

ПРИОРИТЕТНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ Ш.23.

МЕХАНИКА ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ, СРЕД, ИЗДЕЛИЙ, КОНСТРУКЦИЙ, СООРУЖЕНИЙ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ МЕХАНИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ, ВОЗДЕЙСТВИИ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ И ХИМИЧЕСКИ АКТИВНЫХ СРЕД

Программа Ш.23.1. Фундаментальные основы физики и механики поведения нелинейных многоуровневых иерархически организованных систем (координатор акад. В. Е. Панин)

В Институте физики прочности и материаловедения развиты физические основы нелинейной механики разрушения. На основе калибровочной теории дефектов получены волновые уравнения, которые предсказывают возможность развития трещины в виде нелинейного волнового процесса. В условиях вязкого разрушения нелинейные волны разрушения диспергируют, формируя локальные мезовихри в виде динамических ротаций. Развитие усталостного разрушения связывается со структурно-фазовым распадом деформируемого кристалла в зонах сильной его кривизны (рис. 36).

В этом же Институте построена феноменологическая модель прерывистой текучести в гетерогенных материалах и средах различной природы (включая геологические), в основе которой лежит описание данного явления как сугубо релаксационного процесса, регулируемого отрицательной и положительной обратными связями в системе определяющих соотношений. С применением развитой модели показано, что эффект прерывистой текучести определяется деформационными механизмами мезоскопического и макроскопического структурных уровней.

Неустойчивость пластического течения развивается в тех локальных областях нагружаемой среды, в которых скорости общей деформации, ответственные за рост упругих напряжений, и скорости пластических деформаций, приводящие к релаксации, оказываются приблизительно равными. Подобное развитие неустойчивости деформационного процесса является характерным для различных геоматериалов и всей геосреды в целом и свидетельствует о приближении системы к критическому состоянию (рис. 37).

Показана важная роль флюидов как факторов, в значительной степени определяющих отклик геосреды в сложном напряженном состоянии. Установлено, что в зависимости от особенностей внутренней структуры и напряженного состояния среды характер влияния содержащегося в ее объеме жидкофазного флюида будет определяться поровым давлением или адсорбционным понижением прочности. Полученные результаты являются значимыми для понимания общих механизмов формирования очагов разрушения в геосреде.

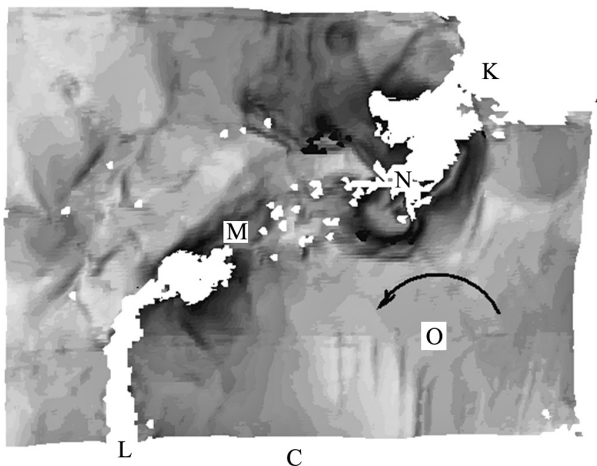


Рис. 36. Распространение усталостной трещины LMNK в зоне локальной кривизны, которая испытывает структурно-фазовый распад. Технический титан, знакопеременный изгиб.

