

Краткое изложение важнейших научных результатов ИФПМ СО РАН за 2010 г.

Новый метод многоуровневого наноструктурирования поверхностных слоёв конструкционных материалов и их сварных соединений, кратно повышающий трещиностойкость, прочность, усталостную долговечность и износостойкость

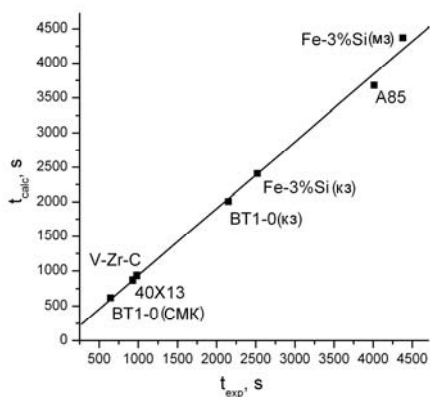
Теоретически и экспериментально показано, что в поверхностных слоях нагруженных твёрдых тел распространяются сдвиги механизмом каналированных наноструктурных превращений, которые периодически генерируют макрополосы локализованной пластической деформации в объёме материала. Такие нелинейные волновые процессы обуславливают разрушение материала при его пластической деформации и усталостное разрушение при циклическом нагружении ниже предела текучести. Разработаны методы многоуровневого наноструктурирования поверхностных слоёв конструкционных материалов и их сварных соединений, повышающие кратно трещиностойкость материала при его технологическом переделе или высокотемпературном воздействии, прочность, усталостную долговечность и износостойкость конструкций.

Повышение усталостной долговечности сварных соединений авиационных конструкционных материалов

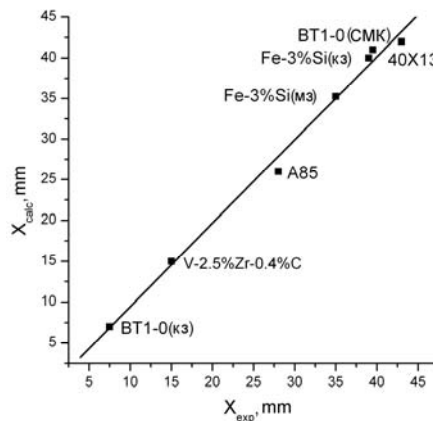
Материал, напряжение	Число циклов до разрушения		
	До обработки	После наноструктурирования поверхностного слоя	Коэффициент увеличения ресурса
Сталь ВКС12 700 МПа	33000-38000	48500-68000	1,5-1,8
Сплав ВЖ172 700 МПа	до 12800	72000-84600	5,8-6,6
Сплав В1461 170 МПа	20500-23500	> 300000	>12,5
Сплав В1693 160 МПа	20000-30000	> 300000	> 10

Обоснование возможности прогнозирования времени и места разрушения металлов и сплавов по результатам анализа автоволновых картин локализации пластического течения

На приведенном рисунке показана линейная корреляция с коэффициентом $\sim 0,98$ между экспериментально наблюдаемыми (горизонтальная ось) временем и местом разрушения и теми же характеристиками, полученными путем экстраполяции автоволновых параметров (вертикальная ось).



а)



б)

Рис. Корреляция между расчетными и экспериментально зарегистрированными временем (а) и местом (б) разрушения для разных материалов

Формирование периодической структуры на поверхности наклеенных металлических фольг, позволяющей проводить мониторинг состояния материала

Показано, что твидовая структура, наблюдаемая на поверхности кристаллов алюминия при циклическом растяжении, свидетельствует о возможности возникновения неустойчивости Гринфелда при напряжениях выше предела текучести. Неустойчивость Гринфелда и образование периодических структур на поверхности фольг моно- и поликристаллов алюминия, по которым можно проводить мониторинг состояния конструкционного материала в режиме реального времени, возможны только если фольга находится под действием упругих напряжений, а в приповерхностном слое сформировался дефектный сдвигонеустойчивый слой, способный обеспечивать перераспределение материала под действием упругих напряжений. Анализ складчатого деформационного рельефа, возникающего в процессе термического или механического воздействия на композицию «оксидная пленка – алюминиевая подложка», позволяет оценить величину термических напряжений, развивающихся в тонких пленках.

