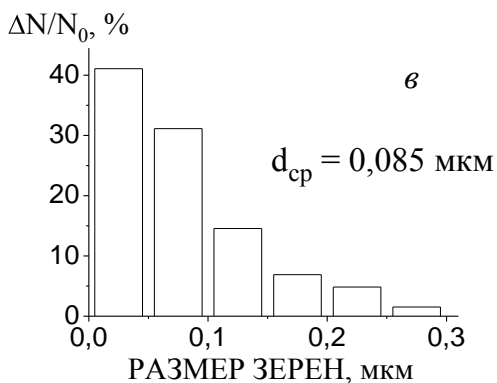
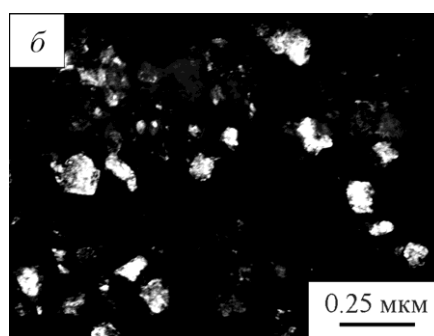
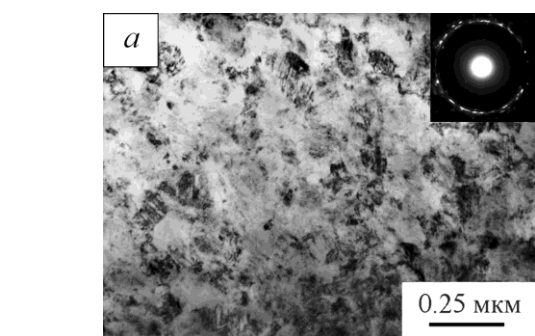


Рис. 3. Электронномикроскопическое изображение структуры (*a*, *б*) и гистограмма распределения зерен по размерам (*в*) сплавов Ti-6Al-4V-(0,2÷0,33)H после деформации прессованием при $T = 1023\text{ К}$ на 80%: *a* – светлопольное изображение; *б* – темнопольное изображение

В сплавах с концентрацией водорода (0,4 ÷ 0,45) мас.% формируется неоднородная структура, в которой, наряду с наноразмерными зернами α фазы, имеются зерна β фазы, достигающие микронных размеров.

Дегазация водорода из сплава с содержанием водорода (0,2 ÷ 0,33) мас.% отжигом в вакууме при температуре 873 К в течение 1 часа приводит к снижению концентрации водорода до значений, меньших 0,005 мас.%, что соответствует техническим стандартам для данного сплава. При этом средний размер зерен в сплаве увеличивается до субмикронного и в зависимости от исходного содержания водорода составляет (0,27 ÷ 0,35) мкм (рис. 4). Рентгеноструктурные исследования показали (рис. 4), что в процессе дегазации водорода отжигом в сплаве происходит превращение $\alpha \rightarrow \beta$. Объемная доля выделившейся β фазы составляет 6–9%.

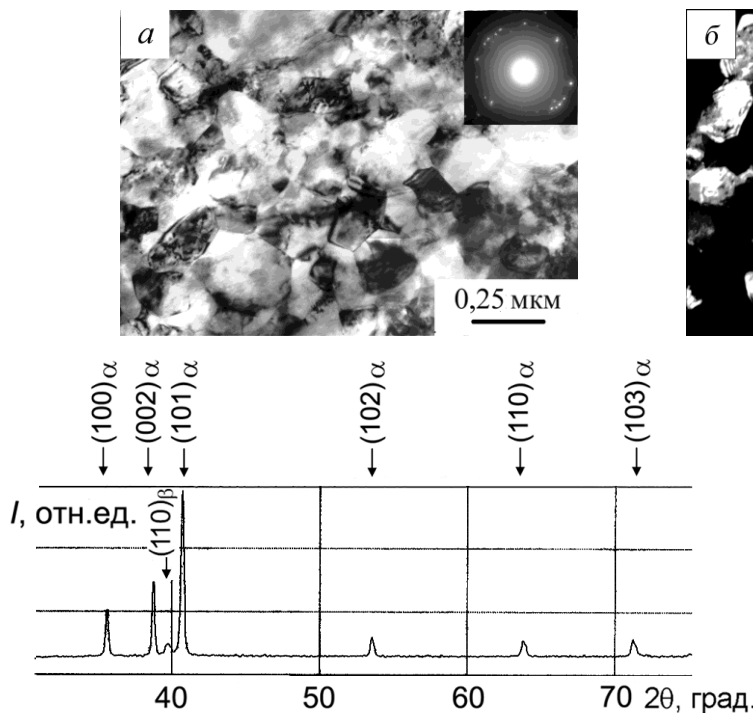


Рис. 4. Электронно-микроскопическое изображение микроструктуры (а, б) и участок дифрактограммы (в) субмикрокристаллического сплава Ti-6Al-4V-0,005H: а – светлпольное изображение; б – темнопольное изображение

