

## ПРИОРИТЕТНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ Ш.20.

### МЕХАНИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА, ФИЗИКА И МЕХАНИКА ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ, МЕХАНИКА КОМПОЗИЦИОННЫХ И НАНОМАТЕРИАЛОВ, ТРИБОЛОГИЯ

#### Программа Ш.20.1. Физическая мезомеханика, физика прочности и неравновесная термодинамика твердых тел как многоуровневых систем и проблемы создания на их основе новых материалов, включая наноструктурные (координатор акад. В. Е. Панин)

В Институте физики прочности и материаловедения теоретически и экспериментально показано, что в поверхностных слоях нагруженных твердых тел распространяются сдвиги механизмом каналированных наноструктурных превращений, которые периодически генерируют макрополосы локализованной пластической деформации в объеме 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 слоев конструкционных материалов и их сварных соединений,кратно повышающие трещиностойкость материала, 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

Обоснована возможность прогнозирования времени и места разрушения металлов и сплавов по результатам анализа автоволновых картин локализации пластического течения. На рис. 35 показана линейная корреляция с коэффициентом  $\sim 0,98$  между экспериментально наблюдаемыми (горизонтальная ось) временем и

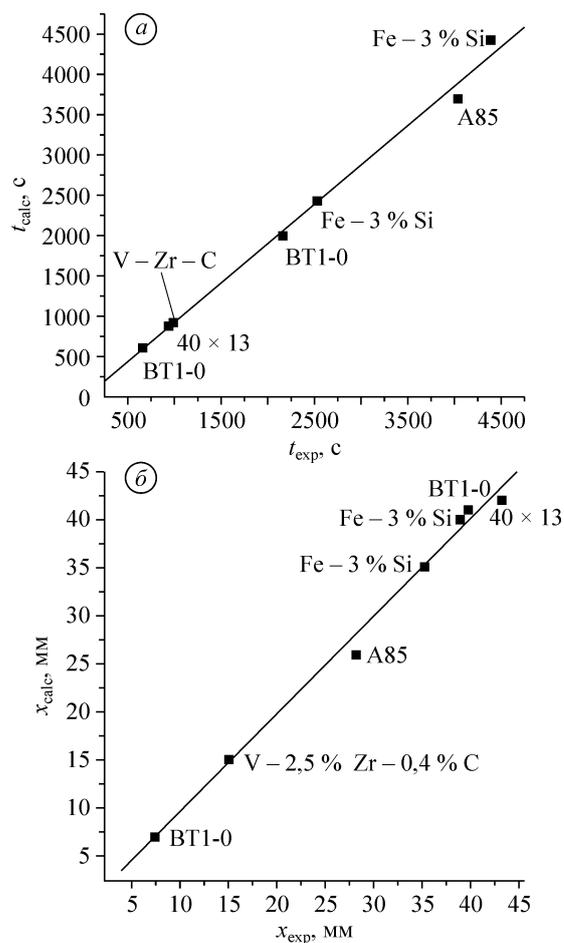


Рис. 35. Корреляция между расчетными и экспериментально зарегистрированными временем (а) и местом (б) разрушения для разных материалов.

местом разрушения и теми же характеристиками, полученными путем экстраполяции автоволновых параметров (вертикальная ось).

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 ре-

жиме реального времени, возможны, только если фольга находится под действием упругих напряжений, а в приповерхностном слое формировался дефектный сдвигоустойчивый слой, способный обеспечить 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.

### **Программа Ш.20.2. Научные основы создания материалов и покрытий с неравновесными структурно-фазовыми состояниями на основе многоуровневого подхода (координатор докт. физ.-мат. наук С. Г. Псахье)**

В Институте физики прочности и материаловедения разработаны физические принципы дизайна нанокompозитных покрытий с особыми (в частности, сверхтвердостью) свойствами. В основе предложенного подхода лежат 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.

В том же Институте 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 упругонапряженного состояний покрытий. Получено экспериментальное подтверждение предлагаемых принципов конструирования нанокompозитных покрытий, перспективных для повышения когезивной, адгезионной прочности и других функциональных свойств.

