

УДК 539.4

П.В. Макаров, М.О. Еремин**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ОДНООСНОМ СЖАТИИ**

На основе разработанной модели квазихрупкой среды изучено хрупкое и квазихрупкое разрушение композиционных керамических материалов с матрицей из диоксида циркония с различным процентным содержанием упорочняющих частиц корунда. Показано, что разрушение развивается в две стадии – медленная квазистационарная фаза накопления неупругих деформаций и повреждений и сверхбыстрая катастрофическая фаза – режим с обострением, когда процесс разрушения выходит на макроуровень и происходит формирование макротрещины.

Ключевые слова: *хрупкое и квазихрупкое разрушение, квазистационарная фаза, режим с обострением*

Конструкционные керамические композиционные материалы получили широкое практическое применение в промышленности благодаря их высокой удельной прочности, повышенной вязкости разрушения, твёрдости, трещиностойкости, высокому сопротивлению усталостному разрушению и т.д. Конструкционные керамики на основе прочных оксидов различных металлов (циркония, алюминия и др.) способны эффективно сопротивляться интенсивным механическим нагрузкам. Однако именно хрупкие свойства керамики, их сравнительно низкая устойчивость к ударным воздействиям сильно ограничивают области применения керамических композитов. Изучение механизмов и особенностей хрупкого и квазихрупкого разрушения керамических материалов является актуальнейшей проблемой современной механики разрушения.

Согласно представлениям физической мезомеханики [1] и идеям работы [2], нагружаемое твердое тело является нелинейной динамической системой, эволюция которой в полях действующих сил полностью соответствует фундаментальным особенностям эволюции нелинейных динамических систем.

В настоящей работе основное внимание уделено характеру разрушения квазихрупких тел и сред – наличию двух стадий разрушения: сравнительно медленной квазистационарной и сверхбыстрой катастрофической стадии – режима с обострением по терминологии Курдюмова С.П. [3], что и является фундаментальной особенностью эволюции нелинейных динамических систем, обладающих свойством самоорганизованной критичности [4].

Одной из центральных проблем механики деформируемого твёрдого тела остаётся проблема формулировки условий или критериев разрушения. В настоящей работе эта проблема также решается на основе идей математической теории эволюции нагружаемых твёрдых тел и сред [2].

Согласно традиционным представлениям механики разрушения, локальное разрушение в твёрдом теле происходит тогда, когда достигается предельная нагрузка. Весь опыт применения этого подхода к решению задач предельного проектирования показал его приемлемую работоспособность и корректность для решения многих практических задач. Однако мы ничего не можем сказать о самом

процессе разрушения, тем более о его прогнозе. Если к телу приложена некая постоянная или переменная нагрузка, можно вычислить только соответствующее напряжённо-деформированное состояние и ответить на вопрос, достигнута или нет где-либо предельная нагрузка. В ряде важных случаев при решении инженерных задач такие ответы оказываются полезными и достаточными, но сказать что-либо о механизмах и сценариях формирования очага разрушения невозможно.

Ещё в 70-х годах прошлого века была установлена фундаментальная закономерность разрушения любых материалов: полному разрушению (и не только усталостному, но и любому) предшествует более или менее значительный подготовительный период. Например, для силикатных стёкол, разрушение которых рассматривалось как мгновенное, скорость развития трещины в начале процесса оказалась в миллионы раз меньше, чем на заключительном этапе [5], и это при том, что процесс разрушения в целом укладывается в несколько миллисекунд.

Бурное развитие идей и методов нелинейной динамики в эти же годы и в последующие десятилетия позволили С.П. Курдюмову с учениками сформулировать новую концепцию сверхбыстрых катастрофических этапов эволюции нелинейных систем – режимов с обострением [3] – и аналитически и численно изучить виды и особенности этих режимов.

Эти идеи и полученные на их основе качественные результаты являются ключевыми и для понимания процесса разрушения. В рассматриваемом случае хрупкого или квазихрупкого разрушения (а также при разрушении любых материалов и конструкций, пластичных металлов, хрупких бетонов, горных пород, геосред и т.д.) подготовительный процесс накопления неупругих деформаций или повреждений в хрупких средах локализуется в определённых областях. Эта подготовительная квазистационарная стадия в силу свойства самоорганизованной критичности деформируемого твёрдого тела как нелинейной динамической системы рано или поздно переходит в сверхбыструю катастрофическую стадию – режим с обострением по С.П. Курдюмову [2, 4, 7]. Понятно, что любой прогноз разрушения в принципе невозможен без изучения особенностей развития этих стадий и условий перехода стадии устойчивого развития разрушения в неустойчивый сверхбыстрый режим.

Математическая постановка задачи.