Для оценки термической стабильности полученной субмикрокристаллической структуры были проведены часовые отжиги сплава Ti-6Al-4V в интервале температур (773 ÷ 973) К. Анализ температурной зависимости изменения среднего размера зерен субмикрокристаллического сплава Ti-6Al-4V (рис. 5)

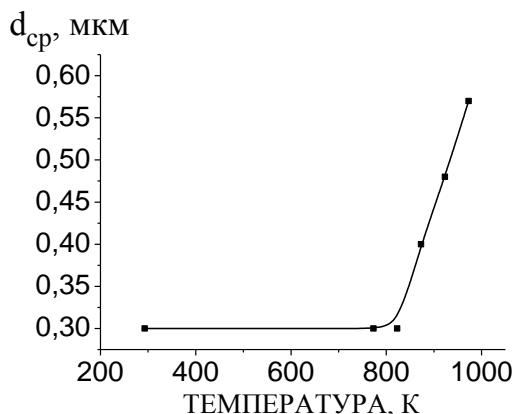


Рис. 5. Температурная зависимость изменения среднего размера зерен субмикрокристаллического сплава Ti-6Al-4V

показал, что полученная субмикрокристаллическая структура стабильна до температуры 823 К.

Величина энергии активации роста субмикрокристаллических зерен при температурах выше 823 К, определенная из выражения для зависимости скорости роста зерен от температуры при собирательной рекристаллизации, близка к энергии активации зернограничной самодиффузии титана (97 кДж/моль) и составляет 95 кДж/моль. Это свидетельствует о том, что деградация субмикрокристаллической структуры сплава Ti-6Al-4V контролируется самодиффузией титана по границам зерен.

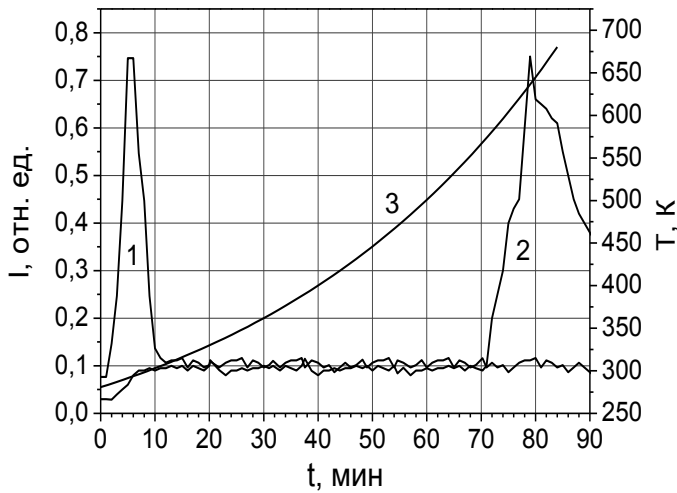


Рис. 6. Интенсивности выхода водорода из нанокристаллического (1) и крупнозернистого (2) образцов сплава Ti-6Al-4V-0,24H в процессе облучения электронами (3 – зависимость температуры разогрева образцов электронами от времени в процессе облучения)

электронного пучка $J = 10 \text{ мкА/см}^2$, энергия $E = 35 \text{ кэВ}$). Для сплава в крупнозернистом состоянии максимальная интенсивность выхода водорода из образцов имеет место при температуре 623 К после 70 минут облучения (рис. 6, кривая 2). В то же время, для сплава в нанокристаллическом состоянии максимум интенсивности выхода водорода из образцов наблюдается в первые десять минут облучения при температуре, ненамного превышающей комнатную температуру (рис. 6, кривая 1). При измерении остаточной концентрации водорода было установлено, что облучение электронами по используемым режимам не позволяет снизить концентрацию водорода в сплаве до технического стандарта.

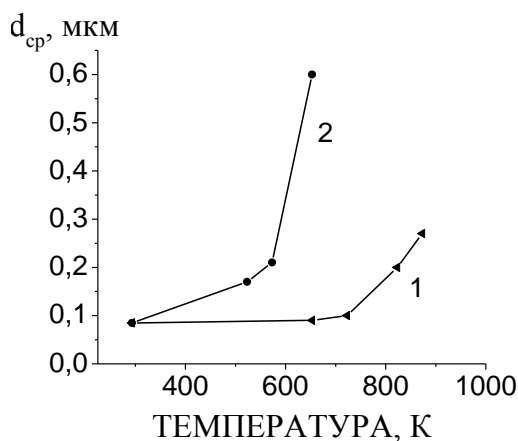


Рис. 7. Температурные зависимости изменения среднего размера зерен нанокристаллического сплава Ti-6Al-4V-(0,2±0,33)H в условиях дегазации: 1 – отжигом в вакууме; 2 – облучением электронами

