

На правах рукописи



Нарыкова Мария Владимировна

**ДЕФЕКТНАЯ СТРУКТУРА, ДОЛГОВЕЧНОСТЬ
И УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
МИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ,
ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ**

Специальность 01.04.07 — физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург - 2011

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор
Бетехтин Владимир Иванович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор
Смирнов Борис Иванович
доктор технических наук,
профессор
Толочко Олег Викторович

Ведущая организация: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет»

Защита состоится «25» мая 2011 г. в 16 ч. 00 мин. на заседании диссертационного Совета Д 212.229.05 при ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу:
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, II уч. корп., ауд. 265.

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

Автореферат разослан « ____ » _____ 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук



Воробьева Т.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Получение высокопрочных материалов является одной из важных задач современного материаловедения. В рамках решения этой задачи большое значение имеет выявление и изучение структурных характеристик и их параметров, которые обуславливают высокие физико-механические свойства материалов, в том числе их прочность, пластичность, работоспособность (долговечность). Одним из важных и хорошо известных параметров структуры поликристаллических металлов и сплавов является размер зерен (кристаллитов). Известно, что уменьшение за счет различных термомеханических обработок размера зерна от десятков миллиметров до нескольких микрометров ведет к существенному повышению предела текучести, прочности, микротвердости. Существуют различные методы получения металлов и сплавов с ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой. Наиболее распространенными являются методы, в основе которых лежит интенсивная пластическая деформация (ИПД) материалов, например, равноканальное угловое прессование (РКУП). В настоящее время используются также другие методы ИПД, например, особый вид винтовой прокатки.

С помощью различных методов ИПД были получены металлические материалы с размером зерна от одного микрометра и менее. Эти микро- (МК) и нанокристаллические (НК) материалы обладают значительно более высокими, чем крупнокристаллические, механическими свойствами.

Микрокристаллические металлы и сплавы, полученные методами ИПД, отличаются от обычных крупнокристаллических кроме размера зерна рядом других структурных особенностей: высокой плотностью зернограницных дислокаций, высокой концентрацией неравновесных (деформационных) вакансий, высоким уровнем внутренних напряжений и рядом других структурных характеристик. Особое значение имеет большая доля в микрокристаллических материалах границ зерен, находящихся в неравновесном, аморфоподобном состоянии и имеющих поэтому пониженную плотность, то есть повышенный свободный объем. На фоне этого свободного объема, относительно равномерно распределенного по границам зерен, возможно образование областей избыточного свободного объема (ИСО), в предельном случае нанопор.

Учитывая, что пористость может оказывать большое влияние на механические свойства, выявление в микрокристаллических материалах нанопор, определение их параметров, связи с другими структурными характеристиками (например, разориентацией границ зерен) и изучение в конечном итоге влияния указанных факторов на механические свойства представляется достаточно актуальной задачей.

При изучении влияния дефектной структуры на механические свойства основное внимание в данной работе уделялось долговечности и упруго-пластическим свойствам. Эти характеристики механических свойств для микрокристаллических материалов являются наименее изученными и в тоже время, несомненно, важными для оценки их работоспособности. Указанное обстоятельство также свидетельствует об актуальности данной работы.

Для определения связи отмеченных характеристик дефектной структуры и механических свойств изучались металлы и сплавы, полученные при различных режимах ИПД.

Целью работы является экспериментальное исследование влияния дефектной структуры на долговечность, упруго-пластические свойства и прочность микрокристаллических алюминия и его сплавов, технического титана, меди, приготовленных при различных режимах ИПД - равноканального углового прессования и винтовой в сочетании с продольной прокатках.

Научная новизна состоит в выявлении связи дефектной структуры, особенно нанопористости, образующейся при различных методах ИПД, с механическими свойствами, определяющими работоспособность (долговечность, модуль упругости) микрокристаллических металлических материалов.

Научная значимость работы.

В работе установлено, что при ИПД (равноканальном угловом прессовании или винтовой в сочетании с продольной прокатках) металлических материалов образуются элементы избыточного свободного объема, в предельном случае нанопоры. Интегральный объем нанопористости зависит от режима интенсивной пластической деформации (числа проходов при РКУП или условий винтовой и продольной прокаток). Выявлено влияние ИСО на долговечность при испытаниях в режиме ползучести и на упруго-пластические свойства, в частности, модуль Юнга.

Практическая значимость работы.

Обнаружено, что образование ИСО может по-разному влиять на характеристики кратковременной прочности (к примеру, предел текучести) и длительной прочности (долговечность). Это обстоятельство необходимо учитывать при практическом использовании микрокристаллических металлов при различных условиях их эксплуатации. Подавление порообразования, например, за счет противодействия при РКУП или после ИПД за счет залечивания нанопор, позволит повысить эффект упрочнения микрокристаллических материалов.

Основные положения, выносимые на защиту.

- Выявлено образование элементов ИСО в микрокристаллических металлах и сплавах, полученных при различных режимах ИПД, и определены их параметры.
- Обнаружено влияние нанопористости на долговечность микрокристаллических материалов при испытаниях в режиме ползучести.
- Установлено, что уменьшение нанопористости, например, за счет приложения гидростатического давления или применения противодействия в процессе равноканального углового прессования, приводит к повышению механических характеристик микрокристаллических материалов.
- Проведен анализ вклада в упруго-пластические свойства (особенно модуль упругости) избыточного свободного объема и других структурных факторов, обусловленных ИПД.

