

ОБЪЕМНЫЕ НАНОСТРУКТУРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ: УНИКАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ



*Р.З. Валиев,
доктор технических наук,
директор Института физики
перспективных материалов
Уфимского государственного
авиационного технического
университета*



*О.Б. Наймарк,
доктор физико-
математических наук,
заведующий лабораторией
физических основ прочности,
Институт механики сплошных
сред УрО РАН*

Недавние открытия в области уникальных свойств объемных наноматериалов, необычных механизмов деформации и фазовых превращений являются фундаментом разработок и применения объемных наноматериалов в качестве функциональных и конструкционных материалов нового поколения. В настоящее время исследования и разработки по объемным наноматериалам находятся на стадии перехода от лабораторных изысканий к практическому применению. Это подтверждается созданием новых схем и технологий получения объемных наноматериалов с использованием интенсивных пластических деформаций и широким вовлечением в исследования не только модельных материалов, но и промышленных сплавов и сталей. Исследования в области объемных наноматериалов, начатые в России в 90-х годах, в настоящее время получили широкое международное признание и развитие. Широкая география проводимых работ, динамика роста исследований, наиболее высокие рейтинги научных публикаций (www.scientific.ru) показывают, что данная тематика является одним из наиболее важных направлений современного наноматериаловедения и нанотехнологий.

ВВЕДЕНИЕ

Физические свойства твердотельных нано- и мезоструктурных сред открывают исключительные перспективы в электронике, медицине, разнообразных технических приложениях, например, в аэрокосмическом комплексе. Актуальность данных исследований для приложений в авиакосмическом комплексе связана с переходом к новому поколению газотур-

бинных двигателей, для которых необходимы конструкционные материалы, имеющие на 20 % более высокие прочность и твердость, на 50 % более высокую вязкость разрушения и вдвое большую износостойкость. Натурные испытания показывают, что использование в газовых турбинах нанокристаллических жаропрочных сплавов обеспечивает, по

меньшей мере, половину требуемого повышения свойств. Исключительный интерес представляет исследование закономерностей деформирования и разрушения наноструктурных твердотельных инертных и энергетических материалов при динамических и ударно-волновых нагрузках в связи с особенностями формирования и распространения ударно-волновых фронтов.

Известные практические приложения наноструктурных материалов основаны на специфике их свойств, существенно отличающихся от характеристик тех же материалов в моно- и поликристаллическом, а также в аморфном состояниях. Важнейшей чертой нынешнего этапа развития технологии и использования наноструктурных материалов является пере-

ход от стадии накопления данных и их эмпирической обработки к стадии управляемого получения и использования субмикроструктурных структур разнообразных металлов и сплавов. Это стало возможным после анализа механизмов, лежащих в основе физики наноструктурного состояния. Необычные свойства этих материалов обусловлены как особенностями отдельных зерен, так и их коллективным поведением, зависящим от характера взаимодействия между зернограничными дефектами. Специфика этого взаимодействия заключается в особом состоянии границ зерен, обладающих выраженными признаками неравновесности, повышенной энергией, длинно-корреляционными взаимодействиями.

ОБЪЕМНЫЕ НАНОСТРУКТУРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ: ОСОБЕННОСТИ МИКРОСТРУКТУРЫ И ОСНОВНЫЕ КОНЦЕПЦИИ

Физические свойства объемных наноструктурных материалов обусловлены большой развитостью и протяженностью межзеренных границ раздела, которые при размере зерна от 10 до 100 нм содержат от 10 до 50 % атомов нанокристаллического твердого тела. Таким образом, переход к объемному наноструктурному состоянию сопровождается выраженными размерными эффектами, под которыми понимается комплекс явлений, связанных с изменением свойств вещества вследствие изменения размеров частиц и одновременного возрастания роли зернограничных дефектов. Наноструктурные материалы, получаемые методами интенсивной пластической деформации, представляют собой особый случай неравновесного твердотельного состояния, обусловленного коллективным поведением зернограничных дефектов в условиях длинно-корреляционного взаимодействия, что характерно для неравновесных критических систем.

Существуют две проблемы фундаментального характера применительно к объемным наноструктурным материалам:

– формирование объемного субмикро- и наноструктурного состояния, в том

числе при интенсивных пластических деформациях;

– описание свойств объемных нанокристаллических материалов.

Решение этих проблем предполагает объединение подходов механики и физики деформируемого твердого тела, современных методов структурного анализа при исследовании коллективного поведения ансамблей дислокационных субструктур на широком спектре пространственных масштабов при зеренной фрагментации и исследование свойств ансамбля зернограничных дефектов применительно к особенностям релаксации, закономерностям разрушения, термодинамики материалов в объемном наноструктурном состоянии. При этом ключевым является вопрос о том, существует ли резкая граница между объемным состоянием обычного поликристаллического вещества и объемным наноструктурным состоянием. Ответ на этот вопрос может быть получен на основе описания коллективного поведения ансамбля зернограничных дефектов, разработки термодинамики существенно неравновесного состояния данной мезоскопической системы.