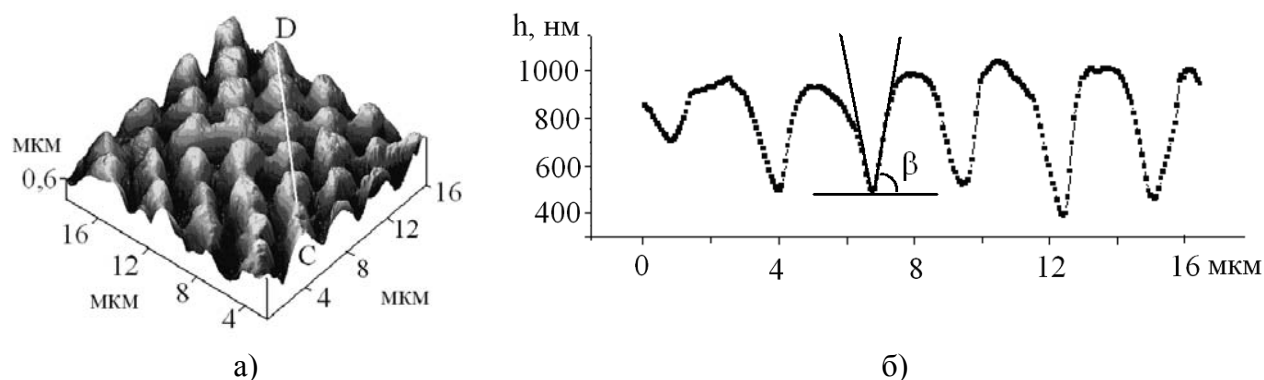


Рис. АСМ изображение твидовой структуры после $N_1 \sim 10000$ циклов растяжения (а) и поперечное сечение вдоль направления, показанного отрезком линии CD (б).

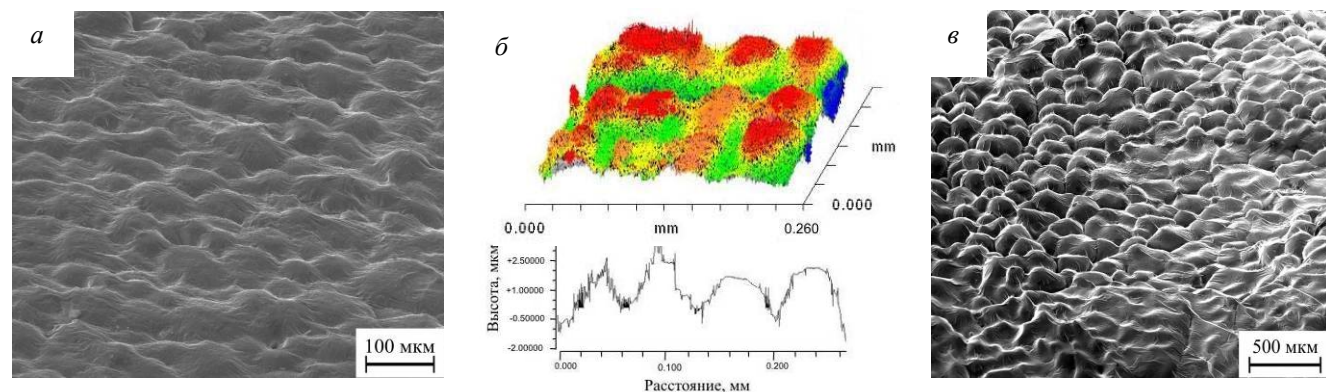


Рис. Периодический рельеф, образовавшийся на поверхности алюминиевых сплавов Al 1570 (а, б) и АМГ2 (в) после термического оксидирования при 550°C (а, б) и 585°C (в)

Разработка и создание многокомпонентных нанокompозитных покрытий с особыми свойствами и новое технологическое оборудование для их получения

Разработаны физические принципы дизайна нанокompозитных покрытий с особыми (в частности, сверхтвердостью) свойствами. В основе предложенного подхода лежит термодинамически обоснованный выбор многоэлементных покрытий и новая концепция их формирования – самоорганизация микроструктуры на стадии зарождения взаимонерастворимых фаз. Создано новое технологическое оборудование для синтеза многокомпонентных нанокompозитных покрытий с совмещением ионно-плазменного и магнетронного методов PVD в едином технологическом цикле в условиях высокого вакуума.