Вклад автора. Соискателем лично или при его непосредственном участии выполнены исследования параметров дефектной структуры микрокристаллических металлов и сплавов, а также их механических свойств. Автор принимал участие в анализе и обсуждении результатов и подготовке научных публикаций.

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается использованием нескольких методов исследования для определения параметров дефектной структуры микрокристаллических материалов. Механические и акустические характеристики исследуемых образцов были изучены после различных режимов ИПД на образцах одинакового типа и размера. Интерпретация результатов механических испытаний основывалась также на данных микроструктурных исследований.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы представлялись и обсуждались на следующих конференциях и

семинарах: XLIII и XLVI Международных конференциях «Актуальные проблемы прочности» (Витебск, 2004 и 2007 г.); XLIV Международной конференции «Актуальные проблемы прочности» (Вологда, 2005 г.); XVI Международной конференции «Петербургские чтения по проблемам прочности» (С.-Петербург, 2006 г.); The 7th International Conference «High technologies in advanced metal science and engineering» (S.-Petersburg, 2006 г.); XVII Международной конференции «Физика прочности и пластичности материалов» (Самара, 2009 г.); International Scientific and Technical Conference “Nanotechnologies of functional materials” (S.-Petersburg, 2010 г.); 50 Международный научный симпозиум «Актуальные проблемы прочности» (Витебск, 2010 г.); XIX Международной конференции «Петербургские чтения по проблемам прочности», (С.-Петербург, 2010 г.), а также на семинаре кафедры «Физика прочности и пластичности материалов» Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

Публикации. По теме диссертационного исследования опубликовано 13 работ, из них - 2 статьи в изданиях, включенных в перечень журналов ВАК РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 143 страницах, содержит 54 рисунка, 9 таблиц. Библиографический список включает 178 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертации. Сформулированы цель и задачи исследования, а также научная и практическая значимость диссертационной работы.

В **главе I** рассмотрены основные методы создания объемных нано- и микрокристаллических материалов; сделан обзор опубликованных в научной литературе работ, посвященных изучению структуры и свойств металлов и сплавов с УМЗ структурой.

Показано, что РКУП является эффективным способом получения УМЗ структуры в металлах и сплавах. Особое значение при РКУП имеет число проходов (степень деформации) и ориентация заготовки при продавливании ее через оснастку. Оптимальным режимом для алюминия и его сплавов является использование маршрута B_c (поворот образца после каждого прохода на 90° относительно оси прессования), в результате которого образуется равноосная

субзеренная структура. Формирование наноструктурного состояния в металлах и сплавах возможно и при использовании других методов, основанных на ИПД, например, сочетании некоторых видов прокаток, при которых реализуется схема напряженного состояния, близкая к всестороннему сжатию с большими сдвиговыми деформациями.

Структурные исследования микрокристаллических материалов показывают, что с увеличением степени интенсивной пластической деформации наблюдается тенденция к некоторому уменьшению размера зерна. Отмечается существенное повышение таких физико-механических характеристик материала как микротвердость, предел прочности и текучести. При этом очень мало изучались долговечность и упругие характеристики, во многом определяющие работоспособность микрокристаллических материалов. Практически не рассматривалась возможность образования в процессе интенсивной пластической деформации нанопористости и ее влияние на долговечность и упруго-пластические свойства.

Глава II посвящена описанию объектов исследования, методик приготовления микрокристаллических образцов и экспериментальных методов изучения дефектной структуры и механических свойств.

Для исследования были выбраны чистый алюминий (Al 99.99 %), сплавы на основе алюминия (Al+0.2 wt. % Sc и Al-5.5% Mg- 2.2% Li-0.12% Zr – сплав 1420), медь (Cu 99.99 %) и технический титан ВТ1-0. Заготовки алюминия и его сплавов, имевшие прямоугольное сечение (10×10) мм² и длину 50 мм, подвергались равноканальному угловому прессованию при комнатной температуре с различным числом проходов – от 1 до 12 по маршруту В_c. Образцы сплава 1420 дополнительно растягивались при T=370 °С со скоростью 5 мм/мин до разных степеней деформации (100%, 500% и 1200 %). Изготовление образцов методом РКУП проводилось в Институте физики материалов АН ЧР (г. Брно, Чешская Республика). Образцы микрокристаллической меди были получены методом РКУП (12 проходов) из исходных заготовок прямоугольного сечения (15×15) мм² длиной 50 мм в двух режимах - без противодействия и с противодействием 250 МПа (ФТИНТ, НАНУ, г. Харьков, Украина).

Технический титан ВТ1-0 (поставщик ОАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА», г. Верхняя Салда) в исходном состоянии имел вид прутка диаметром 40 мм. В результате последовательных режимов обработки с использованием различных

степеней деформации были получены две партии образцов микрокристаллического титана (НОИИ «Центр наноструктурных материалов и нанотехнологий», БелГУ, г. Белгород) (табл. 1).

Таблица 1

№	Способ получения
I	d=40 мм → РСП T=400 °С, d=16 мм → ПП T=400 °С, d=12 мм → ПВП T=20 °С, d=8 мм
II	d=40 мм → РСП T=400 °С, d=20 мм → ПП T=400 °С, d=9,5 мм → ПВП T=20 °С, d=8 мм

Примечание. РСП – радиально-сдвиговая прокатка; ПП – продольная прокатка; ПВП – поперечно-винтовая прокатка.