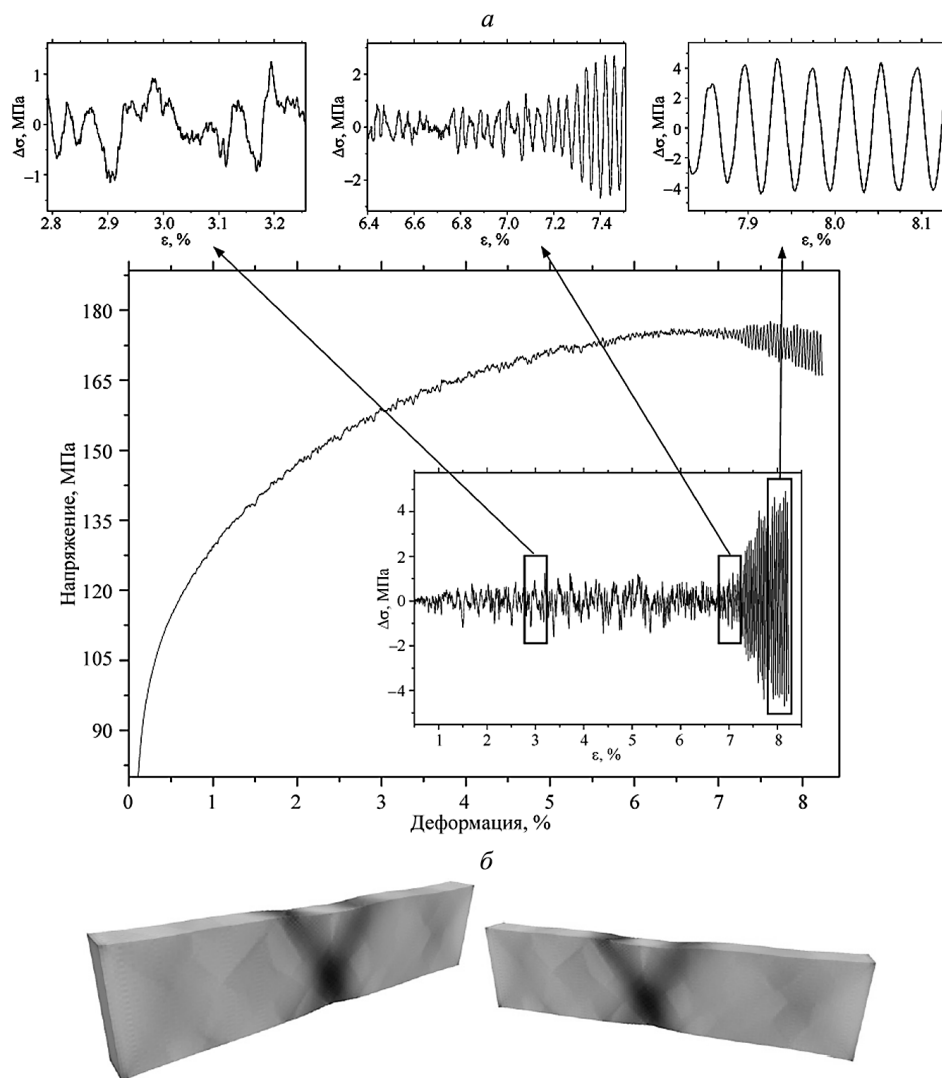


Рис. 37. Расчетная σ - ϵ -диаграмма прерывистой текучести (а). Локальные потери устойчивости нагружаемого образца как динамической системы на заключительной стадии эволюции сменяются глобальной неустойчивостью при формировании шейки (б), выраженной автоколебаниями (см. а).

Программа Ш.23. 2. Многоуровневый подход к разработке и созданию материалов и композиций различного назначения, в том числе с низкоразмерной структурой (координатор член-корр. РАН С. Г. Псахье)

В Институте физики прочности и материаловедения выполнены синтез и исследование свойств иерархически организованных хрупких пористых материалов. Установлена сложная трехуровневая организация оксигидроксида алюминия, полученного из алюминийсодержащих низкоразмерных структур, в которых радиально расходящиеся нанолиты толщиной 2–8 нм и размером 200–500 нм образуют сферические пористые 3D-наноструктуры в виде разветвленных агломератов протяженностью до десятков микрон. Показано, что синтез пористых керамик из подобного рода порошков позволяет

получить сотовую структуру, сформированную укладкой полых частиц порошка, диаметр которых многократно превышает толщину их стенок (рис. 38).

В рамках метода подвижных клеточных автоматов предложен феноменологический подход, позволяющий учитывать структурные превращения керамики ZrO_2 в процессе механического нагружения. Разработан эволюционный подход к исследованию процессов деформации и разрушения пористых хрупких материалов, в рамках которого показано, что на стадии макроскопического предразрушения формируются

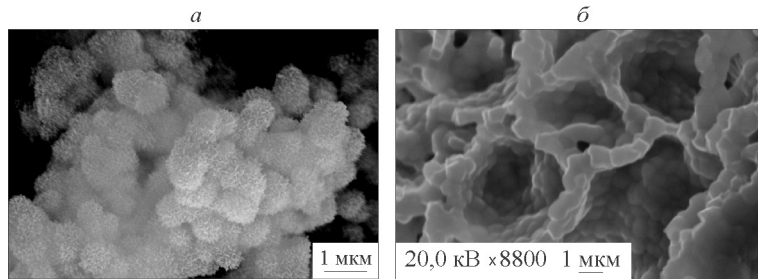


Рис. 38. Разветвленный агломерат 3D-наноструктур нанолистового оксигидроксида алюминия (а); сотовая структура керамики (б).