Модель квазихрупкой среды

В соответствии с эволюционной концепцией описания процессов неупругого деформирования и последующего разрушения [2, 4, 6–9] полная система уравнений включает:

1. Фундаментальные законы сохранения:

$$\text{-массы} \quad \frac{d\rho}{dt} + \rho \operatorname{div} \vec{v} = 0 ; \quad (1)$$

$$\text{- количества движения} \quad \rho \frac{dv_i}{dt} = \frac{d\sigma_{ij}}{dx^j} + \rho F_i ; \quad (2)$$

$$\text{- энергии} \quad \frac{dE}{dt} = \frac{1}{\rho} \sigma_{ij} \frac{d\varepsilon_{ij}}{dt} . \quad (3)$$

2. Эволюционные уравнения первой группы, записанные в релаксационной форме, в которых приращения напряжений $\Delta\sigma_{ij} = \dot{\sigma}_{ij}\Delta t$ пропорциональны приращениям полных скоростей деформаций $\dot{\epsilon}_{ij}^T$ и релаксируют пропорционально развитию неупругой скорости деформации $\dot{\epsilon}_{ij}^P$. Процедура снесения напряжений на мгновенную предельную поверхность будет означать мгновенную релаксацию напряжений на каждом временном шаге до некоего динамического равновесия, определяемого как релаксацией, так и скоростью деградации прочностных и упругих параметров среды. При $\dot{\epsilon}_{ij}^P > \dot{\epsilon}_{ij}^T$ $\Delta\sigma_{ij} < 0$, идёт релаксация, при $\dot{\epsilon}_{ij}^P < \dot{\epsilon}_{ij}^T$ $\Delta\sigma_{ij} > 0$ и напряжения растут:

$$\dot{\sigma}_{ij} = \lambda(\dot{\theta}^T - \dot{\theta}^P)\delta_{ij} + 2\mu(\dot{\epsilon}_{ij}^T - \dot{\epsilon}_{ij}^P); \quad (4)$$

$$\sigma_{ij} = (-P\delta_{ij} + S_{ij}); \quad (5)$$

$$\dot{P} = -K\frac{\dot{V}}{V}; \quad (6)$$

$$\frac{DS_{ij}}{Dt} = 2\mu\left(\dot{\epsilon}_{ij} - \frac{1}{3}\dot{\theta}\delta_{ij}\right); \quad (7)$$

$$\frac{DS_{ij}}{Dt} = \dot{S}_{ij} - S_{ik}\dot{\omega}_{jk} - S_{jk}\dot{\omega}_{ik}; \quad (8)$$

$$\dot{\epsilon}_{ij}^T = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v_i}{\partial x^j} + \frac{\partial v_j}{\partial x^i}\right); \quad (9)$$

$$\dot{\omega}_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v_i}{\partial x^j} - \frac{\partial v_j}{\partial x^i}\right). \quad (10)$$

Здесь D/Dt – коротационная производная Яумана, учитывающая поворот элементов среды при деформировании.

3. Задачей эволюционных уравнений второй группы является определения скоростей неупругих деформаций в уравнениях (4). В общем случае это кинетические уравнения, задающие скорости неупругой деформации и обеспечивающие релаксацию упругих напряжений в (4). В настоящей работе компоненты тензора скоростей неупругой деформации определим в соответствии с теорией пластического течения и мгновенной релаксации напряжений на каждом временном шаге.

Предельная поверхность напряжений записана в форме Мизеса – Шлейхера, что позволяет удовлетворить требованию обобщения условий пластичности и хрупкого разрушения: форма предельной поверхности и её свойства полностью определены тремя параметрами напряжённого состояния – октаэдрическим нормальным напряжением $\sigma_{\text{окт}}$, октаэдрическим сдвиговым напряжением $\tau_{\text{окт}}$ и видом напряжённого состояния μ_σ (параметром Лоде – Надаи)

$$f = \frac{\alpha}{3}J_1(\sigma_{ij}) + J_2^{1/2}(\sigma_{ij}) - Y \quad (11)$$

и является обобщением критерия текучести Кулона – Мора, где α имеет смысл коэффициента внутреннего трения. За основу взята модель Друккера – Прагера – Николаевского с неассоциированным законом течения, позволяющая описывать процесс дилатансии как независимый от внутреннего трения. В этом случае уже неассоциированного закона неупругого течения пластический потенциал не совпадает с функцией текучести и для предельной поверхности (11) записывается в виде [10]

$$g(\sigma_{ij}) = J_2 + \frac{\Lambda}{3} J_1 \left(2Y - \frac{\alpha}{3} J_1 \right) + \text{const}. \quad (12)$$

Компоненты тензора скоростей неупругой деформации определяются следующим образом:

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \dot{\lambda} \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} = (s_{ij} + \frac{2}{3} \Lambda (Y - \frac{\alpha}{3} I_1) \delta_{ij}) \dot{\lambda}; \quad (13)$$

$$\dot{I}_1^p = 2\Lambda (\dot{I}_2^p)^{1/2}, \quad (14)$$

что позволяет установить связь между объёмной и сдвиговой составляющими пластической деформации (14) [7], где Λ имеет смысл коэффициента дилатансии. Однако модель пока не связана с видом напряжённого состояния. Эта зависимость будет прописана при задании скорости накопления повреждений.

4. Разрушение материала в развиваемом подходе описано как процесс обвальной деградации прочности материала до нуля при формировании трещины на сверхбыстрой катастрофической стадии эволюции НДС, являющейся завершающим этапом предразрушения, среда остается консолидированной, следовательно, остаются справедливыми все уравнения неупругого деформирования (1) – (14); нет также необходимости вводить в модель прочностные параметры, определяющие «предельное» состояние материала. По развиваемым в настоящей работе представлениям предельное состояние должно формироваться в нагружаемой среде по мере накопления в ней неупругих деформаций и повреждений. Необходимо только задать величину Y_0 – исходную прочность материала.