Анализ возможности дегазации водорода из нанокристаллической структуры путем облучения электронами был проведен на основе результатов исследования влияния облучения электронами на кинетику выхода водорода из сплава Ti-6Al-4V-0,24H и стабильность его нанокристаллического состояния в интервале температур 293-623 К. На рис. 6 представлены зависимости интенсивности выхода водорода из образцов указанного сплава в крупнозернистом и нанокристаллическом состояниях от температуры и времени облучения электронами (плотность тока

Электронно-микроскопические и рентгеноструктурные исследования показали, что в процессе дегазации водорода из нанокристаллического сплава Ti-6Al-4V-(0,2±0,33)H путем облучения электронами, как и при дегазации водорода отжигом в вакууме, в сплаве происходят фазовое превращение $\alpha \rightarrow \beta$ и рост зерен до субмикронных размеров. Температурные зависимости изменения размера зерен в процессе дегазации водорода из сплава отжигом в вакууме и облучением электронами представлены на рис. 7. Видно, что при дегазации водорода из сплава облучением электронами температура начала роста зерен ниже, а скорость их роста существенно

выше, чем при дегазации водорода отжигом в вакууме. Оценка энергии активации роста зерен сплава Ti-6Al-4V-(0,2÷0,33)H в условиях дегазации водорода отжигом и облучением электронами показала, что значение энергии активации собирательной рекристаллизации (Q_G) нано- и субмикроструктурной структуры сплава в условиях дегазации отжигом в вакууме при температурах 873 и 923 К ($Q_G = (96 \pm 10)$ кДж/моль) близко к значению энергии активации зернограницной самодиффузии титана в крупнозернистом состоянии. В то же время значение Q_G исследуемого сплава при дегазации водорода облучением электронами составляет (52 ± 10) кДж/моль.

Раздел 5 посвящен исследованию влияния водорода на деформационное поведение и механические свойства субмикроструктурного титанового сплава Ti-6Al-4V-H при растяжении в интервале температур (293 ÷ 1023) К.

На рис. 8, а представлены кривые «напряжение-деформация» $\sigma = f(\epsilon_{ист})$ субмикроструктурных сплавов с концентрациями водорода 0,005, 0,08 и 0,33 мас.%. Видно (рис. 8, а), что кривая «напряжение-деформация» субмикроструктурного сплава Ti-6Al-4V-0,005H имеет короткую стадию деформационного упрочнения и низкий эффект деформационного упрочнения, что является типичным для субмикроструктурных металлических материалов, полученных методами интенсивной пластической деформации. Легирование водородом приводит к увеличению эффекта и продолжительности стадии деформационного упрочнения. Расчет коэффициентов деформационного упрочнения показал, что присутствие водорода в твердом растворе в субмикроструктурном сплаве приводит к увеличению не только эффекта деформационного упрочнения, но и числа стадий деформационного упрочнения (рис. 8, б). При этом зависимость величины θ от деформации становится подобной соответствующей зависимости для нелегированного водородом крупнозернистого сплава (рис. 8, б, кривая 4). Это может свидетельствовать об активизации дислокационного механизма деформации в субмикроструктурном сплаве Ti-6Al-4V в присутствии водорода в твердом растворе.