Спектр уникальных свойств объемных наноструктурных материалов может быть исследован и использован в приложениях при решении фундаментальных проблем получения этих материалов, описания комплекса свойств при переходе от обычного поликристаллического к объемному нанокристаллическому состоянию; построения адекватных моделей механического поведения, отражающих закономерности перехода от квази-хрупкого к

вязкому и субмикроструктурному состояниям; использования экспериментальных методов и методов структурного анализа, позволяющих изучить роль многомасштабности (временной и пространственной) коллективных явлений в ансамблях мезодефектов при создании субмикроструктурной структуры и формировании свойств материалов в объемном наноструктурном состоянии.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ОБЪЕМНЫХ НАНОСТРУКТУРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

После пионерских работ начала 80-х годов Г. Гляйтера [9] с сотрудниками и И.Д. Морохова с соавторами [3], продемонстрировавших возможность синтеза объемных наноматериалов, в последующих исследованиях выработаны два основных подхода к их получению.

Первый подход, так называемый «снизу-вверх» («bottom-up approach»), включает компактирование порошков, получаемых различными способами (ультрадисперсные порошки, полученные газовой конденсацией в атмосфере инертного газа или плазмохимическим методом, аэрозольным и химическим синтезом, а также измельчением порошков в шаровой мельнице и др.). Некоторые из этих методов были успешно использованы для создания объемных наноструктурных материалов и явились основой многочисленных исследований структуры и свойств нанокристаллических и нанофазных материалов. Вместе с тем существующие проблемы в развитии данных методов, связанные с сохранением некоторой остаточной пористости при компактировании, загрязнением образцов при подготовке порошков или их консолидации, являются основными усложняющими причинами при практическом использовании данных методов.

Второй подход, предложенный российскими исследователями и получивший название «сверху-вниз» («top-down approach»), включает методы обработки, использующие формирование наноструктур в массивных металлических образцах

и заготовках путем измельчения их микроструктуры до наноразмеров с применением интенсивной пластической деформации (ИПД), или взрывной обработкой. Методы ИПД могут обеспечить формирование наноструктур в различных металлических материалах, однако характер формирующейся структуры (получаемый размер и форма зерен, преобладающий тип границ раздела, фазовый состав и т.д.) зависит от применяемого метода ИПД, режимов обработки, фазового состава и исходной микроструктуры исследуемого материала. Создание таких наноструктур может быть осуществлено методами ИПД, позволяющими достичь очень больших пластических деформаций при относительно низких температурах в условиях высоких приложенных давлений (специальные схемы пластического деформирования, такие как интенсивное кручение под высоким давлением, равноканальное угловое (РКУ) прессование).

Способ РКУ-прессования, реализующий деформацию массивных образцов простым сдвигом, был разработан В.М. Сегалом [5] и развит в 90-х годах Р.З. Валиевым [1] для получения структур с субмикроструктурным и нанометрическим размером зерен. Суть метода РКУ-прессования заключается во множественном продавлиании заготовки через два канала одинакового сечения, пересекающихся под углом 90 градусов. В случае труднодеформируемых материалов деформация осуществлялась при повышенных температурах. Методы интен-

сивной пластической деформации (ИПД) могут обеспечить формирование наноструктур в различных материалах, однако получаемый размер зерен и характер формирующейся структуры зависят от применяемого метода ИПД, режимов обработки, фазового состава и исходной микроструктуры материала. ИПД приводит к формированию ультрамелкозернистых (УМЗ) неравновесных структур, для которых характерно присутствие высоких плотностей решеточных и зернограничных дефектов, формирующих дальнедействующие поля упругих напряжений. Это обстоятельство позволяет рассматривать наноструктурное состояние как метастабильное. В связи с этим значительное внимание уделяется исследованию устойчивости нанокристаллического состояния к внешним воздействиям – температуре и напряженно-деформированному состоянию. Установлено, что эволюция структуры при нагреве различных наноструктурных материалов имеет ряд общих закономерностей, основными из которых являются уменьшение дальнедействующих полей напряжений и упругих искажений кристаллической решетки в результате структурного возврата неравновесных границ зерен. При этом формируется поликристаллическая структура с очень малым размером зерен и стадия зародышеобразования практически отсутствует (гомогенная нуклеация). Пластическая деформация наноструктурных материалов часто приводит также к изменению исходного наноструктурного состояния, причем характер этих изменений определяется схемой и условиями деформации.

Установлено, что большие объемные наноструктурные образцы и заготовки могут быть получены методами ИПД из самых различных металлов и сплавов, включая многие промышленные сплавы и интерметаллиды. В чистых металлах и ряде сплавов интенсивные пластические деформации обеспечивают формирование ультрамелкозернистых структур с размером зерен 100–200 нм и менее.