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 рав-

ноканального 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, — внутризеренное дислокационное скольжение. Таким образом, показано, что при растяжении ультрамелкозернистых материалов, полученных воздействием интенсивной пластической деформации, в условиях гомологических температур 0,3—0,35 существенно изменяется соотношение вкладов действующих механизмов в общую деформацию по сравнению с крупнозернистыми аналогами.

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 (рис. 36). Полученные результаты открывают возможность использования частотно-временного анализа акустической эмиссии как дополнительного аппарата для исследования особенностей процесса изнашивания.

Изучены формирование стадии предразрушения и квазипериодические изменения дефектной структуры керамики. Показано, что на стадии предразрушения независимо от способа нагружения всегда формируются локальные

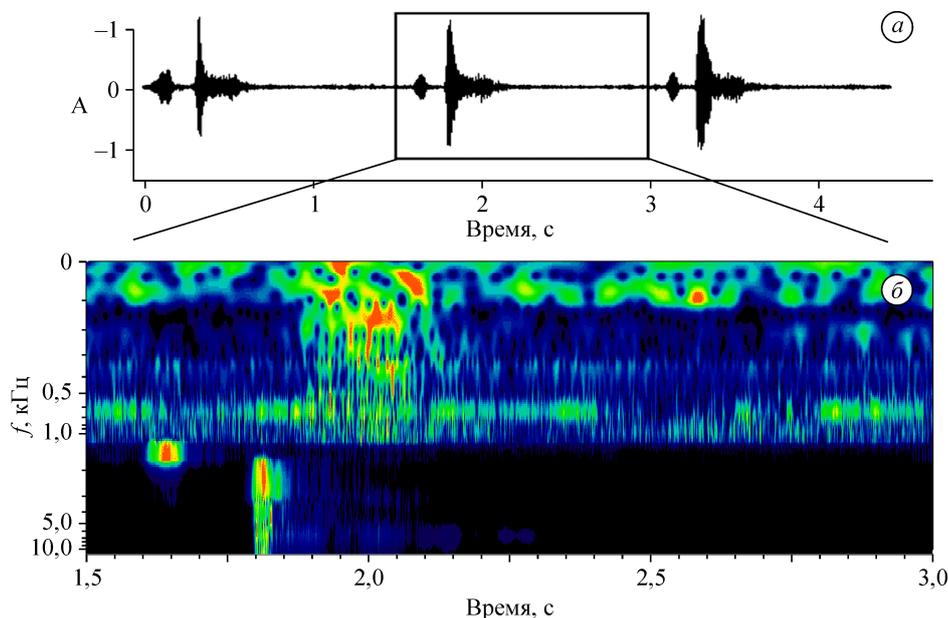


Рис. 36. Звуковой сигнал (а), его вейвлет-преобразование (б).

области растяжения, в которых появляются очаги будущего разрушения. При исследовании тонкой кристаллической структуры нанокристаллического диоксида циркония обнаружена осцилляция размеров кристаллитов и микроискажений решетки при нагреве, обу-

словленная квазипериодическим изменением дефектной структуры кристалла, причем уровень микроискажений решетки прямо определяет фазовый состав, а основная доля кристаллитов является практически бездефектными однодоменными монокристаллами.

### Программа Ш.20.3. Исследование многоуровневых процессов деформирования и разрушения неоднородных материалов и конструкций, живучести и аварийных ситуаций технических систем (координатор член-корр. РАН Б. Д. Аннин)

В Институте гидродинамики им. М. А. Лаврентьева выполнены экспериментальные ис-



Рис. 37. Микроструктура сферопласта.

следования влияния температуры и скорости нагружения на механизм разрушения сферопласта (рис. 37) при различных способах приложения нагрузки (одноосное сжатие, сжатие образца с поперечным отверстием, растяжение, малоцикловое нагружение). По результатам исследований выделено три характерных состояния сферопласта, зависящих от температуры, при которой производится деформирование: состояние начальной хрупкости (хрупкий композит с хрупкой матрицей), состояние пластичности (пластичный композит с пластичной матрицей) и состояние вторичной хрупкости (хрупкий композит с пластичной матрицей). Переход в третье состояние связан с критическим ослаблением связи между матрицей (эпоксидная смола) и упрочняющей фазой (стеклянные микросферы). Уменьшение скорости аналогично дополнительному нагреву в преде-