Одной из задач настоящей работы является выявление дефектной структуры материала, подвергнутого различным режимам ИПД. Использование комплекса современных методик – малоуглового рентгеновского рассеяния, электронной сканирующей и просвечивающей микроскопии, прецизионного измерения плотности и других, позволило установить наличие нанопористости. Особое место в этом списке занимает метод МРР, который способен давать статистически усредненную информацию о параметрах областей ИСО, благодаря чему появляется возможность исследовать связи между этими параметрами и свойствами микрокристаллических металлических материалов.

Во многих работах было показано, что применение высокого гидростатического давления является эффективным способом уменьшения пористости материалов, при этом, как показывают электронно-микроскопические исследования (Бетехтин В.И., Мышляев М.М., Петров А.И. // ФММ. 1973. Т.36. В.4. С. 863.), давление до величины в несколько ГПа практически не влияет на дислокационную структуру ГЦК-металлов, то есть компоненты рассеяния, не связанные с порами, не меняются. Таким образом, можно разделить источники рентгеновского рассеяния и определить характерные параметры микронесплошностей в материале. Обработка образцов высоким гидростатическим давлением проводилась в институте Физики металлов УрО РАН г. Екатеринбург.

Испытания образцов микрокристаллического алюминия и его сплавов на долговечность в режиме ползучести проводились при постоянных значениях напряжения и температуры. Прочность и пластичность образцов определялась на установке Instron 5882 при комнатной температуре. Резонансным методом составного пьезоэлектрического вибратора определялись характеристики упругой

(модуль Юнга E) и обратимой микропластической деформации (амплитудно-независимый декремент δ и напряжение микропластического течения σ), связанные с колебательным движением дислокаций. Особенность акустических экспериментов состоит в том, что при умеренных амплитудах дислокационная структура исследуемого образца сохраняется: после акустического воздействия плотность дислокаций не изменяется (*Никаноров С.П., Кардашев Б.К. Упругость и дислокационная неупругость кристаллов. М.: Наука, 1985.*). Измерения проводились при продольных колебаниях стержневых образцов с частотой около 100 кГц в широком диапазоне амплитуд колебательной деформации, включающем линейную (амплитудно-независимую) и нелинейную (микропластическую) области.

Структурные исследования – определение размеров зерен и их разориентаций - проводились с использованием просвечивающей (Philips CM12), сканирующей электронной микроскопии (JEOL 6460) и растрового электронного микроскопа с полевой эмиссией Quanta 600 FEG.

В **главе III** показано, что при различных режимах интенсивной пластической деформации - методом РКУП или винтовой в сочетании с продольной прокатки – в металлах и сплавах образуются области избыточного свободного объема (нанопоры). Интегральный объем нанопор в микрокристаллических материалах зависит от числа проходов при РКУП и режимов прокатки.

Образцы микрокристаллического алюминия (Al 99.99 %), полученные после различного числа проходов, исследовались методом МРР и денситометрии. Обнаружено, что в изученных образцах возникает малоугловое рентгеновское рассеяние, обусловленное наличием неоднородностей электронной плотности (рис. 1). Для идентификации природы этих неоднородностей и оценки их концентрации методом МРР были измерены образцы до и после воздействия на них высокого гидростатического давления 1 ГПа (рис. 2). Наблюдаемое снижение интенсивности рентгеновского рассеяния для образцов микрокристаллического алюминия В₄ (четыре прохода РКУП) после приложения давления можно связать, как уже отмечалось, только с залечивающим действием давления на области избыточного свободного объема. Обработка данных МРР показала, что средние размеры нанопор в образцах В₁ и В₄ практически одинаковы и составляют ≈ 20 -30 нм; объемные доли отличаются - $3.7 \cdot 10^{-3}$ и $5 \cdot 10^{-3}$ соответственно. Действительно,

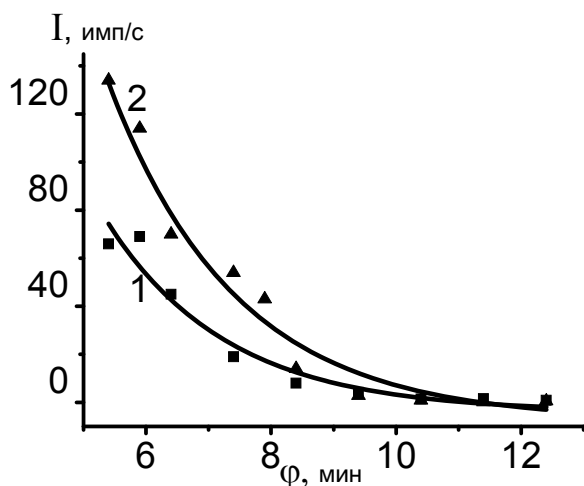


Рис. 1. Зависимость интенсивности I рентгеновских лучей от угла рассеяния φ для микрокристаллического Al (99.99%) после одного V_1 (1) и четырех V_4 (2) проходов РКУП.

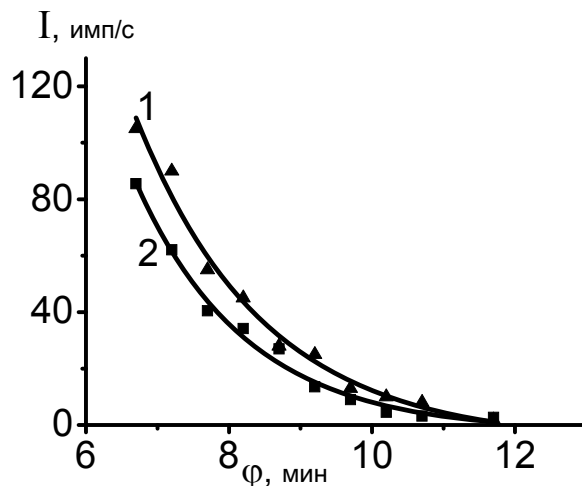


Рис. 2. Зависимость интенсивности I рентгеновских лучей от угла рассеяния φ для образца V_4 (Al 99.99 %) до (1) и после (2) приложения гидростатического давления (1 ГПа).