Перспективным является также метод формирования объемных наноструктур в интенсивных волновых полях пластиче-

ской деформации при реализации специальных режимов ударно-волнового нагружения, обеспечивающих многомасштабную зеренную фрагментацию при возбуждении автомодельных режимов распространения волновых пластических фронтов (структурированные волновые фронты [4]). Предлагаемый метод ударно-волновой обработки материалов с целью формирования наноструктурного состояния обладает рядом преимуществ по сравнению с вышеприведенными методами. Эти преимущества обусловлены спецификой формирования пластических волновых фронтов и ролью эволюции дислокационной субструктуры на пространственном масштабе волнового фронта. Учитывая автомодельную природу пластического фронта ударной волны, на котором развивается структурно-скейлинговый переход в дислокационных субструктурах, следует ожидать возможность структурной фрагментации труднодеформируемых жаропрочных сплавов. Это может быть обусловлено двумя причинами: резонансным возбуждением локализованной пластической деформации и высокими значениями давления на фронте ударной волны. Высокие давления в сочетании с интенсивной пластической деформацией позволяют решить также важнейшую проблему уменьшения объемной концентрации пористости, что актуально для материалов, полученных методами порошковой и гранульной технологии.

Достижение больших пластических деформаций ассоциируется с проявлением новых, не типичных для обычных деформаций, стадий деформационного упрочнения, измельчением микроструктуры, формированием ячеистой структуры, изменением структуры и свойств внутренних поверхностей раздела (зернограничных дефектов). Многостадийность деформационного упрочнения обусловлена глубокими изменениями в микроструктуре, происходящими при ИПД: изменением размера зерен-ячеек, угла разориентировки между ними, толщины поверхности раздела, плотности дислокаций.

Выполненные исследования показыва-

ют, что ИПД сопровождаются выраженными коллективными процессами в дефектной (дислокационной) подсистеме, формированием многомасштабных пространственно-временных (фрагментированных) структур. Возникновение фрагментированной структуры является следствием структурной неустойчивости ансамбля дислокаций, повышением роли «конфигурационных» эффектов.

При изучении физики нанокристаллического состояния одним из главных является вопрос о том, существует ли резкая граница между объемным состоянием обычного поликристаллического вещества и наноструктурным состоянием, т.е. существует ли некоторый критический размер зерна, ниже которого проявляются свойства, характерные для нанокристаллического агрегата. Возможна также «термодинамическая» постановка проблемы: имеет ли переход от обычного поликристаллического вещества к нанокри-

сталлическому признаки фазового перехода первого рода. Этот вопрос, по-видимому, является одним из центральных. Спектр уникальных свойств наноструктурных материалов может быть исследован и использован в приложениях при решении указанных фундаментальных проблем.

Таким образом, наряду с несомненным прогрессом в разработке методов получения объемных наноструктурных материалов в интенсивных полях пластической деформации и исследовании роли дислокационных субструктур, до настоящего времени открытыми являются вопросы о закономерностях перехода от обычного поликристаллического к объемному нанокристаллическому состоянию, природе нарушения закона Холла–Петча, качественного изменения релаксационных свойств, закономерностей разрушения, аномалий диффузии.

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИННОВАЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА

Фундаментальные исследования в области физики мезоскопических систем с дефектами позволили установить новый класс критических явлений, обусловленных коллективными свойствами ансамблей дефектов, – структурно-скейлинговые переходы, и предложить объяснение особенностей поли- и объемного нанокристаллического состояния. Особенностью установленных критических явлений для неравновесных систем с дефектами является существование дополнительного параметра порядка – параметра структурного скейлинга, зависящего от масштабных характеристик среды, взаимодействия между дефектами, обнаруживающими длинно-корреляционный характер в ходе структурно-скейлинговых переходов в дислокационных субструктурах различного пространственного масштаба. Предложенная на основе статистического описания термодинамика и феноменология данных систем явилась обобщением подхода Гинзбурга–Ландау и позволила уста-

новить качественно-различную динамику структурно-скейлинговых переходов, связанную с типами коллективных мод ансамблей дефектов, характерных для квазихрупкого, вязкого (пластического) и объемного нанокристаллического состояний [7].

Теоретические исследования сопровождались экспериментами на специально создаваемом оборудовании, позволяющем изучение нелинейного поведения материалов, обусловленного мезодефектами, в широком диапазоне интенсивностей воздействия (квазистатическом, усталостном, динамическом и ударно-волновом режимах нагружения). Современные системы высокого пространственного и временного разрешения (доплеровский интерферометр VISAR, инфракрасная камера CEDIP, установка акустической эмиссии) использовались для регистрации переменных, позволяющих идентифицировать термодинамические и кинетические параметры развиваемых моделей. Данные

эксперименты дополнялись структурными исследованиями (New View-профилометрия высокого разрешения, рис. 1, сканирующая микроскопия, инфракрасное сканирование, рис. 2), позволившими связать автомодельные закономерности в поведении динамических переменных в процессе деформирования и особенности структурного скейлинга – коррелированного поведения деформационных текстур, формируемых мезодефектами в процессе нагружения.