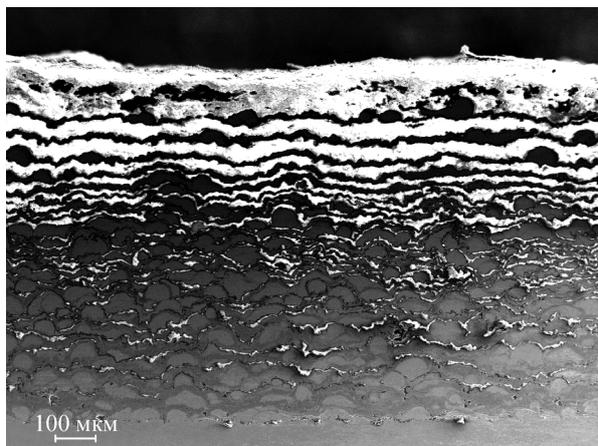
лах текущего температурного состояния, но не вызывает переход между состояниями.

Развиты новые постановки задач деформирования углеродных нанотрубок, основанные на физике межмолекулярных взаимодействий и механике Ньютона взаимодействия материальных частиц (молекул). Разработаны алгоритмы численного решения нелинейных уравнений Ньютона и решены новые задачи о потере устойчивости и контакте нанотрубок. Разработанные критерии потери устойчивости равновесных состояний и квазистатических/динамических движений наноструктур позволяют при решении уравнений Ньютона методом молекулярной механики наряду с равновесными конфигурациями определять как критические значения внешних сил и/или времени, так и формы выпучивания этих структур.

Рассмотрены плоские и пространственные задачи об определении напряжений в жестких и жесткопластических включениях, находящихся в изотропной упругой среде. Для включений в виде эллипсоидов вращения, содержащихся в упругом пространстве, решение для напряжений построено в замкнутом виде.

Методом детонационного напыления получены композиты с монотонным послойным переходом от металла к керамике на материалах Ti и  $Al_2O_3$  (рис. 38). Основной целью является получение термобарьерных покрытий, обладающих повышенной термоциклической стойкостью. Установлено, что градиентные покрытия Ti и  $Al_2O_3$  выдерживают существенно большее число циклов нагрев—охлаждение, чем покрытия из чистого оксида алюминия.

В Институте физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова впервые выявлен эффект формирования наномасштабных (первые десятки нанометров) структурных элементов стали 09Г2С при рекристаллизации после холодной мегапластической деформации. Износостойкость наноструктурированной стали в условиях трения скольжения увеличилась более чем в 2 раза, а на стадии приработки — в 3,4 раза. Анализ изменений микростроения и параметров шероховатости фрикционных поверхностей в процессе трения указывает на более высокую адгезионную проч-



**Рис. 38.** Градиентное покрытие (толщина  $\approx 500$  мкм, число слоев 25). Светлые участки —  $Al_2O_3$ , темные — Ti.

ность материала в наноструктурном состоянии и на рост масштаба объемов активного слоя с взаимосогласованным восприятием трибонагрузок.

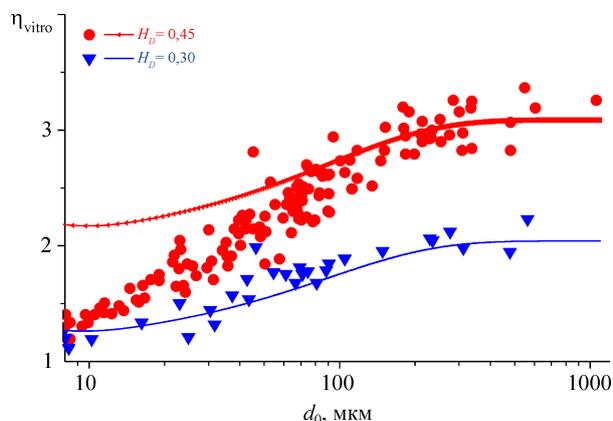
В СКТБ «Наука» разработан метод расчета нагружения многоэлементных механических систем со сложной кинематикой и многообразием взаимного расположения элементов, основанный на предварительном построении зависимостей внутренних силовых факторов от положения активных силовых элементов при единичных горизонтальных и вертикальных усилиях на рабочем органе. На основании принципа суперпозиции сил произвольное нагружение рабочего органа представляется комбинацией указанных единичных усилий, что позволяет определить условия максимумов проектных и запроектных (аварийных) нагрузок, лимитирующих характеристики прочности, ресурса и живучести конструкций машин. Выполнен расчет для конструкции верхнего строения экскаватора модульного типа с оригинальной, не имеющей аналогов, кинематической схемой и конфигурацией рабочего оборудования, основанной на применении механических толкателей в качестве силовых приводов. Оценка напряженно-деформированного состояния машины в аварийных ситуациях позволила установить критические случаи нагружения.