определение плотности образцов микрокристаллического алюминия прецизионным методом гидростатического взвешивания подтвердило пустотную природу рассеивающих неоднородностей. Так, для образца V_4 уменьшение пористости за счет залечивающего действия давления составило $\sim 2.5 \cdot 10^{-3}$ (оценка по данным МРР) и $\sim 2 \cdot 10^{-3}$ (прямое измерение плотности).

При изучении и других образцов (сплавы алюминия, медь, титан ВТ1-0), полученных при различных режимах ИПД, также отмечается образование областей ИСО. Так, для микрокристаллической меди интенсивности

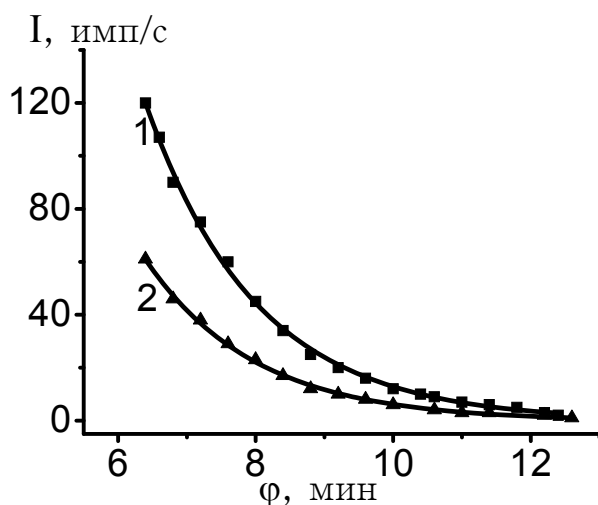


Рис. 3. Данные МРР для образцов меди, полученных методом РКУП ($N=12$) без противодействия (1) и с противодействием 250 МПа (2).

рентгеновского рассеяния для образцов, полученных с применением противодействия в процессе РКУП и без него, заметно отличаются (рис. 3). Обработка данных показала, что размеры рассеивающих неоднородностей в обоих случаях близки и составляют ~ 40 нм. В тоже время объемные доли неоднородностей, в предположении их пустотной природы, существенно

отличаются и составляют 1% и 2% в случае РКУП с противодавлением и без противодавления соответственно. Пустотная природа неоднородностей была подтверждена результатами измерений плотности образцов ультрамелкозернистой меди: уплотнение за счет противодавления составляет величину $\Delta\rho/\rho=0.9\%$, что близко к разнице объемных долей нанопор, определенных методом МРР.

В образцах технического титана ВТ1-0 характерные размеры рассеивающих неоднородностей, по оценке метода МРР, образующихся в процессе ИПД, составляют порядка ~ 20 нм. При этом применение режимов, отличающихся степенью обжатия при промежуточных прокатках, приводит к изменению интегрального объема пор. Метод денситометрии показал существенное отличие в абсолютных значениях плотностей образцов, полученных различными режимами: режим I - 4.508 ± 0.001 г/см³, режим II - 4.548 ± 0.005 г/см³.

Известно, что при интенсивной пластической деформации в микрокристаллических материалах образуются границы зерен с большими разориентациями. На рис. 4 (а, б) в качестве примера представлены распределения границ зерен по разориентациям для образцов сплава Al+0.2% Sc после одного и восьми проходов. Как видно, с ростом числа проходов при РКУП наблюдается увеличение доли большеугловых границ зерен ($\Theta > 15^\circ$).

Таким образом, установлено, что ИПД сопровождается образованием ИСО в исследованных металлах и сплавах. Интегральный объем нанопор зависит от режима и степени ИПД. Можно предположить, что увеличение степени интенсивной пластической деформации активизирует развитие в тройных стыках