тенсивные воздействия, локализованные на определенных масштабах, приводят к эффектам резонансного возбуждения волн локализованной пластичности, обладающих слабым затуханием, на фронте которых реализуются эффекты структурной фрагментации, сопровождающиеся формированием субмикроструктурной фазы. Данные особенности распространения волн локализованной пластичности и их воздействия на структуру были использованы для разработки схем

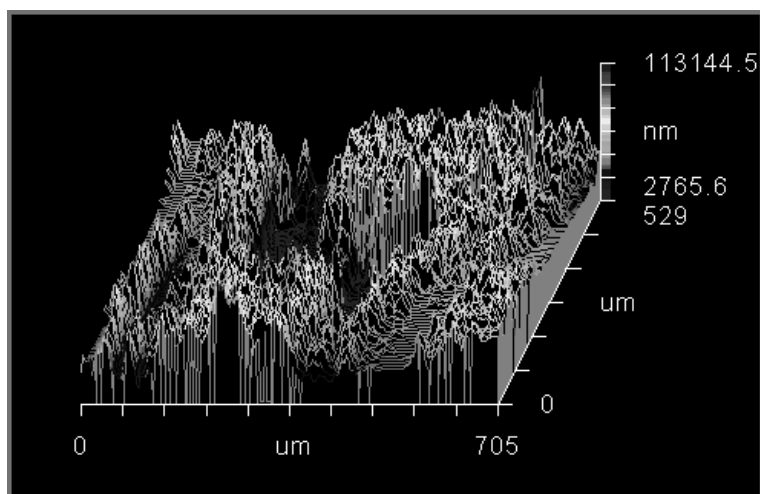


Рис. 1. 3D New View-профилометрия поверхности образцов при формировании полос локализованного сдвига

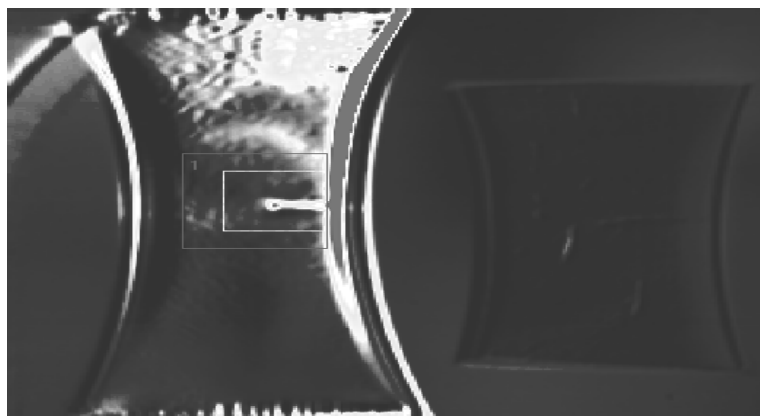


Рис. 2. Инфракрасное сканирование поверхности образцов при циклическом нагружении

В соответствии с выводами об автомодельной природе пластических фронтов проведено теоретическое и экспериментальное исследование возможности резонансного возбуждения автомодельных волновых пластических фронтов при соответствующих параметрах нагружающего импульса с целью структурной фрагментации материала. Показано, что ин-

ударно-волнового нагружения, обеспечивших интенсивную пластическую деформацию и структурную зеренную фрагментацию значительных объемов материала.

Последняя реализуется как следствие формирования сильно разориентированной и фрагментированной структуры. Идея метода формирования субмикрок-

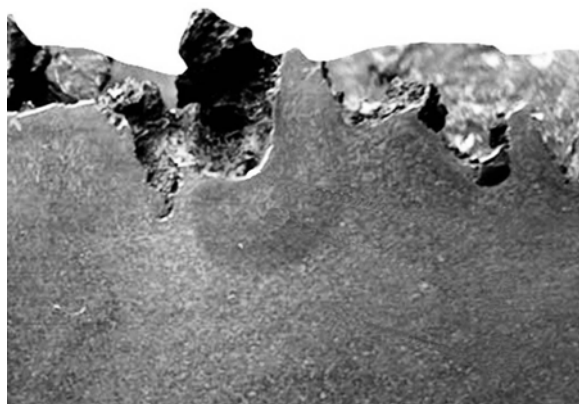
ристаллической структуры в локализованных волновых полях пластической деформации явилась результатом исследований закономерностей формирования автомодельных пластических фронтов при ударно-волновом нагружении. Ударно-волновое нагружение массивных цилиндрических образцов армо-железа пространственно-локализованными импульсами давления, инициированными ускоряемой профилированной тонкой медной пластиной, подтвердило выраженный эффект зеренной фрагментации.