Согласно идеям классиков кинетической концепции разрушения (С.Н. Журкова, А.В. Степанова, Р. Беккера, Я.И. Френкеля и других) [11], для того, чтобы довести неповреждённый кристалл до состояния локального сдвига, надо совершить работу, пропорциональную разнице свободных энергий F идеального кристалла и

кристалла в текущем состоянии $A(\sigma) \sim V \frac{\sigma_0^2 - \sigma^2}{2\mu}$ (V – объём, σ_0 – значение теоретической прочности, σ – текущий уровень напряжений, μ – модуль сдвига).

Орован модифицировал эту идею, положил энергию активации, зависящую только от величины пластической (неупругой) деформации, и принял, что $\Delta\sigma = \sigma - \sigma_0 = h\varepsilon_p$, где h – коэффициент деформационного упрочнения [12],

$$F(\sigma) \sim h^2 V \frac{\varepsilon_p^2}{2\mu}.$$

Воспользуемся этой идеей и положим функцию деградации среды $D = D(t, \mu_\sigma, \varepsilon)$ в виде зависимости от накапливаемой средой неупругой деформации $\varepsilon_p = \varepsilon_{\text{тек}} - \varepsilon_0$ и вида напряжённого состояния:

$$D = \int_{t_0}^t \frac{[K_1(\varepsilon_{\text{тек}} - \varepsilon_0)^2 + K_2(\varepsilon_{\text{тек}} - \varepsilon'_0)^2] dt}{\varepsilon_*^2 t_*}, \quad (15)$$

$$\varepsilon_* = \varepsilon_{0*}(1 + \mu_\sigma)^n, \quad Y = Y_0(1 - D), \quad D \leq 1,$$

$$\mu_\sigma = 2 \frac{S_2 - S_3}{S_1 - S_3} - 1 \quad (16)$$

$\varepsilon_{\text{тек}}$ – второй инвариант тензора деформаций, $\varepsilon_0, \varepsilon'_0$ – начальные степени деформации, по достижении которых в материале начинается накопление повреждений в областях сжатия и растяжения соответственно (составляют 0,2–0,5 от предела упругости в зависимости от решаемой задачи), что позволяет накапливаться повреждениям еще на упругой стадии деформирования. Причём $\varepsilon'_0 \ll \varepsilon_0$, таким образом, повреждения в областях растяжения-сдвига ($\mu_\sigma < 0$) начинают копиться при существенно меньших напряжениях, чем при $\mu_\sigma > 0$ в областях сжатия-сдвига. Скорости накопления повреждений для локальных областей, где $\mu_\sigma < 0$ также существенно выше, чем в областях сжатия-сдвига ($\mu_\sigma > 0$). Этот процесс регулируется параметром $\varepsilon_* = \varepsilon_*(\mu_\sigma)$ в (15). Таким образом, отклик среды на вид напряженно-го состояния (её текущая прочность) формируется в процессе её нагружения. Следовательно, прочностные параметры будут деградировать существенно быстрее в тех областях (частицах) среды, где параметр Лоде – Надаи $\mu_\sigma < 0$, что соответствует растяжениям-сдвигам. Этот отклик зависит также от истории нагружения. Если в какой-то частице среды сначала было, например, растяжение со сдвигом, а затем вид напряженного состояния изменился на сжатие со сдвигом, то процесс дальнейшего разрушения будет развиваться уже при пониженных прочностных параметрах, хотя и более медленно, в соответствии с кинетикой (15). При $\mu_\sigma \leq 0$ $K_1 = 0$ и $K_2 = 1$, при $\mu_\sigma > 0$ $K_1 = 1$ и $K_2 = 0$. ε_{0*} – параметр модели, t_* имеет смысл характерного времени процесса.

Расчеты проводились в 2D-постановке при условии плоской деформации с использованием схемы второго порядка точности, подробно описанной в работе [13].

Результаты моделирования хрупкого и квазихрупкого разрушения композиционных керамических материалов

На рис. 1 представлены модельные структуры керамических композитов с матрицей из диоксида циркония ZrO_2 и различным процентным содержанием упрочняющих частиц оксида алюминия Al_2O_3 (корунда). В расчетах осуществлялось одноосное сжатие модельных образцов керамических композитов.

В [14] было показано, что в керамическом композите при нагружении возникают локальные области растягивающих напряжений на межфазовых границах. И именно в этих областях растягивающих напряжений происходит разрушение материала с образованием мезотрещин. Покажем, что разрушение композитов в подавляющем большинстве случаев происходит в областях растяжения. Это обусловлено двумя причинами: 1) наличие структурных неоднородностей всегда приводит к формированию в композите локальных областей растяжения; 2) прочность квазихрупких материалов при растяжении существенно ниже, чем при сжа-

тии. Скорости накопления повреждений в областях растяжения также существенно выше.

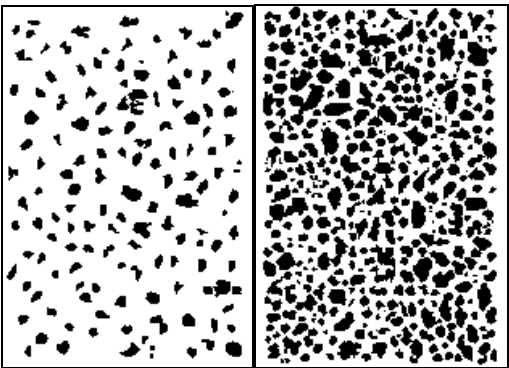


Рис. 1. Модельные структуры композитов с 15 и 40 %-м содержанием упрочняющих частиц

В табл. 1 приведены физико-механические свойства материалов, составляющих композит.