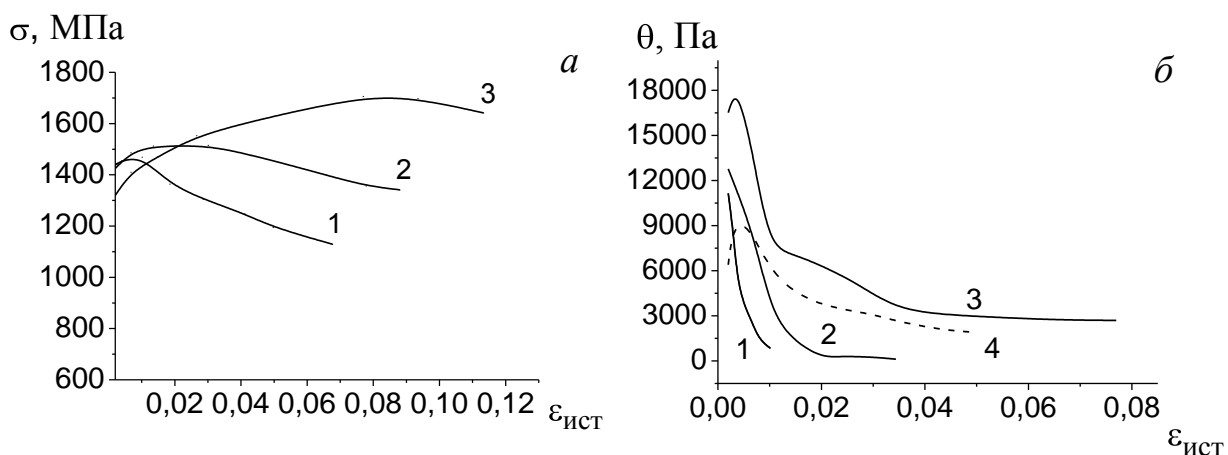


Рис. 8. Типичные кривые «напряжение – деформация» (а) и зависимости $\theta = f(\epsilon_{ист})$ (б) субмикроструктурного сплава Ti-6Al-4V с различным содержанием водорода при температуре 293 К: 1 – Ti-6Al-4V-0,005H; 2 – сплав Ti-6Al-4V-0,08H; 3 – сплав Ti-6Al-4V-0,33H; 4 – крупнозернистый сплав Ti-6Al-4V-0,002H

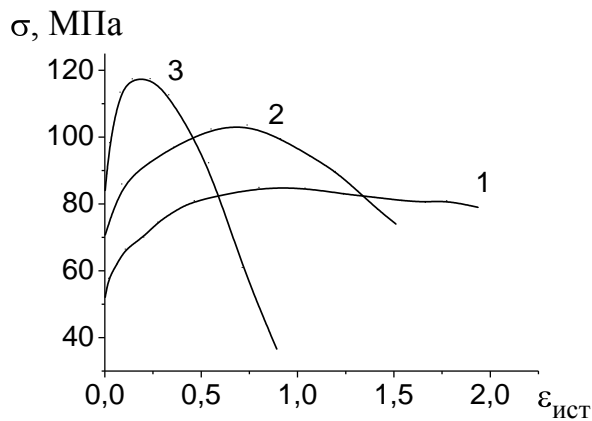


Рис. 9. Типичные кривые «напряжение – деформация» субмикроструктурированного сплава Ti-6Al-4V с различным содержанием водорода при температуре 973 К: 1 – Ti-6Al-4V-0,005H; 2 – Ti-6Al-4V-0,08H; 3 – Ti-6Al-4V-0,33H

Исследования механических свойств субмикроструктурированного сплава Ti-6Al-4V-H в интервале температур (293 ÷ 1023) К показали, что при температурах ниже 873 К легирование водородом в пределах исследуемых концентраций незначительно влияет на значения пределов текучести и прочности и величину деформации до разрушения. В интервале температур (923 ÷ 1023) К увеличение концентрации водорода в сплаве от 0,005 до 0,33 мас.% приводит к росту значений пределов текучести и прочности в 2–3 раза и уменьшению величины деформации до разрушения в 3–4 раза.

Изучение деформационного рельефа предварительно полированной поверхности образцов и распределения деформации по длине образца показало, что субмикроструктурированный сплав Ti-6Al-4V-H в зависимости от содержания водорода в той или иной степени проявляет склонность к локализации пластической деформации. На рис. 10 представлен типичный вид деформационного рельефа, формирующегося на предварительно полированной поверхности образцов субмикроструктурированного сплава с различным содержанием водорода в процессе растяжения при комнатной температуре. На поверхности образцов сплава Ti-6Al-4V-0,005H уже на стадии деформационного упрочнения образуются отдельные полосы локализованной деформации шириной 10–20 мкм, имеющие ламельную структуру и располагающиеся параллельно приложенной нагрузке (рис. 10, а). С ростом степени деформации плотность полос локализованной пластической деформации увеличивается. В конце стадии деформационного упрочнения на поверхности образцов наблюдается развитие двух макрополос локализованной деформации шириной 0,5 мм, расположенных под углом друг к другу (рис. 10, б). В то же время, на поверхности образцов сплава Ti-6Al-4V-0,33H на стадии упрочнения полосы локализованной деформации отсутствуют, но наблюдается образование цепочек пор, расположенных вдоль направлений, параллельных максимальным касательным напряжениям. На макроуровне локализация пластической деформации в сплаве Ti-6Al-4V-0,33H, так же как и при повышенных температурах, осуществляется путем образования шейки.

При повышенных температурах на кривой «напряжение-деформация» субмикроструктурированного сплава Ti-6Al-4V-0,005H, кроме стадии упрочнения, наблюдается стадия установившейся деформации, появление которой сопровождается увеличением пластичности до ~400-600% (рис. 9, кривая 1). Легирование водородом приводит к увеличению эффекта деформационного упрочнения сплава, но при этом уменьшается величина деформации до разрушения.