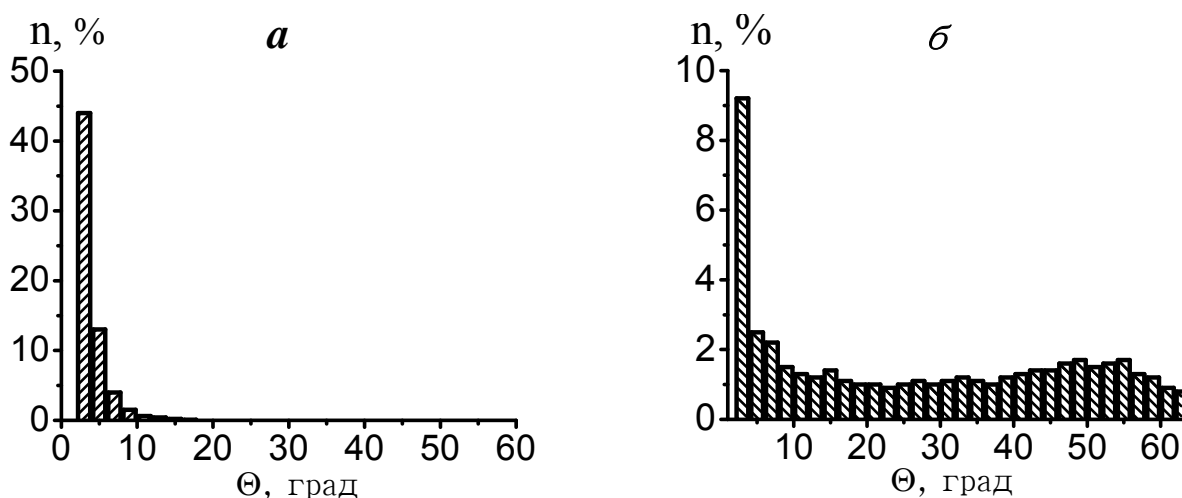


Рис. 4. Распределения границ зерен по разориентациям в микрокристаллическом сплаве Al+0.2% Sc после одного (а) и восьми (б) проходов РКУП.

ротационных мод деформации, ведущих к локальным напряжениям и зарождению микронесплошностей. С этой точки зрения, формирование в процессе ИПД большеугловых границ зерен и их тройных стыков и ведет, очевидно, к возникновению высоких внутренних напряжений, способствующих образованию областей ИСО (нанопор). При этом, чем выше разориентации границ, тем больше уровень внутренних напряжений. Образование и развитие нанопор, в принципе, может быть связано и с коагуляцией неравновесных вакансий, при этом внутренние напряжения будут способствовать этому диффузионному процессу.

В главе IV рассмотрено влияние интенсивной пластической деформации на долговечность, упруго-пластические свойства и другие механические характеристики микроструктурных металлов и сплавов.

Изучение долговечности образцов микроструктурного алюминия, полученных после различного числа проходов при РКУ-прессовании и испытанных в режиме ползучести при комнатной температуре показало, что наиболее существенное уменьшение долговечности наблюдается при переходе от одного (B_1) к четырем (B_4) проходам (рис. 5).

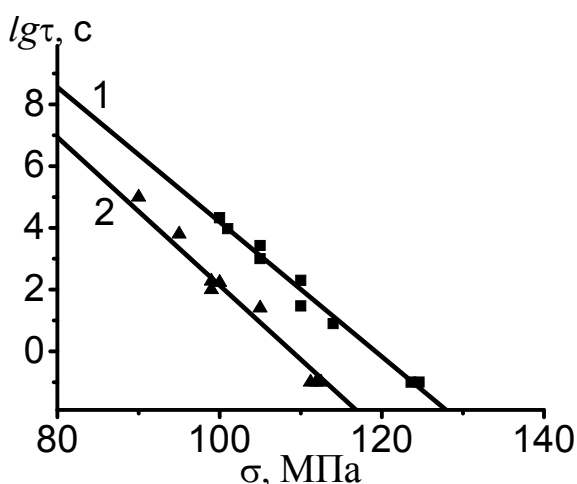


Рис. 5. Долговечности образцов микроструктурного Al 99.99 % после одного B_1 (1) и четырех B_4 (2) проходов РКУ; $T_{исп}=291$ К.

Для сплава Al-0.2% Sc испытания на долговечность проводились при растяжении образцов в режиме ползучести при 473 К в диапазоне постоянных напряжений 20-50 МПа. Установлено, что уже после первого прохода при РКУП долговечность в исследованном интервале напряжений стала в несколько раз меньше, чем для исходных, крупнокристаллических образцов. В таблице 2 приведены результаты

испытаний в режиме ползучести микроструктурных образцов Al 99.99 % и сплава Al+0.2% Sc. С увеличением числа проходов для алюминия и его сплава наблюдается уменьшение долговечности: особенно резко при переходе от одного к четырем проходам РКУП. При анализе данных таблицы 2 обращает на себя внимание следующий факт: в результате первого прохода РКУП долговечность

сплава заметно уменьшается, в то время как у чистого алюминия долговечность повысилась более чем на два порядка.

Таблица 2

Материал	Долговечность, час.				
	N=0	N=1	N=2	N=4	N=8
Al (99.99 %)	4	1070	87	60	60
Al+0.2 % Sc	≈4200	1400	800	38	7

Примечание. Испытания на долговечность для Al 99.99 % при $\sigma=15$ МПа и $T=473$ К; для Al+0.2 wt. % Sc - $\sigma=20$ МПа и $T=473$ К.

Уже отмечалось, что образование областей ИСО связано, возможно, с формированием в процессе РКУП высоких внутренних напряжений. Источником этих напряжений могут быть как частицы второй фазы, так и неравновесные границы зерен и особенно их тройные стыки. Для сплава могут реализоваться оба источника возникновения высоких внутренних напряжений, в то время как для чистого алюминия эти напряжения связаны только с формированием при РКУП неравновесных границ зерен и их тройных стыков. Последнее, очевидно, и приводит к существенно большему образованию нанопор после первого прохода при РКУП в сплаве по сравнению с Al 99.99 %. и, как следствие, к резкому падению долговечности (табл. 2).

О влиянии уровня нанопористости на долговечность говорят также следующие данные. На рис. 6 приведены характерные кривые ползучести алюминия после РКУП и после РКУП и приложения гидростатического давления (1 ГПа) для образцов, полученных после одного прохода. Видно, что дополнительная обработка высоким давлением приводит к увеличению долговечности образцов и снижению скорости ползучести. Очевидно, что общий прирост долговечности образцов связан с залечивающим действием давления на нанопоры. Однако обнаружено, что с увеличением степени деформации эффект прироста долговечности после приложения давления снижается. Анализ полученных результатов показал, что еще одним параметром, который существенно зависит от числа проходов РКУП, является число границ микрочастиц с большими разориентациями – более 15 градусов.