Таблица 1

Физико-механические свойства материалов, составляющих композит

Параметр	ρ , г/см ³	K , Мбар	μ , Мбар	γ , Мбар	Λ	α
ZrO ₂	5,7	1,433	0,6615	0,021	0,22	0,62
Al ₂ O ₃	3,984	3,46	1,6	0,0374	0,12	0,6

На рис. 2 продемонстрированы $\sigma - \epsilon$ -диаграммы для модельных композитов при различных условиях нагружения – идеального скольжения (рис. 2, а) и защемления (рис. 2, б) на границе приложения нагрузки.

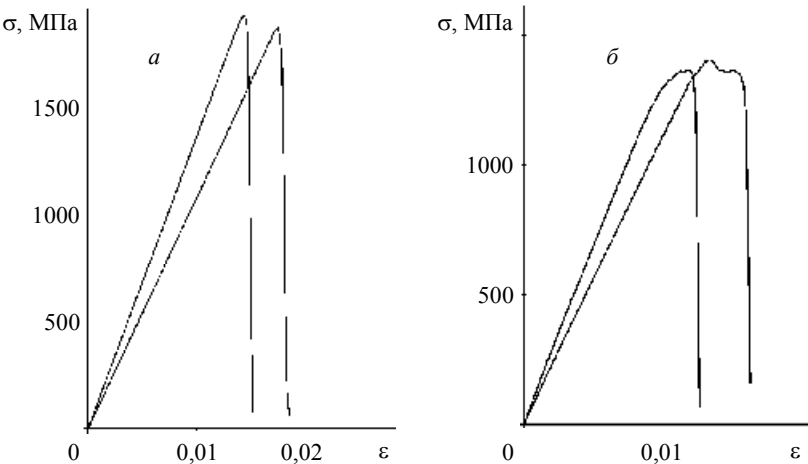


Рис. 2. $\sigma - \epsilon$ -диаграммы в случае: идеального скольжения (а), защемления (б) на границе приложения нагрузки

Общей закономерностью для двух вариантов нагружения является эволюция прочности композитов в режиме с обострением на заключительной стадии деформирования. Устойчивое медленное накопление неупругих деформаций и повреждений на более низких структурных уровнях, чем рассматриваемый макроуровень, сменяется стадией неустойчивого лавинообразного накопления повреждений (режима с обострением), который занимает десятые доли процента макродеформации, то есть происходит локализация процесса разрушения во времени. В режиме с обострением происходит глобальная потеря устойчивости, прочность и упругие модули композитов деградируют до нуля очень быстро.

В случае идеального скольжения на границе приложения нагрузки модельные композиты разрушаются хрупко, то есть за стадией линейного роста напряжений наблюдается резкий излом и эволюция системы в режиме с обострением. Особенностью же деформационного отклика в случае защемления на границе приложения нагрузки (рис. 2, б) является наличие стадии неупругого деформирования образцов за счет формирования областей сдвигов-сжатий вблизи защемленной границы, что резко снижает скорость накопления повреждений в этих локальных областях. Этот процесс задерживает фазу режима с обострением и глобальной деградации физико-механических свойств среды. Таким образом, стадия неупругой деформации занимает несколько процентов общей макродеформации.

Иной сценарий развивается в случае бокового давления (рис. 3). Стесненность деформации приводит к затягиванию катастрофической фазы эволюции системы. Ресурс прочности в этом случае расходуется постепенно, наблюдается последовательность сбросов и подрастаний напряжений на фоне общей эволюции системы в режиме с обострением. Подобная ситуация наблюдается в геосредах при так называемых «медленных» землетрясениях (брадисейсмах), когда особенности стесненности деформации приводят к затягиванию процесса локального разрушения геосреды.

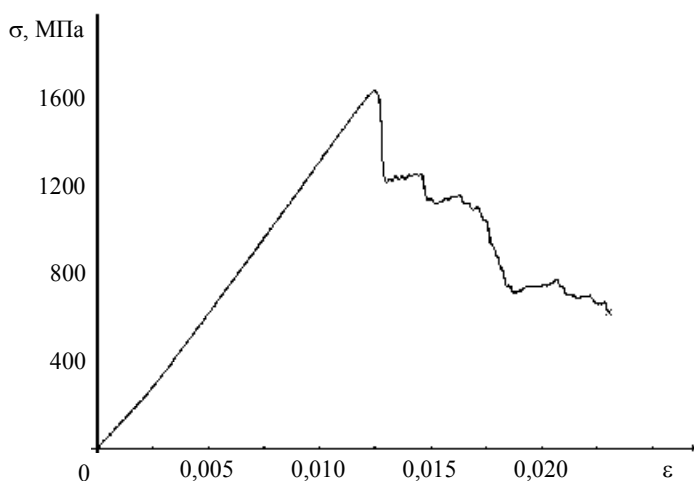


Рис. 3. σ – ϵ -диаграмма в случае бокового обжимающего давления

Подобное изменение вида напряженно-деформированного состояния (НДС) в локальной области разрушаемого материала, в частности в области формирующейся трещины, демонстрирует рис. 4 (отмечено овалом).