Анализ влияния легирования водородом на механические свойства

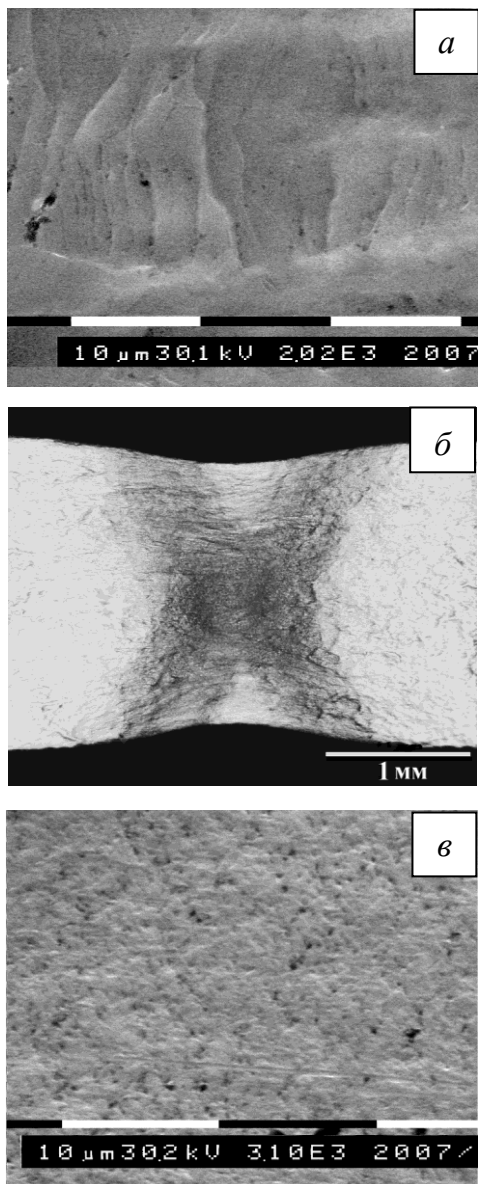


Рис. 10. Деформационный рельеф поверхности сплавов после растяжения при температуре 293 К: Ti-6Al-4V-0,005Н: а – ($\epsilon = 2\%$), б – ($\epsilon = 6\%$); в – Ti-6Al-4V-0,33Н ($\epsilon = 8\%$)

О степени развития процессов локализации пластической деформации на макроуровне можно судить по величине коэффициента локализации деформации $\eta = 1/[(1 - \psi)(1 + \delta)]$, где ψ – сужение в шейке, δ – деформация до разрушения.

Из сравнения значений коэффициентов η видно (табл. 1), что присутствие водорода в твердом растворе повышает устойчивость субмикроструктурного сплава Ti-6Al-4V-N к локализации деформации на макроуровне при комнатной температуре и снижает при повышенных температурах. Известно [1], что в металлических материалах с неравновесной структурой, какой является субмикроструктурная структура, полученная с использованием больших пластических деформаций, движение дислокаций затруднено из-за высоких внутренних напряжений. Это приводит к локализации пластической деформации и формированию полос локализованной деформации. Присутствие водорода в твердом растворе облегчает зарождение дислокаций и увеличивает их подвижность [2], что, по-видимому, и повышает устойчивость к локализации пластической деформации субмикроструктурного сплава Ti-6Al-4V-N, легированного водородом. При повышенных температурах рост склонности субмикроструктурного сплава Ti-6Al-4V-N к локализации пластической деформации с увеличением концентрации водорода может быть связан с появлением неоднородности распределения водорода по объему образца в процессе испытания, которая, в свою очередь, обусловлена способностью водорода концентрироваться в наиболее напряженных участках образца.

Об устойчивости титановых сплавов к водородной хрупкости можно судить по их чувствительности к надрезу и длительной прочности. При испытаниях на чувствительность к надрезу устойчивость субмикроструктурного сплава к водородной хрупкости оценивали по величине коэффициента конструктивной прочности $\chi = \sigma_{ВН}/\sigma_{В}$, где $\sigma_{В}$ – предел прочности образцов без надреза; $\sigma_{ВН}$ – предел прочности образцов с надрезом. Концентрация водорода, при

которой величина коэффициента χ становится меньше единицы, соответствует переходу сплава к хрупкому разрушению.

Таблица 1. Коэффициент локализации деформации η субмикроструктурных сплавов Ti-6Al-4V-H при различных температурах

Материал	Температура, К	Коэффициент локализации деформации η
Ti-6Al-4V-0,005H	293	1,98
Ti-6Al-4V-0,33H		1
Ti-6Al-4V-0,005H	923	6,8
Ti-6Al-4V-0,08H		9,6
Ti-6Al-4V-0,33H		13
Ti-6Al-4V-0,005H	973	5,1
Ti-6Al-4V-0,08H		10,4
Ti-6Al-4V-0,33H		21

В таблице 2 представлены рассчитанные значения коэффициента χ сплава Ti-6Al-4V в крупнозернистом и субмикроструктурном состояниях в зависимости от концентрации водорода. Видно, что для крупнозернистого состояния коэффициент χ становится меньше единицы уже при концентрации водорода в сплаве 0,05 мас.%. В то же время для субмикроструктурного сплава коэффициент χ остается больше единицы даже при концентрации водорода в сплаве 0,1 мас.%. Это свидетельствует о большей устойчивости к водородной хрупкости сплава Ti-6Al-4V в субмикроструктурном состоянии по сравнению с крупнозернистым состоянием.