На рис. 7 на примере Al 99.99 % показано, как изменяется долговечность, количество большеугловых границ зерен и интегральный объем нанопор в микрокристаллических образцах в зависимости от степени деформации при РКУП.

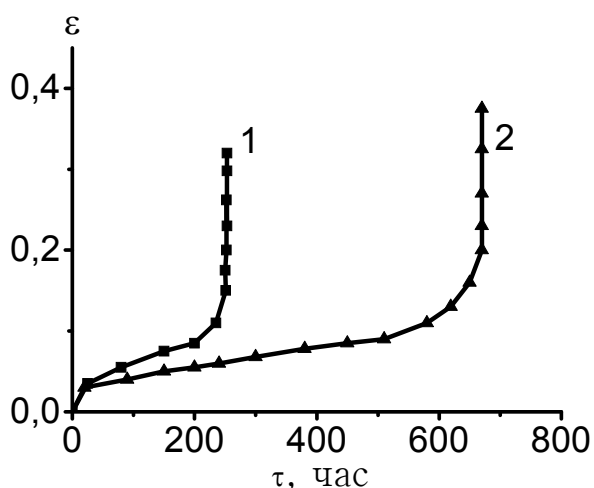


Рис. 6. Кривые ползучести для образцов Al 99.99 %, полученных после одного прохода РКУП, до (1) и после (2) воздействия гидростатического давления 1 ГПа.

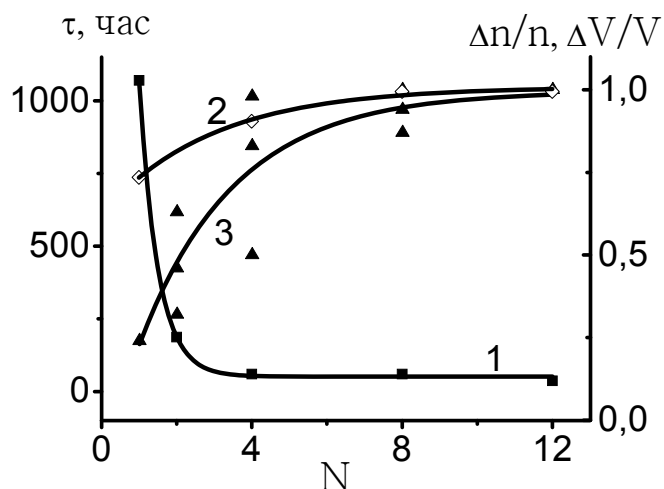


Рис. 7. Зависимость долговечности (1) Al 99.99 %, полного объема пор $\Delta V/V$ (2) и доли большеугловых ($\Theta > 15^\circ$) границ зерен (3) от числа проходов при РКУП.

Падение долговечности в интервале 1 - 4 прохода РКУП, как видно из рис. 7, сопровождается также образованием нанопор и интенсивным увеличением числа границ с большими разориентациями. При дальнейшем увеличении числа проходов РКУП нанопористость и доля большеугловых границ зерен меняется слабо. И долговечность микрокристаллического алюминия уже практически не зависит от степени деформации при РКУП. Анализ данных рис. 7 свидетельствует о связи нанопористости с большеугловыми границами зерен. Действительно, прямые электронно-микроскопические исследования показали, что поры образуются именно в области границ зерен с большими разориентациями.

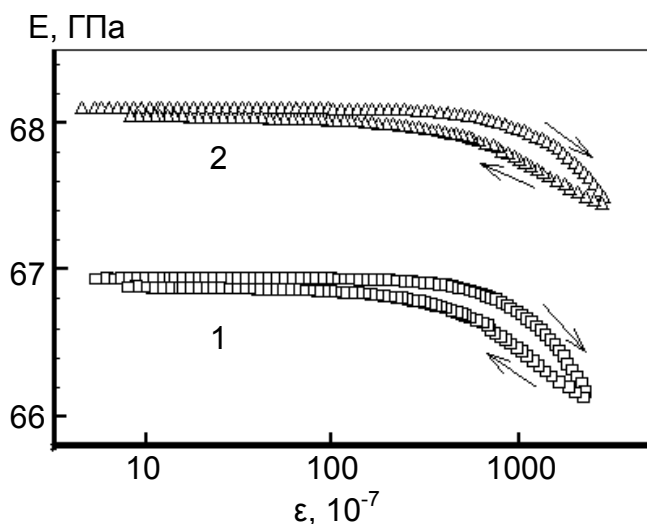


Рис. 8. Амплитудные зависимости модуля Юнга для образцов микрокристаллического Al 99.99% после одного (1) и четырех (2) проходов РКУП.