Структурный анализ образцов-мишеней в сечении в направлении распространения волны, проведенный с использованием New View-5000, обнаружил множественные зоны деформации, разделенные волновыми фронтами, что подтвердило резонансный характер инициирования пластических волн и их связь со структурно-скейлинговыми переходами в дислокационных субструктурах разного масштабного уровня (рис. 3, а).

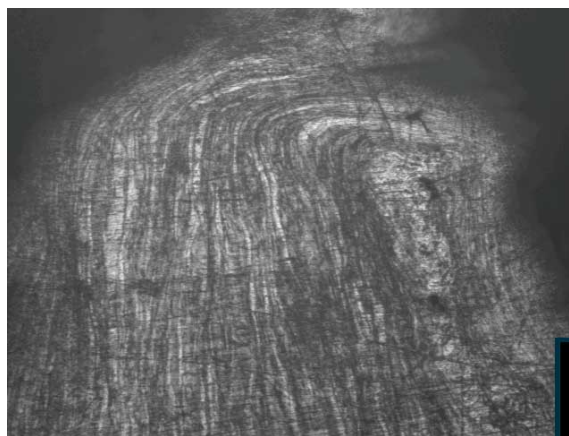
Установленная фрагментация структуры связывается с интенсивной сдвиговой деформацией в волновых фронтах, представляющих собой область ориентационно-скейлингового перехода в ансамбле дислокационных субструктур, формирующего макроскопическую сдвиговую кинематическую моду (рис. 3, б). С автомодельной природой волнового пластического фронта связывается слабое затуха-

ние волны пластичности, обеспечивающее эффект фрагментации значительных объемов материала.

Установленная связь коллективных мод ансамблей мезодефектов с механизмами релаксации и разрушения явилась стимулом для проведения экспериментальных исследований поведения материалов при циклических (многоцикловая усталость) и динамических нагружениях (в условиях теста Гопкинсона–Кольского и модифицированного теста Тейлора), сопряженных с инфракрасным сканированием и последовательным изучением морфологии структуры на основе данных 3D-New View-профилометрии. Исследование фазовых портретов полей диссипации на поверхности циклически нагружаемых образцов, рельефа, обусловленного локализованными сдвигами, и последующий анализ с использованием характеристик динамического и пространственного скейлинга (корреляционные индексы, показатели Херста) позволили получить количественные данные о гистерезисных явлениях, локализации разрушения, предвестниках зарождения макроскопических трещин, особенностях их распространения. Представляет интерес применение развитых методов для анализа поведения объемных нанокристаллических материалов в условиях усталости и динамического нагружения.



а



б

Рис. 3. Структура армо-железа, подвергнутого ударно-волновому нагружению

ИССЛЕДОВАНИЯ ПУТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ СВОЙСТВ НАНОСТРУКТУРНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДАМИ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Известно, что измельчение зерен способствует увеличению твердости и прочности металлических материалов. Поэтому ожидается, что ультрамелкозернистые материалы должны обладать наиболее высокой прочностью. Более того, введение высокой плотности дислокаций в наноматериалы, полученные с помощью ИПД, может привести к еще большему их упрочнению. Однако обычно все это снижает пластичность. Прочность и пластичность, как правило, являются противоположными характеристиками. Материалы могут быть прочными или пластичными, но обычно не обладают обоими свойствами одновременно. Вместе с тем недавние исследования показали, что наноструктурирование материалов может привести к уникальному сочетанию особо высокой прочности и пластичности (рис. 4). Однако решение этой проблемы требует разработки оригинальных подходов.

Новые подходы основаны на формировании «бимодальных» структур, состоящих из микронных зерен (с объемной

долей ~ 25 %), окруженных зернами нанометрических размеров. Материал не только продемонстрировал высокую пластичность, но и сохранил прочность. Такое поведение материала может быть объяснено тем, что пока нанокристаллические зерна обеспечивают прочность, зерна большего размера отвечают за деформацию растяжением. Результаты, подтверждающие эффективность формирования «бимодальной» структуры, были получены при исследовании цинка, меди и алюминиевого сплава. Исследования меди показали, что такой тип структуры может повысить пластичность не только в процессе испытаний на растяжение, но также и в процессе циклического нагружения. Это наблюдение весьма важно для повышения усталостных свойств.

Второй подход к решению проблемы достижения высокой прочности и пластичности основан на образовании дисперсных частиц вторичных фаз в наноструктурной металлической матрице, которые видоизменяют распространение полосы скольжения в процессе деформации, таким образом, увеличивая пластичность. В настоящее время уже начаты систематические исследования влияния природы частиц вторичных фаз, изменения их размеров и распределения на механические характеристики промышленных НС сплавов, с тем чтобы оптимизировать технологические режимы их обработки и получения.