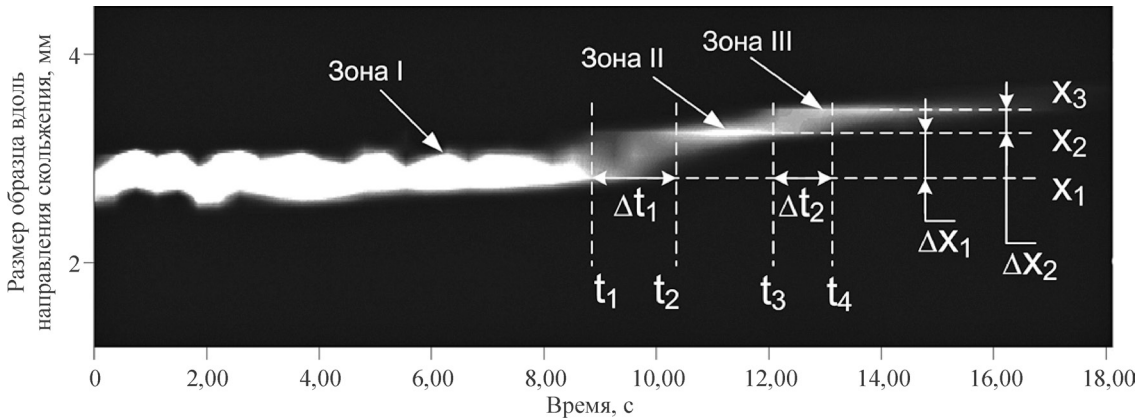


Рис. 39. Хронограмма распределения ϵ_{xx} в сечении на глубине 1 мм от поверхности в виде распределения яркости.

области локализованных повреждений с развитием разрушения как катастрофы в режиме с обострением.

В этом же Институте методом цифровой корреляции изображений проанализировано распределение компонент деформации в поверхностном слое в условиях динамического контактного воздействия трением. Показано, что имеет место не только пространственная неоднородность деформации на макроуровне, но и ее нестационарность во времени. Такой характер деформирования объясняется сложной схемой нагружения и изменением формы и размеров пятен контакта в ходе трибопроцесса. Анализ хронограмм для компоненты деформации ϵ_{xx} свидетельствует о динамическом характере развития

зон локализации деформации в поверхностном слое в масштабе всего образца (рис. 39).

Показано, что процесс деформации в пятне контакта состоит из последовательно сменяющихся друг друга стадий интенсивной локализованной деформации (зоны I, II и III в положениях x_1, x_2, x_3) и переходных стадий (на временных промежутках $\Delta t_1, \Delta t_2$), на которых деформация значительно меньше. Каждая последующая зона имеет меньший размер и более локализована по сравнению с предыдущей. Показано, что эффективная скорость перехода от одной зоны к другой, определяемая по отношению пространственного размера переходного участка к его длительности, в полтора-два раза выше скорости скольжения контртела.

Программа Ш.23.3. Развитие научных основ механики деформирования и разрушения для прогнозирования прочности, надежности материалов и конструкций, создания новых технологий формообразования изделий и получения композиционных материалов (координатор акад. Б. Д. Аннин)

В Институте гидродинамики им. М. А. Лаврентьева методом молекулярной механики были определены как собственные частота и форма колебаний, так и критические сжимающие нагрузки и форма выпучивания графеновых

листов. Для моделирования межатомных взаимодействий графена использовано поле потенциальных сил DREIDING. Это поле включает четыре типа потенциальных энергий ковалентных взаимодействий атомов: центральных сил;