Уруго-пластические свойства исследованных металлов и сплавов определялись в широком диапазоне амплитуд колебательной деформации. На рис. 8 представлены амплитудные зависимости модуля Юнга для образцов микрокристаллического алюминия (Al 99.99 %) после одного и четырех проходов РКУП. Наблюдаемое изменение модуля Юнга при увеличении числа проходов РКУП

можно объяснить на основании существующих дислокационных моделей следующим образом. Предварительная пластическая деформация за счет введения дополнительных дислокаций ведет к уменьшению модуля упругости материала образца. Значение модуля Юнга для поликристаллического алюминия при комнатной температуре составляет 70 ГПа. Экспериментально полученное значение модуля для образца после одного прохода при РКУ-прессовании V_1 составляет 67 ГПа, то есть полученные данные хорошо согласуются с теорией, объясняющей падение модуля Юнга ростом плотности дислокаций. Однако увеличение степени деформации (четыре прохода при РКУ-прессовании) приводит не к уменьшению, а к увеличению модуля Юнга (68.2 ГПа). В данном случае рост модуля упругости связан, очевидно, с формированием в процессе пластической деформации высоких внутренних напряжений. Действительно, установлено (Кардашев Б.К. и др. // ФТТ. 2004. Т. 46. В. 8. С. 1404.), что на модуль упругости могут существенно влиять (через упругие постоянные высшего порядка) внутренние напряжения, которые ведут к росту модуля E . Появление таких напряжений может быть обусловлено резким увеличением доли большеугловых границ зерен при РКУП (рис. 7).

Известно также (Chaim R., Hefetz M. // J. Mater. Sci. 2009. 34. P. 3057), что на модуль упругости влияет и уровень нанопористости материалов. Действительно, уменьшение нанопористости в образцах микрокристаллического сплава Al+0.2% Sc (8 проходов) за счет воздействия высокого гидростатического давления (1.5 ГПа) привело к закономерному изменению модуля упругости (рис. 9) (напомним, что такое давление не влияет на дислокационную структуру алюминия). Представление полученных результатов в координатах напряжение – неупругая деформация ($\sigma = E \cdot \varepsilon$, $\varepsilon_d = \varepsilon \cdot \frac{E - E_i}{E}$) позволяет оценить изменение условного предела микротекучести (рис. 10). Видно, что после воздействия давления предел микротекучести, определенный в амплитудно-независимой области на уровне $\varepsilon_d = 20 \cdot 10^{-8}$, вырос с 14 до 21.7 МПа. Это увеличение упруго-пластических характеристик также можно связать с различным уровнем нанопористости в исследованных образцах.

В табл. 3 представлены данные по изучению механических свойств образцов технического титана ВТ1-0. Образование микрокристаллической структуры, как видно из данных таблицы 3, ведет к существенному увеличению прочности σ и уменьшению модуля упругости E . При этом для более пористых образцов

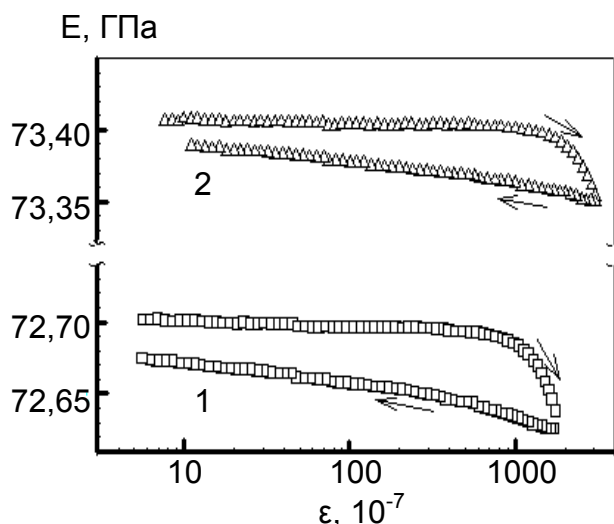


Рис. 9. Амплитудные зависимости модуля Юнга для образцов Al+0.2% Sc (РКУП, N=8), измеренные до (1) и после (2) воздействия гидростатического давления 1.5 ГПа.

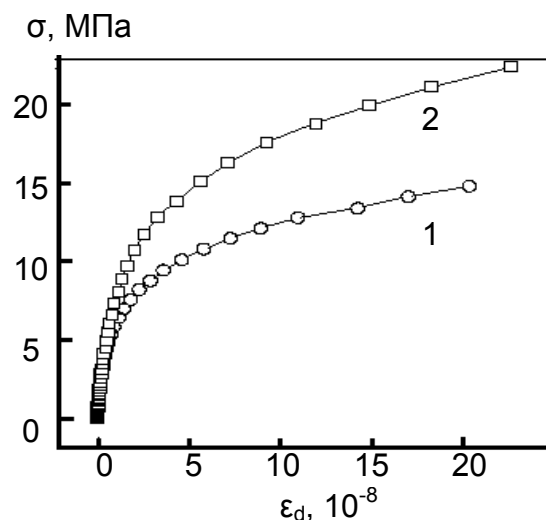


Рис. 10. Диаграммы напряжение - неупругая деформация для образцов Al+0.2% Sc (РКУП, N=8), измеренные до (1) и после (2) воздействия гидростатического давления 1.5 ГПа.

(режим I), наблюдаются минимальные значения модуля Юнга, прочности (σ) и удлинения до разрушения (δ). В работе проанализированы и объяснены особенности влияния режима приготовления и на другие характеристики упруго-пластических свойств титана: декремент колебания и напряжение микропластического течения.

Таблица 3

№	$\Delta\rho/\rho$	σ , МПа	δ , %	E, ГПа
Исх.	-	460	34	108.0
I	$9 \cdot 10^{-3}$	910	13	105.6
II	$6 \cdot 10^{-4}$	930	16	107.8

Полученные экспериментальные данные и их анализ показали, что возможно подобрать оптимальный режим винтовой и продольной прокаток технического титана, который позволяет получить однородную микрокристаллическую структуру с высокими характеристиками прочности и упруго-пластических свойств.