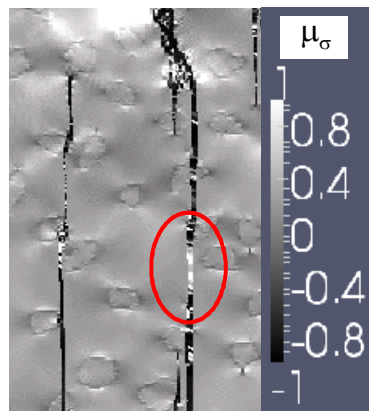


Рис. 4. Часть расчетной области, отражающая вид напряженного состояния в композите, определяемого по параметру Лоде – Надаи μ_σ

На рис. 4 представлена часть расчетной области, отражающая вид напряженного состояния в композите, определяемый по параметру Лоде – Надаи. Во-первых, формирование полосы локализованного разрушения происходит в узких зонах нормальных растягивающих напряжений, $\mu_\sigma \rightarrow -1$.

Во-вторых, в сформировавшейся макротрещине, в отмеченной овалом области, напряженное состояние сменилось на сжатие-сдвиги, что означает переход в режим компактирования за счет нарастающей стесненности деформации, обусловленной наличием упрочняющих частиц. Этот процесс задержки разрушения в матрице демонстрирует еще одну положительную роль упрочняющих частиц.

На рис. 5 – 8 представлены рассчитанные картины неупругих деформаций в композитах для трех степеней деформации, напряженного состояния (по параметру Лоде – Надаи), меры поврежденности (функция D) при 2 вариантах граничных условий.

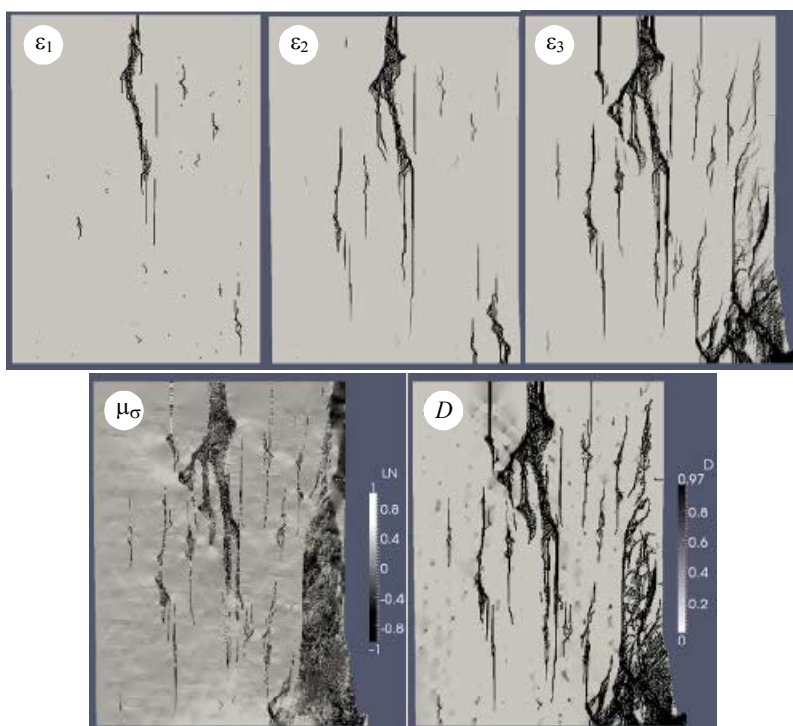


Рис. 5. Расчётные картины: неупругих деформаций (для трёх степеней деформации), напряженного состояния (μ_σ), меры поврежденности в модельном образце (D) композита с 15 %-м содержанием упрочняющих частиц в случае идеального скольжения на границе приложения нагрузки

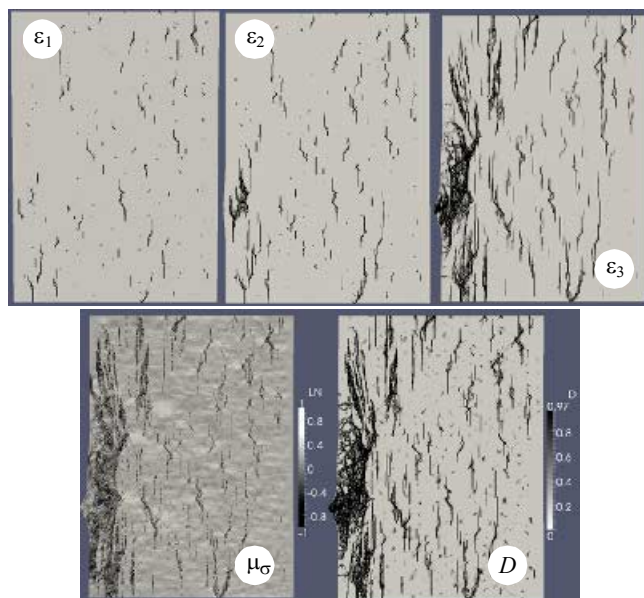


Рис. 6. Расчётные картины: неупругих деформаций (для трёх степеней деформации), напряжённого состояния ($\mu\sigma$), меры повреждённости в модельном образце (D) композита с 40 %-м содержанием упрочняющих частиц в случае идеального скольжения на границе приложения нагрузки