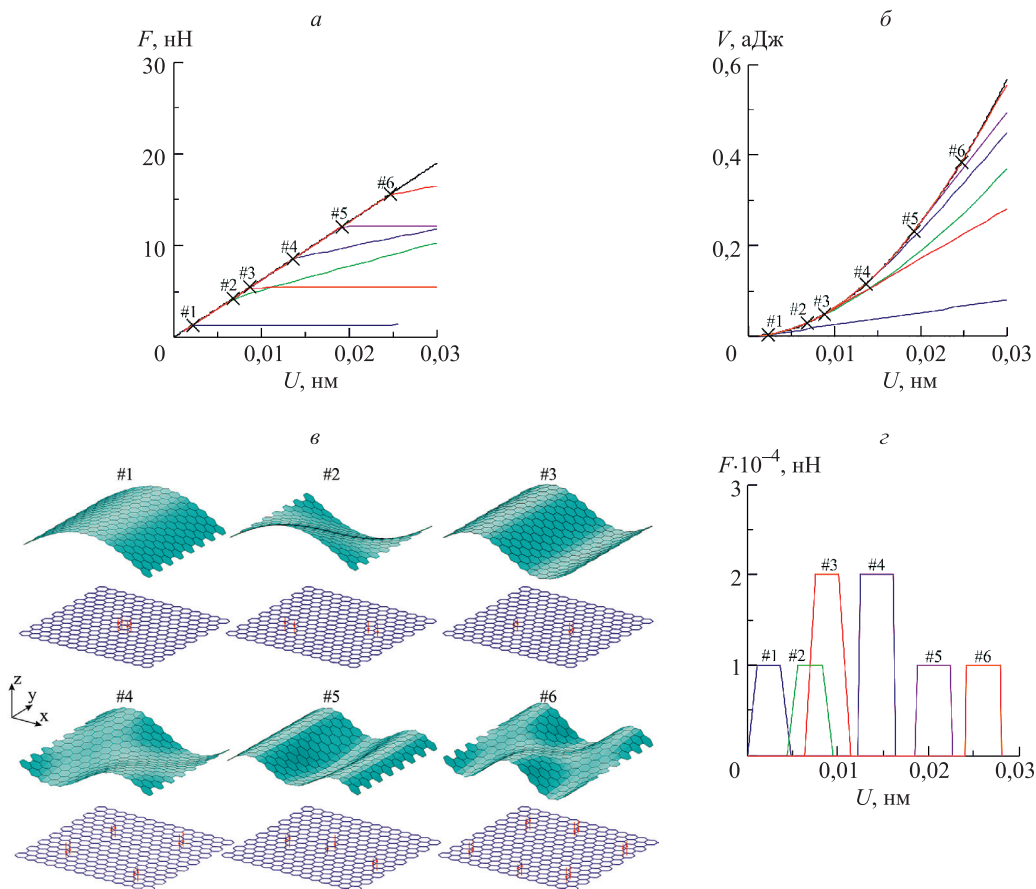


Рис. 40. Зависимости сжимающей силы F (а) и потенциальной энергии V (б) от заданного перемещения U торцов листа, цифрами отмечены точки бифуркации интегральных кривых; в – формы выпучивания листа, полученные в точках бифуркации (номер формы соответствует номеру точки бифуркации), стрелки соответствуют возмущающим силам, приложенным к листу, согласованным с формами выпучивания; г – зависимости амплитуд возмущающих сил от заданного перемещения U ; а, б – гладкая кривая соответствует решению задачи без приложения возмущающих сил, кривые, ответвляющиеся от точек бифуркации, соответствуют решениям задач с приложением возмущающих сил, согласованных с формами выпучивания.

изменения угла между соседними связями; двугранного угла, отвечающего за кручение ковалентной связи; угла инверсии (угла, соответствующего выходу атома из плоскости относительно трех соседних атомов). Решение задачи о собственных колебаниях квадратных листов графена позволило определить формы их собственных колебаний и показать, что найденные наборы частот собственных колебаний и соответствующих им форм близки к значениям, по-

лученным с использованием поля потенциальных сил ММЗ.

Найдены решения задач о квазистатическом деформировании и выпучивании графенового листа, сжимаемого заданными перемещениями атомов на границе. Некоторые результаты расчетов для графенового листа, сжатого заданным перемещением U на обоих торцах листа, демонстрируются на рис. 40.

Программа Ш.23.4. Механика гетерогенных, композитных сред и технологии на их основе (координатор акад. В. М. Фомин)

В Институте теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича впервые предложен и реализован способ трансформации присоединенного косоугольного скачка уплотнения и генерации висящего скачка уплотнения на пластине и клине в результате магнитогидродина-

мического (МГД) взаимодействия в гиперзвуковом потоке воздуха при локальной ионизации потока электрическим разрядом в постоянном магнитном поле. Управление аэродинамикой гиперзвуковых летательных аппаратов в верхних слоях атмосферы (30–60 км) может быть осу-

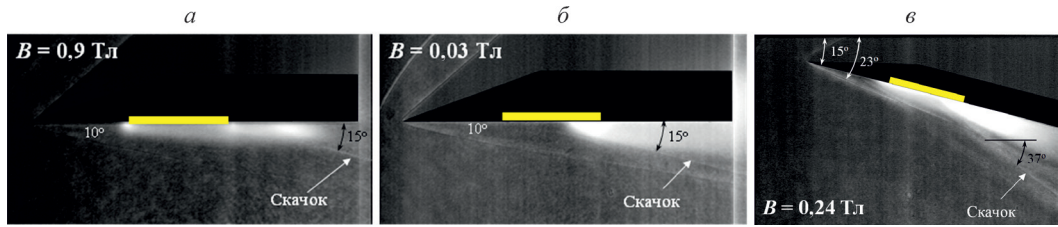


Рис. 41. Генерация висячего скачка уплотнения на области взаимодействия.