На примере системы Ti-Al-Si-Ni-Cu-Cr-C-O-N с применением флуоресцентного, рентгеноструктурного и электронно-микроскопического методов выполнено экспериментальное исследование элементного состава, структурно-фазового и упруго-

напряженного состояний в полученных на основе разработанных принципов создания нанокompозитных покрытий. Получено экспериментальное подтверждение предлагаемых нами принципов конструирования нанокompозитных покрытий конструкционного и экспериментального назначения перспективных для повышения когезивной, адгезионной прочности и других функциональных свойств.

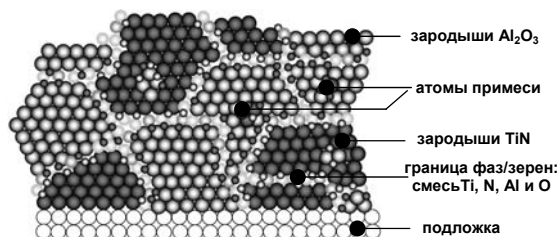


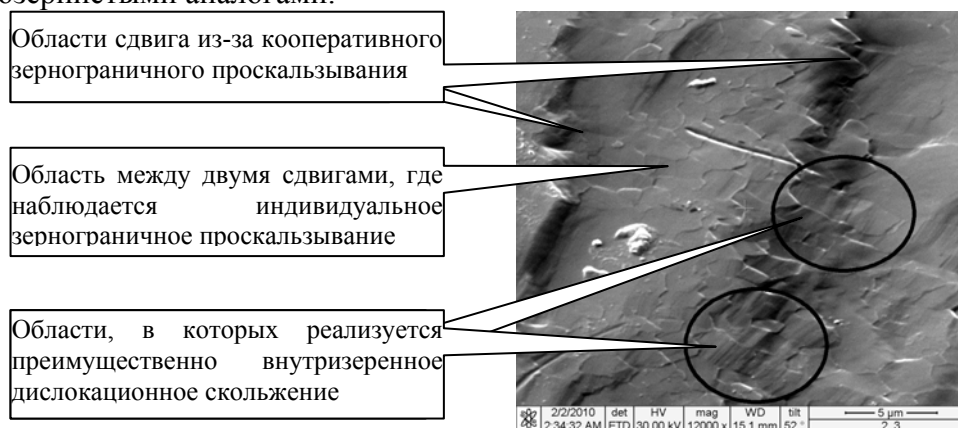
Рис. Схема формирования нанокompозитных многоэлементных покрытий



Рис. Общий вид макетного образца плазменного магнетронно-дугового комплекса «СПРУТ».

Зернограничное проскальзывание как важный механизм пластической деформации ультрамелкозернистых материалов при гомологических температурах $0.3 \div 0.35$

На основе многоуровневого подхода с использованием прямых экспериментальных методов исследованы механизмы пластической деформации при комнатной температуре в чистом алюминии (99,99%) с ультрамелкозернистой структурой, полученной методом равноканального углового прессования. Установлено, что при деформации образцов растяжением вклад в общую деформацию механизма зернограничного проскальзывания, развивающегося на мезоуровне, может достигать 40%. Оставшийся вклад в деформацию образца обеспечивает механизм, действующий на микроуровне – внутриверенное дислокационное скольжение. Таким образом, показано, что при растяжении ультрамелкозернистых материалов, полученных воздействием интенсивной пластической деформации, в условиях гомологических температур $0.3 \div 0.35$ существенно изменяется соотношение вкладов действующих механизмов в общую деформацию по сравнению с крупнозернистыми аналогами.



Формирование стадий предразрушения и квазипериодические изменения дефектной структуры керамики

При изучении особенностей напряженно-деформированного состояния керамических композитов на стадии предразрушения в зависимости от содержания упрочняющих частиц и их распределения в матрице (равномерное, кластерное) показано, что независимо от способа нагружения всегда формируются локальные области растяжения, в которых образуются очаги будущего разрушения. Размеры этих областей существенно больше при кластерном распределении частиц. При *in situ* исследованиях тонкой кристаллической структуры нанокристаллического диоксида циркония обнаружена

осцилляция размеров кристаллитов и микроискажений решетки при нагреве, обусловленные квазипериодическим изменением дефектной структуры кристалла, причем уровень микроискажений решетки прямо определяет фазовый состав, а основная доля кристаллитов являются практически бездефектными однодоменными монокристаллами.