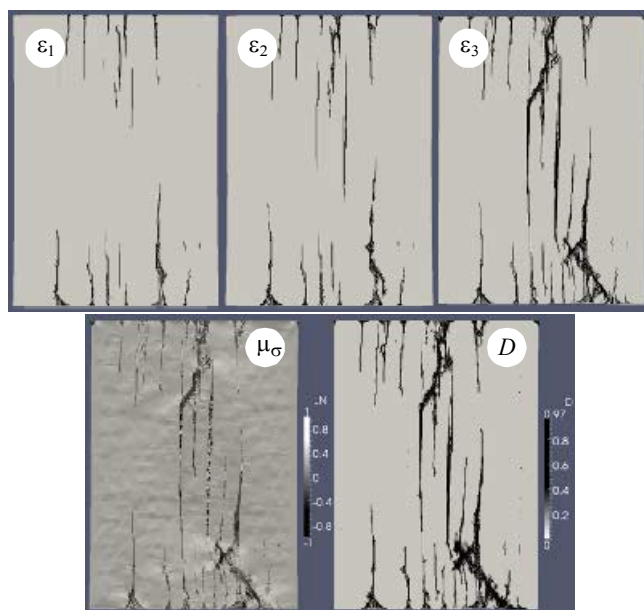


Рис. 7. Расчётные картины: неупругих деформаций (для трёх степеней деформации), напряжённого состояния ($\mu\sigma$), меры повреждённости в модельном образце (D) композита с 15 %-м содержанием упрочняющих частиц в случае жесткого защемления на границе приложения нагрузки

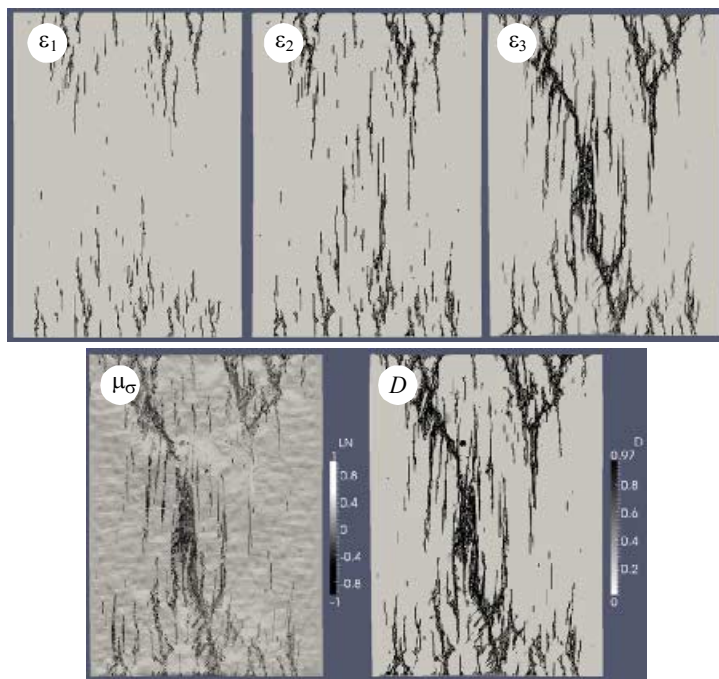


Рис. 8. Расчётные картины: неупругих деформаций (для трёх степеней деформации), напряжённого состояния ($\mu\sigma$), меры повреждённости в модельном образце (D) композита с 40 %-м содержанием упрочняющих частиц в случае жесткого защемления на границе приложения нагрузки

Во всех представленных случаях на начальных стадиях деформирования образцов рост мезотрещин имеет преимущественно вертикальный характер, что показывают и эксперименты [15].

Сравнение картин разрушения модельных композитов при различном процентном содержании упрочняющих частиц демонстрирует различие в механизмах их разрушения. В композите с 40 %-м содержанием корунда большое число упрочняющих частиц одновременно создает возможность для формирования областей локальных растягивающих напряжений на фазовой границе матрица – включение, в которых деградация физико-механических свойств среды происходит значительно быстрее, но и препятствует распространению трещин. В связи с чем на стадии предразрушения в композите с 40 %-м содержанием корунда формируется значительное число мезотрещин в областях растяжения-сдвига, и это более энергоёмкий процесс, чем формирование малого числа протяженных трещин для композита с 15 %-м содержанием упрочняющих частиц (рис. 5, 7).

Динамика роста трещин в таких модельных композитах (рис. 6, 8) для трех степеней деформации ($\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$) показывает, что на стадии предразрушения происходит устойчивое накопление неупругих деформаций и повреждений во всем рассматриваемом объеме композитов. Катастрофическую сверхбыструю фазу эволюции системы – режим с обострением, когда процесс накопления неупругих деформаций и повреждений выходит на макроуровень, предваряет квазистацио-

нарная фаза подготовки, которая выражается в формировании перколяционной сети мезотрещин. На заключительной стадии деформирования происходит объединение соседних мезотрещин в магистральную макротрещину.

Иная ситуация наблюдается в композите с 15 %-м содержанием упрочняющих частиц. Движение вершины мезотрещины, сформировавшейся на межфазовой границе, задерживается меньшим количеством упрочняющих частиц, то есть растущая трещина приблизительно в три раза реже встречает сопротивление со стороны упрочняющих частиц. В связи с этим, длина единичной мезотрещины для композита с 15 %-м содержанием корунда превышает аналогичную длину единичной мезотрещины для композита с 40 %-м содержанием корунда в среднем в 1,5–2 раза. Такое различие на мезоуровне приводит к различию на макроуровне в характерах разрушения двух композитов. В композите с 15 %-м содержанием упрочняющих частиц макротрещина также имеет преимущественно вертикальный характер. Мезотрещины, идущие с противоположных краев образца, попадая в зону динамического влияния, начинают оказывать взаимное влияние друг на друга, что приводит к их объединению на заключительной стадии деформирования.