а – ВЧ-разряд, б, в – импульсный разряд.

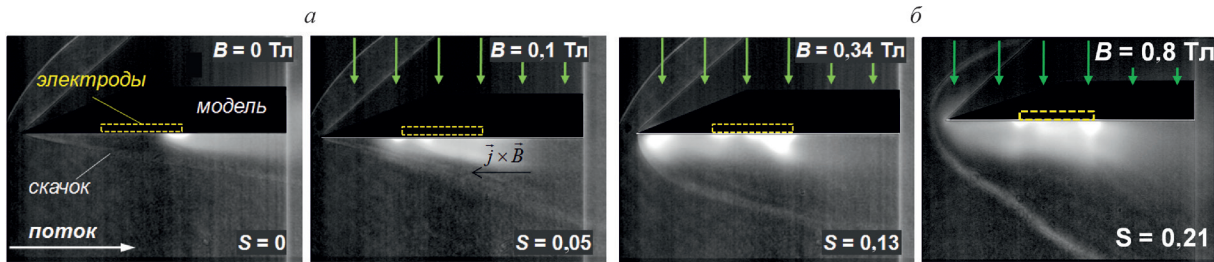


Рис. 42. Трансформация присоединенного скачка уплотнения в головной скачок. Импульсный разряд.

ществлено за счет использования пондеромоторных сил, воздействующих на высокоскоростной поток вокруг обтекаемого тела в условиях внешней ионизации. Такой МГД-метод управления потоком является весьма перспективным для снижения тепловых нагрузок, усиления торможения и создания управляющих моментов с целью изменения траектории движения.

С целью исследования МГД-влияния на структуру потока воздуха было изучено обтекание модели пластины и клина на МГД-стенде в условиях, моделирующих движение аппарата на высоте 28–30 км над уровнем моря со скоростью $M = 6$. В ходе исследований выявлены условия горения высоковольтных импульсных и высокочастотных электрических разрядов в высокоскоростных потоках воздуха в однородном магнитном поле.

Установлено, что при локальной ионизации потока высокочастотным разрядом на пластине или клине в результате МГД-взаимодействия происходит генерация косоугольного скачка уплотнения (рис. 41, а), угол наклона которого зависит от величины магнитной индукции; а при локальной ионизации потока импульсным разрядом МГД-взаимодействие приводит либо к трансформации присоединенного косоугольного скачка уплотнения в отошедший головной скачок (рис. 42), либо к генерации висячего косоугольного скачка на области МГД-взаимодействия (рис. 41, б, в). По результатам исследований выполнена оценка эффективности МГД-взаимодействия (вычислен параметр Стюарта – S) в условиях эксперимента.

С целью изучения возможного механизма мобилизации капли нефти, окруженной водой и заземленной в капилляре пористой среды, со-

трудниками того же Института выполнено моделирование процесса виброволнового воздействия на каплю. Исследование проведено как в рамках модельного уравнения, так и с помощью гидродинамического симулятора ANSYS FLUENT. Предложен способ определения собственной частоты колебаний заземленной капли. Показано, что эта частота немонотонно зависит от статического перепада давления.

Установлено, что частота внешнего вибрационного мобилизующего воздействия, при которой его амплитуда минимальна, близка к частоте свободных колебаний капли при заданном внешнем статическом перепаде давления, при этом суммарный перепад давления (статический+волновой) может быть меньше, чем статический, требуемый для мобилизации капли (рис. 43).

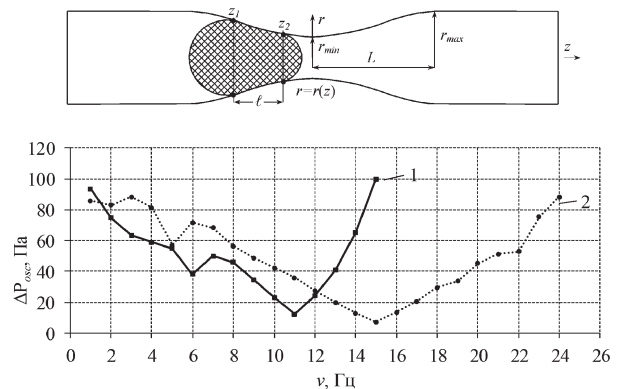


Рис. 43. Зависимость амплитуды волнового воздействия от частоты ($\Delta P_{mobil} = 259$ Па; $\Delta P_{stat} = 95$ Па, $\omega_0 = 13$ Гц – кривая 1, $\Delta P_{stat} = 171$ Па, $\omega_0 = 16$ Гц – кривая 2).