### Программа Ш.20.4. Физико-химическая механика гетерогенных сред и технологии на их основе (координатор акад. В. М. Фомин)

В Институте теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича создана математическая технология, позволяющая на основе клинических данных строить модели верхней части дыхательного тракта человека с учетом индивидуальных особенностей. Геометрия носовой полости человека моделировалась по серии томограмм, выполненных на рентгеновском томографе в параллельных коронарных сечениях. Получены поля течения для четырех реальных случаев типичной патологии носовых полостей. Исследовано влияние патологии на поля скоростей, температур и на транспортную функцию носа, что позволяет построить сценарий хирургического вмешательства для устранения патологии без нарушения транспортных характеристик дыхательных каналов.

Разработана модель двухфазного движения крови на основе гипотезы взаимопроникающих континуумов, позволившая описать зависимость относительной вязкости крови от диаметра для мелких сосудов, вплоть до капилляров размером с эритроцит (рис. 39). Таким образом, получена возможность единообразного моделирования течения крови как в крупных, так и мелких сосудах.

Создана многофункциональная модульная плазмохимическая установка, позволяющая проводить обработку и синтез в заданной контролируемой атмосфере нано- и субмикроразмерных порошковых частиц как чисто керамических, так и капсулированных в металличе-



**Рис. 39.** Зависимость вязкости  $\eta_{\text{vitro}}$  от диаметра сосуда  $d_0$  для двух фиксированных значений показателя гематокрита  $H_D$ . Значки — экспериментальные данные.

ской связке. Выполнено исследование степени усвоения расплавом и гомогенизации керамических нанодисперсий, подвергнутых динамической обработке в центробежной планетарной мельнице и прессованию в таблеточные брикеты. Показано, что применение нанопорошкового модификатора приводит к заметному повышению свойств литого металла в обоих случаях при незначительном количественном отличии от способа обработки модифицирующих композиций.

Экспериментально показано, что в результате ультразвуковой обработки коагулированного нанопорошка нитрида титана в жидкости исходный размер частиц уменьшился в 1,5—2,0 раза. Отличительной особенностью этого метода является достаточно высокая гомогенность полученного порошка с заранее заданными размерами частиц, а также высокая чистота порошка по сравнению с другими методами (механическими, взрыва проволоки и т. д.), неизбежно дающими паразитные примеси.

На основе термодинамического метода предложен макроскопический подход к описанию близкодействующих поверхностных сил, который позволяет изучить поверхностные явления в наномасштабе и корректно анализировать состояние граничного слоя жидкости на неоднородной поверхности твердого тела. Разработанный метод использован для решения задачи о возмущении граничного слоя жидкости на твердых поверхностях с заданными неоднородностями. Установлено, что в граничном слое жидкости в окрестности скачка смачивания возникают напряжения, величина которых в случае неоднородностей наномасштаба может быть достаточной для разрыва жидкости и образования нанопузырьков.

Получено общее решение задачи о динамическом изгибе идеальной жесткопластической двусвязной пластины с произвольными шарнирно опертыми или защемленными криволинейными контурами, на которую действует равномерно распределенная по поверхности кратковременная динамическая нагрузка высокой интенсивности взрывного типа. Пластина покоится на вязкоупругом основании. Показано, что существует несколько механизмов деформирования пластин. Для каждого из них получены уравнения динамического деформирования и проанализированы условия реализации.