Характер течения в композите демонстрируют поля смещений точек в образце, например, на рис. 9, 10 представлены поля смещений в модельных композитах, относительно отмеченного зерна, для трёх степеней деформации.

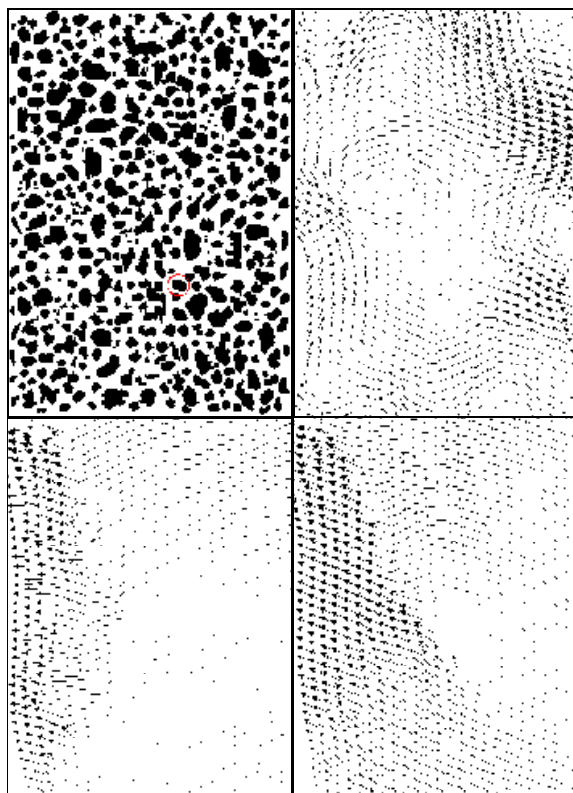


Рис. 9. Расчётные поля смещений для композита с 40 %-м содержанием упрочняющих частиц в случае идеального скольжения на границе приложения нагрузки

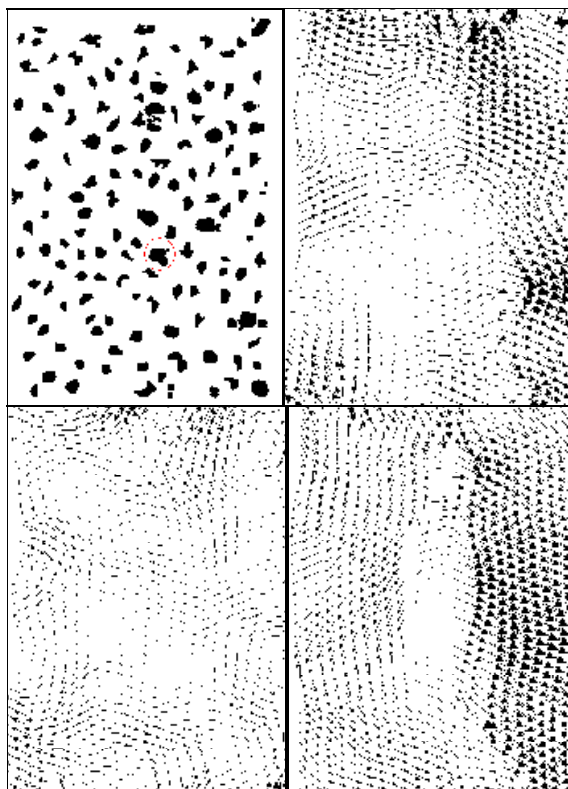


Рис. 10. Расчётные поля смещений для композита с 15 %-м содержанием упрочняющих частиц в случае заземления на границе приложения нагрузки

Поля смещений обладают ярко выраженной неоднородностью, эволюция полей смещений во времени показывает, что НДС в области зафиксированного зерна меняется в ходе нагружения – от сжатия на начальной стадии деформирования, затем сдвиги и формирование вихрей и растяжение при фрагментации композита. При образовании магистральной трещины поле смещений демонстрирует коррелированное движение фрагментов композита в нормальном к магистральной трещине направлении.

Картина мониторинга меры поврежденности D для частиц в объеме образца, находящихся в предполагаемой зоне взаимного динамического влияния (рис. 11) демонстрирует наличие медленной квазистационарной фазы роста поврежденности и сверхбыстрой фазы эволюции – режима с обострением с ростом поврежденности в частице композита до максимума. Из рис. 11 также видно, что поврежденность в соседних частицах последовательно достигает своего максимального значения. Подобное поведение может свидетельствовать о миграции деформационной активности. А именно за режимом с обострением в одной из частиц начинается (или продолжается) квазистационарная фаза в соседней частице, а затем и в ней начинается сверхбыстрая фаза эволюции и происходит миграция деформационной активности в следующую частицу.