Таблица 2. Значения коэффициента конструктивной прочности сплавов Ti-6Al-4V-H

Сплав в крупнозернистом состоянии	Коэффициент конструктивной прочности χ	Сплав в субмикроструктурном состоянии	Коэффициент конструктивной прочности χ
Ti-6Al-4V-0,002H	1,15	Ti-6Al-4V-0,002H	1,17
Ti-6Al-4V-0,02H	1,11	Ti-6Al-4V-0,005H	1,17
Ti-6Al-4V-0,05H	0,98	Ti-6Al-4V-0,016H	1,14
Ti-6Al-4V-0,12H	0,95	Ti-6Al-4V-0,031H	1,14
Ti-6Al-4V-0,21H	0,77	Ti-6Al-4V-0,049H	1,15
		Ti-6Al-4V-0,1H	1,07
		Ti-6Al-4V-0,24H	0,98

Подтверждением высокой устойчивости к водородной хрупкости субмикроструктурного сплава Ti-6Al-4V-H по сравнению с крупнозернистым состоянием служат и результаты испытаний на длительную прочность образцов с надрезом. При таких испытаниях концентрацией водорода, соответствующей переходу сплава к хрупкому разрушению, является концентрация, при которой величина разрушающего напряжения сплава становится меньше значения раз-

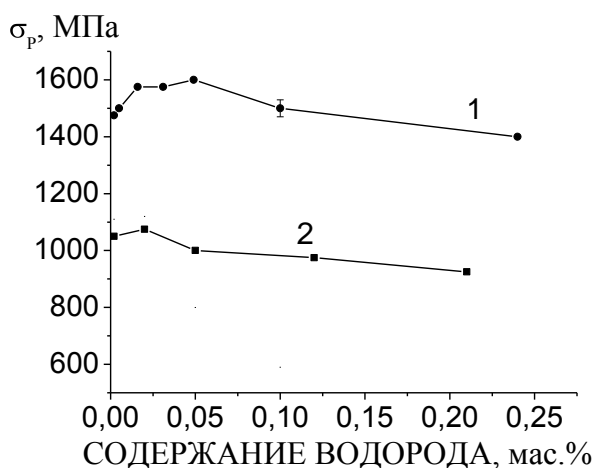


Рис. 11. Зависимость разрушающего напряжения σ_p от содержания водорода при испытаниях на длительную прочность плоских образцов с надрезом сплава Ti-6Al-4V-H: 1 – субмикроструктурное состояние; 2 – крупнозернистое состояние

существляется при концентрациях водорода, в два раза больших по сравнению с крупнозернистым состоянием.

Основные выводы

1. Установлено, что предварительное легирование водородом до концентраций (0,2 ÷ 0,33) мас.% позволяет сформировать в сплаве Ti-6Al-4V субмикроструктурное состояние путем однократного одноосного прессования на 80% и последующей дегазации в вакууме при температуре 873 К.
2. Пластическая деформация прессованием при температурах 973-1023 К инициирует в двухфазном ($\alpha + \beta$) титановом сплаве Ti-6Al-4V, предварительно легированном водородом до концентраций (0,2 ÷ 0,33) мас.%, превращение $\beta \rightarrow \alpha$, вызывающее фазовый наклеп, что способствует формированию в сплаве нанокристаллического состояния.
3. Формирование нано- и субмикроструктурной структуры позволяет снизить температуру активного выхода водорода из сплава Ti-6Al-4V-H при облучении электронами на 200-350 К по сравнению с крупнозернистым состоянием.
4. Температура начала роста зерен нано- и субмикроструктурного сплава Ti-6Al-4V-H в условиях дегазации водорода облучением электронами ниже, а скорость роста зерен выше по сравнению с соответствующими значениями в условиях дегазации водорода путем отжига в вакууме при температуре 873 К. Установлено, что причиной такого изменения скорости и температуры начала роста зерен является уменьшение в условиях облучения электронами энергии активации собирательной рекристаллизации сплава, контролируемой зернограничной самодиффузией титана.
5. Присутствие в субмикроструктурном сплаве Ti-6Al-4V водорода в твердом растворе в количестве до 0,33 мас.% препятствует развитию локализа-

рушающего напряжения сплава, нелегированного водородом. На рис. 11 представлены кривые зависимости разрушающего напряжения сплава Ti-6Al-4V-H в субмикроструктурном (кривая 1) и крупнозернистом (кривая 2) состояниях. Видно, что переход сплава Ti-6Al-4V в субмикроструктурное состояние к хрупкому разрушению происходит при концентрации водорода ~0,1 мас.%. Для крупнозернистого сплава критической концентрацией водорода является концентрация ~0,05 мас.%. Следовательно, переход к хрупкому разрушению сплава в субмикроструктурном состоянии осу-

ции пластической деформации в процессе растяжения при комнатной температуре и приводит к увеличению эффекта упрочнения и общей деформации до разрушения.