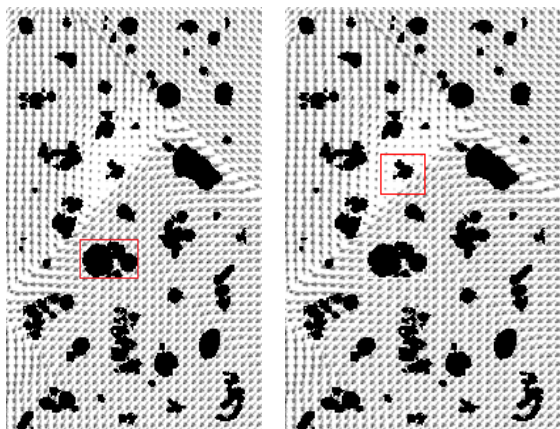


Рис. Поля скоростей относительно выделенной области включений (отмечены прямоугольником) в разные моменты процесса деформирования

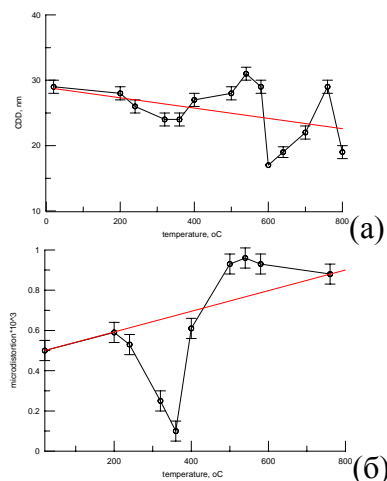


Рис. Изменение среднего размера кристаллитов D (а) и микроискажений решетки (б) в $ZrO_2(3Y)$ в процессе нагрева.

Методика исследования процесса изнашивания, основанная на частотно-временном анализе акустических колебаний при трении

Предложена методика, основанная на частотно-временном анализе акустических колебаний, которая позволяет установить связь между появлением квазипериодических всплесков интенсивности акустической эмиссии при трении скольжения с процессами, отвечающими за формирование частиц износа. Полученные результаты открывают возможность использования частотно-временного анализа акустической эмиссии как дополнительного аппарата для исследования особенностей процесса изнашивания, наряду с традиционными подходами.

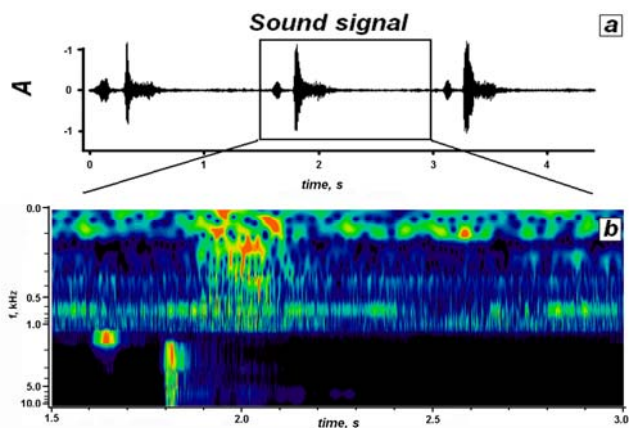


Рис. Звуковой сигнал (а), его вейвлет-преобразование (б).

Биопокрытия, обеспечивающие высокий коэффициент трения для фиксации медицинских имплантатов с костной тканью

Микродуговое оксидирование наноструктурированного и ультрамелкозернистого титана в электролите на основе водного раствора ортофосфорной кислоты, гидроксилата и карбоната кальция позволяет создавать пористые кальций-фосфатные покрытия с высокими физико-механическими, трибологическими и биологическими характеристиками. Высокий коэффициент трения 0,4-1,0 в процессе фрикционного взаимодействия покрытия со сверхвысокомолекулярным полиэтиленом и костной тканью позволяет исключить смещения при трении имплантата по костной ткани, тем самым, усиливая его фиксацию, что определяет одно из применений кальций-фосфатных покрытий.