Третий подход к решению проблемы достижения высоких значений прочности и пластичности является наиболее универсальным, потому что его можно использовать как для чистых металлов, так и для сплавов. Он основан на формировании УМЗ структуры с определенными типами границ зерен. Установлено, что формирование большеугловых и неравновесных границ может обеспечивать процессы межзеренного проскальзывания в процессе пластической деформации уже при комнатной температуре, сильно

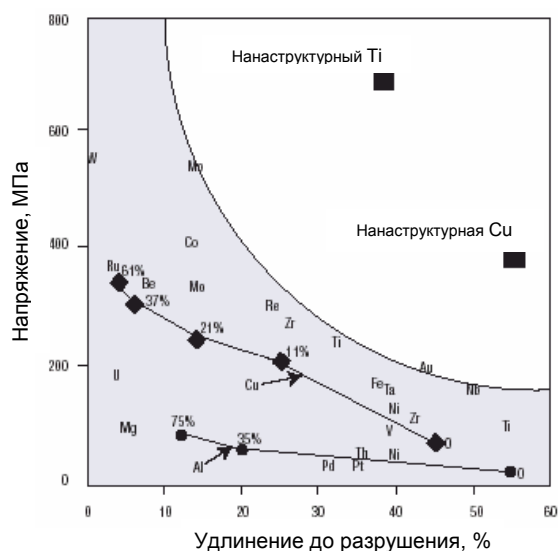


Рис. 4. Обнаружение необычного сочетания прочности и пластичности в НС меди и титане в сравнении с крупнозернистыми аналогами, а также алюминием и медью после обычной холодной прокатки, которая повышает их предел текучести, но уменьшает пластичность (приведены две линии, показывающие эту тенденцию в меди и алюминии после прокатки на различные степени деформации)

влияя на деформационную способность материала.

Важность структуры большеугловых границ зерен (ГЗ) была также подтверждена при исследовании механического поведения металлов, подвергнутых различной степени ИПД, что обеспечило формирование ГЗ разного типа. Исследования наноструктурного титана показали, что помимо степени деформации, большое влияние на состояние ГЗ и механическое поведение оказывает температура отжига. Так, отжиг при 300 °С приводит к значительному увеличению прочности одновременно с большей пластичностью, по сравнению с состоянием после ИПД и отжига при более высоких температурах. Рост прочности и пластичности в данном эксперименте связан с повышенной скоростной чувствительностью.

Создание наноструктур в материалах с целью увеличения их прочности и пластичности имеет первостепенное значение для повышения их сопротивления усталости и трещиностойкости. В наноматериалах наблюдается необычное увеличение как малоциклового, так и многоциклового усталости, и здесь существуют теоретическое объяснение и первые экспериментальные доказательства этого интересного феномена. Обнаруженное повышение усталостной прочности в наноструктурных материалах вполне ожидаемо и имеет много общего с влиянием размера зерна/субзерна на напряжение течения,

которое выражается соотношением Холла–Петча. При этом очевидно, что границы зерен также играют существенную роль в усталостном поведении таких материалов. С одной стороны, ГЗ могут быть эффективными барьерами для развития процессов скольжения, тем самым способствуют повышению напряжения течения. Поэтому управление свойствами ГЗ позволяет управлять свойствами материала, в том числе усталостными. Например, улучшения усталостных характеристик НС титана можно добиться за счет повышения пластичности в сочетании с высокой прочностью, путем варьирования параметров проводимой после ИПД термомеханической обработки.

Интересен тот факт, что формирование УМЗ структуры в материалах, полученных при ИПД, может также привести к появлению многофункциональных свойств. Например, наноструктурный сплав никелида титана демонстрирует необычное сочетание высоких механических и функциональных свойств: сверхупругости и эффекта памяти формы. Подобное сочетание делает этот наноструктурный сплав титана в принципе отличным от его традиционного крупнозернистого аналога. Формирование многофункциональных материалов становится новым направлением в науке о наноматериалах, полученных ИПД.

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В РАСШИРЕНИИ ОБЛАСТИ ПРИЛОЖЕНИЙ ОБЪЕМНЫХ НАНОСТРУКТУРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Поиски путей улучшения комплекса свойств объемных НС металлов и сплавов весьма важны для их перспективных применений, так как рынки для их использования существуют фактически в каждой отрасли промышленности, где высокие механические свойства (в особенности прочность, удельная прочность и усталостная долговечность) являются решающими. Анализ, проведенный компанией «Металликум», специализирующейся на внедрении наноматериалов, показал существование свыше 100 специ-

фичных рынков их применения, предназначенных для авиационно-космической отрасли, транспорта, медицинских приборов, спортивных товаров, пищевых продуктов, химического производства, электроники и оборонной отрасли [10].

Одним из перспективных направлений, развиваемых сегодня, является разработка особо прочных наноструктурных легких сплавов (алюминия, титана и магния), предназначенных для энергетики, автомобильной и авиационно-космической промышленности.