6. В интервале температур 293-873 К легирование субмикроструктурного сплава Ti-6Al-4V водородом до 0,33 мас.% незначительно влияет на значения его пределов прочности и текучести. При температурах выше 873 К увеличение концентрации водорода до 0,33 мас.% приводит к росту пределов прочности и текучести в 2-3 раза и снижению величины деформации до разрушения в 3-4 раза.
7. Установлено, что формирование субмикроструктурного состояния в сплаве Ti-6Al-4V позволяет в два раза повысить концентрацию водорода, соответствующую переходу сплава при комнатной температуре к хрупкому разрушению, по сравнению с крупнозернистым состоянием сплава.

Основные публикации по теме работы

1. Грабовецкая Г.П., Мельникова Е.Н., Колобов Ю.Р., Чернов И.П., Найденкин Е.В., Никитенков Н.Н., Мишин И.П. Эволюция структурно-фазового состояния сплава Ti-6Al-4V в процессе формирования субмикроструктурной структуры с использованием обратимого легирования водородом // Изв. вузов. Физика. – 2006. – № 4. – С. 86–91.
2. Грабовецкая Г.П., Мельникова Е.Н., Колобов Ю.Р., Чернов И.П. Влияние легирования водородом на деформационное поведение и локализацию пластической деформации на макромасштабном уровне субмикроструктурного титанового сплава Ti-6Al-4V // Физическая мезомеханика. – Т.9. – Спец.вып. – 2006. – С. 107–110.
3. Грабовецкая Г.П., Мельникова Е.Н., Чернов И.П. Структурно-фазовое состояние и механические свойства субмикроструктурного титанового сплава Ti-6Al-4V, полученного с использованием обратимого легирования водородом // Известия Томского политехнического университета, Т.311. – №2. Математика и механика. Физика – 2007. – С. 111–115.
4. Мельникова Е.Н., Грабовецкая Г.П., Колобов Ю.Р. Влияние водорода на деформационное поведение и разрушение сплава Ti-6Al-4V в субмикроструктурном состоянии // Деформация и разрушение материалов. – №9. – 2008. – С. 26–31.
5. Никитенков Н.Н., Кудрявцева Е.Н., Чернов И.П., Тюрин Ю.И., Грабовецкая Г.П., Мельникова Е.Н. Влияние насыщения водородом и облучения ионизирующим излучением на структуру и механические свойства субмикроструктурного сплава Ti-6Al-4V // Известия Томского политехнического университета. – Т. 313. – №2. Математика и механика. Физика. – 2008. – С. 105–110.
6. Мельникова Е.Н., Грабовецкая Г.П., Мишин И.П. Формирование субмикроструктурной структуры в титановом сплаве Ti-6Al-4V с использованием обратимого легирования водородом // Новые материалы. Создание, структура, свойства-2005: Труды V Всероссийской школы-семинара с международным участием. – Томск: Изд.-во ТПУ, 2005. – С. 179–182.