Таким образом, при создании микрокристаллической структуры методами ИПД необходимо учитывать формирование наноразмерной пористости, которая, как показано, влияет на долговечность, прочность и упруго-пластические свойства материалов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ.

1. Обнаружено, что в процессе интенсивной пластической деформации в металлах и сплавах образуются области избыточного свободного объема, в предельном случае — нанопоры. Их средние размеры – порядка десятка нанометров, а объемная доля зависит от режима и степени ИПД.
2. Установлено, что увеличение числа проходов при равноканальном угловом прессовании ведет к уменьшению долговечности микрокристаллического алюминия и его сплавов. Обнаружена тесная связь эффекта снижения долговечности с увеличением степени деформации при РКУП, нанопористости и формированием границ зерен с большими разориентациями ($\Theta > 15^\circ$).
3. Показано, что уменьшение уровня нанопористости за счет ее залечивания под действием высокого гидростатического давления или применения противодействия в процессе РКУП ведет к увеличению долговечности и вносит вклад в повышение других характеристик механических свойств микрокристаллических металлов и сплавов.
4. Установлено, что ИПД влияет на упруго-пластические свойства исследованных металлов и сплавов, в частности, ведет к уменьшению их модуля упругости. При этом, как показано, в падение модуля Юнга вносит вклад и образование нанопористости. Обнаруженное некоторое повышение модуля E при РКУП можно объяснить только образованием высоких внутренних напряжений.

Основные публикации по теме работы.

1. Бетехтин, В.И. Влияние числа проходов при равноканальном угловом прессовании на упруго-пластические свойства, долговечность и дефектную структуру сплава Al + 0.2 wt. % Sc [Текст] / В.И. Бетехтин, А.Г. Кадомцев, М.В. Нарыкова [и др.] // ФТТ.- 2010.- Т. 52.- Вып. 8.- С. 1517-1523.
2. Бетехтин, В.И. Упруго-пластические свойства и дефектная структура ультракристаллического алюминия и его сплавов [Текст] / В.И. Бетехтин, Б.К. Кардашев, М.В. Нарыкова // Санкт-Петербургские Политехнические ведомости. Сер. физ.-мат. науки.- 2010.- 4 (109).- С. 104-113.
3. Бетехтин, В.И. Исследование структуры микрокристаллических металлов и сплавов методом малоуглового рентгеновского рассеяния [Текст] / В.И. Бетехтин, А.Г. Кадомцев, М.В. Нарыкова [и др.] // Актуальные проблемы прочности: Тр. XLIII Межд. конф. (Витебск, 2004 г.).- Ч.1.- ВГТУ, 2004.- С. 18-22.

4. Бетехтин, В.И. Долговечность, упругость и неупругость микрокристаллического Al, полученного по технологии равноканального углового прессования [Текст] / В.И. Бетехтин, А.Г. Кадомцев, М.В. Нарыкова [и др.] // Актуальные проблемы прочности: Сб. тезисов XLIV Межд. конф. (Вологда, 2005 г.).- Ч.1.- ВГТУ, 2005.- С.3.
5. Бетехтин, В.И. Нанопористость и долговечность микрокристаллического Al с разной деформационной предысторией [Текст] / В.И. Бетехтин, А.Г. Кадомцев, М.В. Нарыкова [и др.] // XVI Петербургские чтения по проблемам прочности, 2006 г.: С-Пб, 2006.- С. 228.
6. Бетехтин, В.И. Эволюция микроскопических пор и трещин и механические свойства металлических материалов [Текст] / В.И. Бетехтин, А.Г. Кадомцев, М.В. Нарыкова // Современные металлические материалы, технологии и их использование в технике: Матер. 7^{ой} Межд. науч.-техн. конф.- С.-Пб, 2006.- С.216.
7. Бетехтин, В.И. Влияние интенсивной пластической деформации на дефектную структуру и механические свойства ультракристаллического алюминия и сплава на его основе [Текст] / В.И. Бетехтин, А.Г. Кадомцев, М.В. Нарыкова [и др.] // Актуальные проблемы прочности: Материалы XLVI Межд. конф. (Витебск, 2007 г.).- Ч.1.- Витебск: ВГТУ, 2007.- С. 7-11.
8. Бетехтин, В.И. Особенности влияния числа проходов при равноканальном угловом прессовании (РКУП) на долговечность и упруго-пластические свойства алюминия и его сплава [Текст] / В.И. Бетехтин, А.Г. Кадомцев, М.В. Нарыкова [и др.] // Физика прочности и пластичности материалов: Сб. тезисов XVII Межд. конф. (Самара, 2009 г.).- Самара, 2009.- С.8.
9. Бетехтин, В.И. Особенности структуры и механические свойства субмикрокристаллического титанового сплава BT1-0, полученного в результате интенсивной пластической деформации при винтовой и продольной прокатке [Текст] / В.И. Бетехтин, А.Г. Кадомцев, М.В. Нарыкова [и др.] // Nanotechnologies of functional materials: Тр. Межд. науч.-техн. конф., 2010 г. С-Пб.: Изд-во СПбГПУ, 2010.- С. 176-177.
10. Бетехтин, В.И. Влияние высокого гидростатического давления на структуру и механические свойства алюминия и его сплава, подвергнутых РКУ-прессованию [Текст] / В.И. Бетехтин, А.Г. Кадомцев, М.В. Нарыкова [и др.] // Актуальные проблемы прочности: Сб. материалов 50-й Межд. симпозиума (Витебск, 2010 г.).- Ч. 1.- Витебск: ВГТУ, 2010.- С. 183.