В недавних исследованиях было показано, что достижение нового уровня свойств промышленных алюминиевых сплавов возможно при применении ИПД в сочетании с традиционными видами термической и/или термомеханической обработки и реализацией за счет этого дополнительных механизмов их упрочнения, таких как твердорастворное и дислокационное упрочнение, а также упрочнение, вызванное дисперсными выделениями вторых фаз, – дисперсионное твердение. Так, в работе [2] показано, что используя обработку ИПД, осуществленную РКУП, в сочетании с изотермической прокаткой, можно получать заготовки в виде листов из термически неупрочняемого сплава 1560 системы Al-Mg-Mn с уровнем предела текучести и прочности 540 и 635 МПа, соответственно, аналогичным наблюдаемому в высокопрочных термически упрочняемых алюминиевых сплавах системы Al-Mg-Zn-Cu в состоянии максимального упрочнения. Также была исследована возможность дополнительной обработки заготовок термически упрочняемого сплава АА6061, подвергнутых РКУП, старению и холодной прокатке. Установлено, что в результате такой комбинированной обработки предел текучести и предел прочности заготовок сплава достигает, соответственно, 475 и 500 МПа, а относительное удлинение до разрушения составляет 8 %. В обоих исследованных УМЗ сплавах прочностные свойства превышали на 30-50 % аналогичные свойства сплавов после традиционно используемых методов обработки, а пластичность оставалась на достаточно высоком уровне. Аналогичный прирост прочности при сохранении пластичности демонстрирует и УМЗ жаропрочный алюминиевый сплав АК4-1 после обработки РКУП и последующего старения, как при комнатной, так и при повышенной температуре ~ 150°C – температуре эксплуатации. На примере алюминиевого сплава 5083 было показано, что оптимизированные режимы термической обработки, проводимой после РКУП, позволяют сформировать УМЗ состояние, обеспечивающее формирование в материале уни-

кального комплекса свойств. При сохранении высокой прочности характеристики пластичности и трещиностойкости обработанного ИПД материала повышаются почти в 2 раза и достигают уровня, характерного для исходного крупнозернистого состояния.

В настоящее время одновременно с исследованиями ведется интенсивная работа, направленная на получение изделий из УМЗ алюминиевых сплавов, таких как авиационный крепеж, а также пилотных изделий для авиационной промышленности. Ведется разработка металлов и сплавов с УМЗ строением, работающих при криогенных температурах [6]. Активно проводятся исследования, направленные на получение и использование наноструктурных материалов для авиационных двигателей нового поколения [11], а также при изготовлении деталей сложной конфигурации в условиях сверхпластичности [12].

Из широкого спектра возможных применений наноструктурных металлов особое внимание уделяется медико-биологическим имплантатам и приборам. Высокие прочностные и усталостные свойства являются основными техническими требованиями металлических медико-биологических материалов, в особенности титана и его сплавов, которые имеют отличную биологическую совместимость и высокие биомеханические свойства. Например, для вправления костей целесообразно использование пластин и дисков, полученных из наноструктурного титана, а также хирургических инструментов. Эти изделия наряду с высокой прочностью должны иметь высокую способность сопротивляться изгибу и достаточную пластичность. Были проанализированы различные конструкции имплантантов для соединения костей. Это привело к конструированию и разработке серии наноструктурных титановых имплантантов (рис. 5).

К настоящему времени выявлены важные преимущества наноструктурного титана – высокая статическая прочность ($\sigma_B \geq 1000$ МПа) и сопротивление усталости (более чем 500 МПа при 2×10^7 цик-

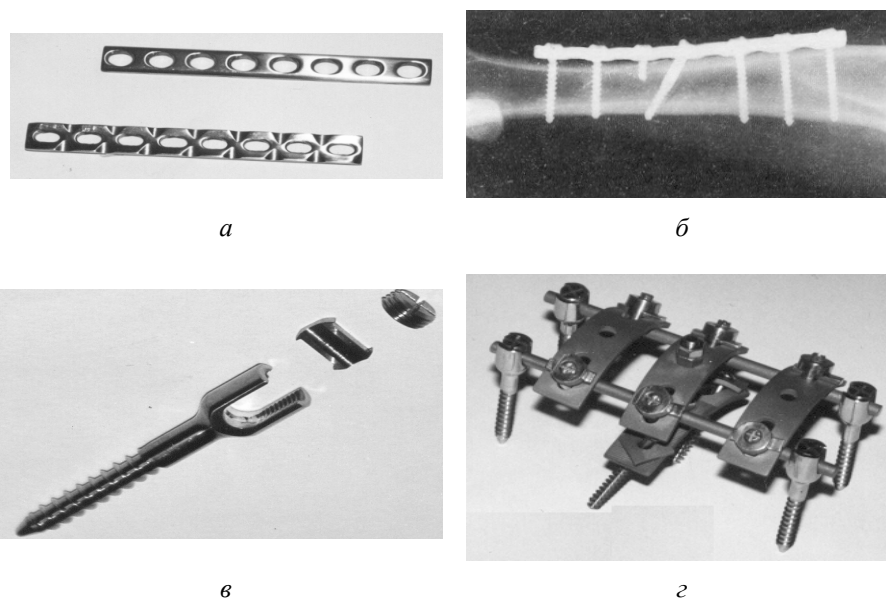


Рис. 5. Медицинские имплантанты, изготовленные из наноструктурного титана: а, б – имплантанты для остеосинтеза, в – конусообразный винт для выправления позвоночника, г – устройство для коррекции и восстановления позвоночника

лах) и отличная биологическая совместимость.