7. Мельникова Е.Н. Формирование субмикроструктурной структуры в титановом сплаве Ti-6Al-4V с использованием обратимого легирования водородом // Физика и химия наноматериалов: сборник материалов Международной школы-конференции молодых ученых (13-16 декабря 2005 г. Томск, Россия). – Томск: Изд.-во ТГУ, 2005. – С. 90–93.
8. Мельникова Е.Н., Грабовецкая Г.П., Чернов И.П. Структура и пластичность субмикроструктурного титанового сплава Ti-6Al-4V // Новые материалы. Создание, структура, свойства-2006: Труды VI Всероссийской школы-семинара. – Томск: Изд.-во ТПУ, 2006. – С. 219–223.
9. Мельникова Е.Н., Грабовецкая Г.П., Чернов И.П. Эволюция субмикроструктурной структуры сплава Ti-6Al-4V+H в процессе дегазации // Перспективы развития фундаментальных наук: Труды III Международной конференции студентов и молодых ученых, Томск, 16-19 мая 2006 г. – Томск: Изд.-во ТПУ, 2006. – С. 49–51.
10. Melnikova E.N., Grabovetskaya G.P., Chernov I.P. Hydrogen influence on structure and deformation behavior ultra-fine grained Ti-6Al-4V titanium alloy // The twelfth International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists «Modern Techniques and Technologies» (МТТ'2007), Tomsk, Tomsk Polytechnic University. – Tomsk: TPU Press, 2007. – P. 104–106.
11. Мельникова Е.Н., Никитенков Н.Н. Радиационно-стимулированный выход водорода из титанового сплава Ti-6Al-4V в субмикроструктурном и крупнозернистом состоянии // Физика и химия высокоэнергетических систем: Сборник материалов III Всероссийской конференции молодых ученых (24-27 апреля 2007 г., г.Томск). – Томск: ТМЛ-Пресс, 2007. – С. 65–68.
12. Мельникова Е.Н., Грабовецкая Г.П. Эволюция структурно-фазового состояния титанового сплава Ti-6Al-4V в крупнозернистом и субмикроструктурном состоянии в процессе наводороживания // IV Международная конференция студентов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук»: сборник трудов, Россия, Томск, 15-18 мая 2007 г. – Томск: Изд.-во ТПУ, 2007. – С. 66–68.
13. Мельникова Е.Н. Эволюция структуры субмикроструктурного титанового сплава Ti-6Al-4V при радиационном воздействии // VIII Международная научно-техническая Уральская школа-семинар металлургов-молодых ученых: Сборник трудов, Екатеринбург, 26-30 ноября 2007 г. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2007. – С. 159–162.
14. Мельникова Е.Н., Грабовецкая Г.П. Влияние водорода на служебные характеристики и разрушение субмикроструктурного титанового сплава Ti-6Al-4V // XIV Международная научно-практическая конференция студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии СТТ 2008», ТПУ 24 марта – 28 марта 2008 г. – Томск: Изд.-во ТПУ, 2008. – С.110–111.
15. Созоева А.В., Мельникова Е.Н. Влияние водорода на механические свойства титанового сплава Ti-6Al-4V в субмикроструктурном состоянии // Физика и химия высокоэнергетических систем: Сборник материалов IV

- Всероссийской конференции молодых ученых (22-25 апреля 2008 г., Томск, Россия). – Томск: ТМЛ-Пресс, 2008. – С. 132–135.
16. Nikitenkov N.N., Kudryavtzeva E.N., Chernov I.P., Tyurin Yu.I., Grabovetzkaya G.P., Melnikova E.N. The low-temperature removal of hydrogen isotopes from submicrocrystalline Ti-6Al-4V-H alloy // 9th International Conference on Modification of Materials with Particle beams and Plasma Flows: Proceedings. Tomsk: Publishing house of the IAO SB RAS, 2008. – P. 316–319.
 17. Мельникова Е.Н., Грабовецкая Г.П. Исследование устойчивости субмикроркристаллического титанового сплава Ti-6Al-4V к водородному охрупчиванию // Перспективы развития фундаментальных наук: труды V международной конференции студентов и молодых учёных. Россия, Томск, 20–23 мая 2008 г. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – С.64–66.
 18. Степанова Е.Н., Грабовецкая Г.П. Деформация и разрушение сплавов Ti-6Al-4V-H, полученных с использованием обратимого легирования водородом // Физика и химия высокоэнергетических систем: Сборник материалов V Всероссийской конференции молодых ученых (22-25 апреля 2009 г., г. Томск). – Томск: ТМЛ-Пресс, 2009. – С. 202–205.
 19. Мельникова Е.Н., Забудченко О.В., Мишин И.П., Колубаева Ю.А., Тересов А.Д. Эволюция структурно-фазового состояния субмикроркристаллического Ti-6Al-4V в процессе электронно-лучевой обработки // IX Международная научно-техническая Уральская школа-семинар металловедов-молодых ученых: Материалы семинара, Екатеринбург, 1-5 декабря 2008 г., Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2008. – С. 14–15.
 20. Степанова Е.Н., Грабовецкая Г.П. Сравнительное исследование эволюции структурно-фазового состояния титанового сплава Ti-6Al-4V-H в процессе дегазации отжигом в вакууме и облучения электронным пучком // Материаловедение, технологии и экология в 3-м тысячелетии: Материалы IV Всероссийской конференции молодых ученых (19-21 октября 2009 г., Томск, Россия). – Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2009. – С. 172–175.

Список цитируемой литературы

1. Панин В.Е., Егорушкин В.Е., Панин А.В. Физическая мезомеханика деформируемого твердого тела как многоуровневой системы. I. Физические основы многоуровневого подхода // Физическая мезомеханика. – 2006. – Т. 9. – №3. – С.9–22.
2. Robertson I.V. The effect of hydrogen on dislocation dynamics // Engineering Fracture Mechanics. – 2001. – V. 68. – P. 671–692.