Трибологические испытания продемонстрировали хорошую эффективность имплантатов с разработанными кальций-фосфатными покрытиями перед имплантатами без покрытий. Полученные данные использованы при разработке комплекта дентальных винтовых внутрикостных имплантатов с кальций-фосфатными покрытиями. Завершен полный цикл испытаний, включая клинические испытания. Необходимая документация на комплект дентальных винтовых внутрикостных имплантатов с инструментами и принадлежностями из наноструктурированного титана направлена в Росздравнадзор для регистрации.

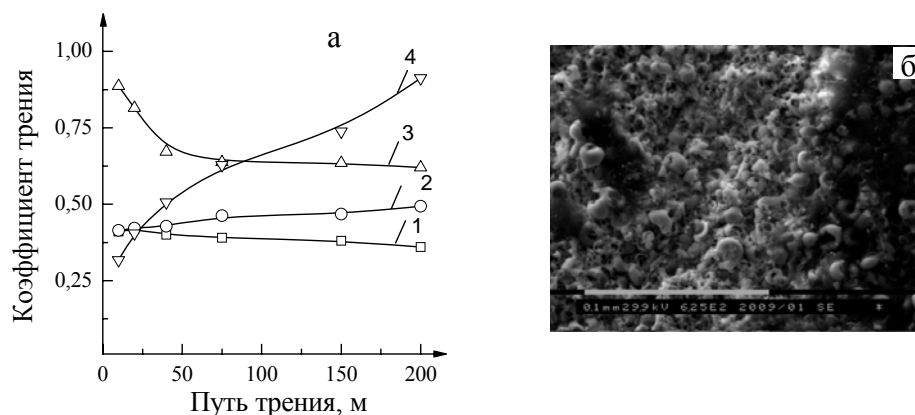


Рис. Зависимость коэффициента трения от пути трения (а) для образцов наноструктурного титана с кальций-фосфатным покрытием (1 –трение без смазки, контртело - сверхвысокомолекулярный полиэтилен; 2 – трение в физиологическом растворе, контртело - сверхвысокомолекулярный полиэтилен; 3 – трение без смазки, контртело – костная ткань; 4 – трение в физиологическом растворе, контртело – костная ткань) и РЭМ- изображение поверхности трения кальций-фосфатного покрытия после трибологических испытаний

Особенности эволюции повреждений в очаге разрушения при переходе от стационарного к катастрофическому режиму

Изучены особенности формирования очага разрушения в областях локализованных повреждений. Численно изучен режим затишья в области подготовки катастрофического события. Показано, что медленные деформационные фронты стекаются в очаг будущего разрушения, подготавливая переход от стадии медленного стационарного накопления повреждений к сверхбыстрому катастрофическому режиму. Именно на этой стадии в ближней зоне формирующегося очага не происходят крупные события, развитие сопутствующих трещин (разломов) приостанавливается, что и отвечает существованию зоны молчания. Поврежденность среды в области будущего очага разрушения нарастает за счет подпитки деформационными фронтами повреждений.

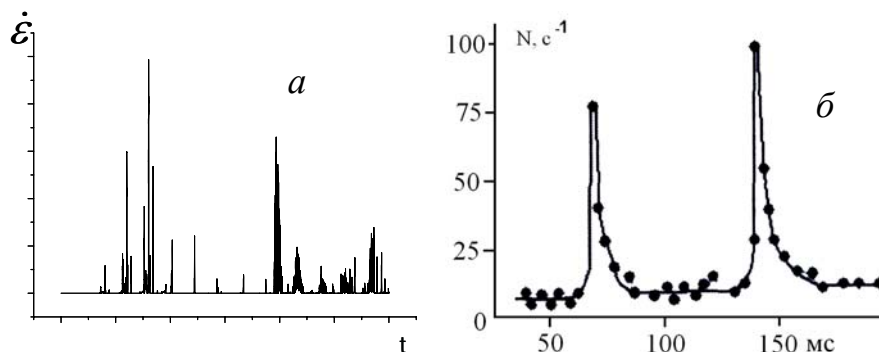


Рис. Взрывной характер развития трещин в нагружаемой геосреде: а – численное моделирование эволюции горного массива на катастрофической стадии эволюции; б – скорость образования трещин в диабазе при действии на образец постоянного сжимающего напряжения [Журков С.Н., Куксенко В.С., Петров В.А. и др. Концентрационный критерий объемного разрушения твердых тел. – М.: Наука, 1980. – С. 78–85].