Большие перспективы применения ИПД для повышения механических и функциональных свойств выявлены для группы металлических сплавов с термупругими мартенситными превращениями и эффектами памяти формы (ЭПФ), среди которых особенно выделяются сплавы никелида титана – TiNi (нитинол). Эти сплавы имеют большой потенциал для применения в технике и медицине, в качестве имплантируемых в организм и длительно функционирующих материалов [8].

Титан и титановые сплавы интенсивно используются в настоящее время в качестве материалов для имплантантов в травматологии и ортопедии. Это является следствием ряда свойств, в первую очередь, биологической совместимости, вы-

сокой коррозионной стойкости и высокой прочности в сравнении с другими материалами.

Второй пример высокого инновационного потенциала – возможность сверхпластической обработки легких сплавов, полученных методом ИПД, при изготовлении изделий сложной формы и обладающих высокой прочностью. Это является перспективным для широких приложений в аэрокосмическом комплексе, автомобилестроении.

Третье инновационное направление лежит в области использования УМЗ материалов и изделий из них при экстремально низких температурах (в арктических условиях, приложения для нефте- и газодобывающей промышленности). Эти приложения УМЗ материалов могут быть достаточно эффективны, и результаты могут быть достигнуты в ближайшее время.

Библиографический список

1. Валиев Р.З., Корзников А.В., Мулюков Р.Р. Структура и свойства металлических материалов с субмикроструктурной структурой // ФММ. – 1992. – Т. 2. – № 6. – С. 70–86.
2. Маркушев М.В., Мурашкин М.Ю. Структура и свойства алюминиевого сплава 1560 после интенсивной пластической деформации угловым прессованием и прокаткой // Материаловедение. – 2004. – № 8. – С. 38–42.
3. Морохов И.Д., Трусов Л.Д., Лаповок В.И. Физические явления в ультрадисперсных средах. – М.: Наука, 1984. – 472 с.
4. Наймарк О.Б. Коллективные свойства ансамблей дефектов и некоторые нелинейные проблемы пластичности и разрушения // Физическая мезомеханика. – 2003. – Т. 4. – № 4. – С. 45–72.

5. Пластическая обработка металлов простым сдвигом / В.М. Сегал, В.И. Резников, Ф.Е. Дробышевский, В.И. Копылов // Изв. АН СССР. Металлы. – 1981. – № 1. – С. 115–123.
6. Пластичность наноструктурного и поликристаллического титана при температурах 300, 77 и 4,2 К / В.З. Бенгус, С.Н. Смирнов, Е.Д. Табачникова, В.В. Романченко, С.Н. Хоменко, Д.В. Гундеров, В.В. Столяров, Р.З. Валиев // Металлофизика новейшие технологии. – 2004. – Т. 26. – № 11. – С. 1483–1492.
7. Структурно-скейлинговые переходы и некоторые термодинамические и кинетические эффекты в материалах в объемном субмикро- (нано-)кристаллическом состоянии / О.Б. Наймарк, Ю.В. Баяндин, В.А. Леонтьев, И.А. Пантелеев, О.А. Плехов // Физическая мезомеханика. – 2009. – Т. 12. – № 4. – С. 47–59.
8. Features of structure and phase transformations in shape memory Ti-Ni-based alloys after severe plastic deformation / V.G. Pushin, V.V. Stolyarov, R.Z. Valiev, N.I. Kourov, N.N. Kuranova, E.A. Prokofiev, L.I. Yurchenko // Annales de Chimie-Science des Materiaux. – 2002. – Vol. 27. – № 3. – P. 77–88.
9. Gleiter H. Nanocrystalline materials. // Prog. Mater.Sci. – 1989. – Vol. 33. – P. 223–330.
10. Lowe T.C., Zhu Y.T. Commercialization of nanostructured metals produced by severe plastic deformation processing // Adv. Eng. Mater. – 2003. – Vol. 5. – P. 373–378.
11. The effect of equal channel angular pressing on the structure and mechanical behavior of Ti-6Al-4V alloy / I.P. Semenova, G.I. Raab, L.R. Saitova, R.Z. Valiev // Mater. Sci. Eng. – 2004. – A387–389. – P. 805–808.
12. Using ECAP to achieve grain refinement, precipitate fragmentation and high strain rate superplasticity in a spray-cast aluminium alloy / C. Xu, M. Furukawa, Z. Horita, T.G. Langdon // Acta Mater. – 2003. – Vol. 51. – P. 6139–6149.