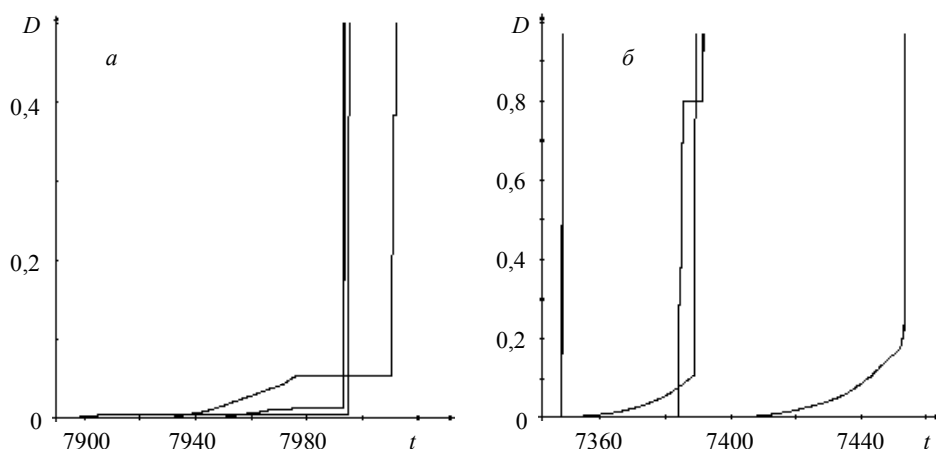


Рис. 11. Мониторинг функции поврежденности D для частиц образца, находящихся в зоне предполагаемого динамического влияния, в композите с 15 %-м содержанием упрочняющих частиц (a – при условии жесткого защемления на границе приложения нагрузки, b – при условии идеального скольжения на границе приложения нагрузки)

Заключение

В рассматриваемой модели среды предельное состояние в нагружаемом материале формируется в зависимости от вида напряженного состояния.

Изучение закономерностей хрупкого и квазихрупкого разрушения композиционных керамических материалов с использованием разработанной модели квазихрупкой среды показало, что процесс разрушения всегда развивается в две стадии – квазистационарная фаза медленного устойчивого накопления неупругих деформаций и повреждений во всей иерархии структурно-масштабных уровней сменяется режимом с обострением – сверхбыстрой катастрофической фазой эволюции системы, когда процесс выходит на макроуровень. При идеальном скольжении на границе приложения нагрузки разрушение носит хрупкий характер, когда за линейной стадией роста напряжений следует глобальная потеря устойчивости и деградация упругих и прочностных свойств композитов до нуля. При защемлении на границе приложения нагрузки наблюдается стадия предварительного неупругого деформирования композитов с образованием локальных областей потери несущей способности, которая занимает несколько процентов макродеформации. При этом стадия эволюции системы в режиме с обострением затягивается.

В условиях стесненной деформации наблюдается иной сценарий эволюции композита. Ресурс упругих и прочностных свойств среды расходуется постепенно. На фоне общей эволюции системы в режиме с обострением наблюдается последовательность подрастаний и сбросов средних напряжений на $\sigma - \varepsilon$ -диаграмме.

Показано, что хрупкое и квазихрупкое разрушение материалов происходит преимущественно в областях, где преобладают растягивающие напряжения, в которых скорость деградации упругих и прочностных свойств среды выше на порядки. На стадии предразрушения формируется перколяционная сеть мезотрещин, влияние которых на заключительной стадии деформирования эволюционирует в макротрещину.

ЛИТЕРАТУРА

1. Панин В.Е., Коротаев А.Д., Макаров П.В., Кузнецов В.М. Физическая мезомеханика материалов // Изв. вузов. Физика. 1998. № 9. С. 8–36.
2. Макаров П.В. Математическая теория эволюции нагружаемых твердых тел и сред // Физ. мезомех. 2008. Т. 11. № 3. С. 19–35.
3. Курдюмов С.П. Режимы с обострением. Эволюция идеи / под ред. Г.Г. Малинецкого. 2-е изд., испр. и доп. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 312 с.
4. Макаров П.В. Самоорганизованная критичность деформационных процессов и перспективы прогноза разрушения // Физ. мезомех. 2010. Т. 13. № 5. С. 97–112.
5. Партон В.З., Морозов Е.М. Механика упруго-пластического разрушения. М.: Наука, 1974. 416 с.
6. Макаров П.В. Эволюционная природа блочной организации геоматериалов и геосред. Универсальный критерий фрактальной делимости // Геология и геофизика. 2007. Т. 48. № 7. С. 724–746.
7. Макаров П.В., Смолин И.Ю., Стефанов Ю.П. и др. Нелинейная механика геоматериалов и геосред. Новосибирск: Академич. изд-во «Гео», 2007. 235 с.
8. Макаров П.В. Нагружаемый материал как нелинейная динамическая система. Проблемы моделирования // Физ. мезомех. 2005. Т. 8. № 6. С. 39–56.
9. Евтушенко Е.П., Еремин М.О., Костандов Ю.А. и др. Моделирование разрушения хрупких и квазихрупких тел и геосред // Физ. мезомех. 2012. Т. 15. № 3. С. 35–44.
10. Гараши И.А., Николаевский В.Н. Неассоциированные законы течения и локализации пластической деформации // Успехи механики. 1989. Т. 12. № 1. С. 131–183.
11. Журков С.Н., Нарзуллаев Б.Н. Временная зависимость прочности твёрдых тел // ЖТФ. 1953. Т. XXIII. Вып. 10. С. 1677–1689.
12. Orowan E.J. West Scot. Iron and steel Inst., 54, 1947, 45.
13. Уилкинс М.Л. Расчёт упругопластических течений // Вычислительные методы в гидродинамике. М.: Мир, 1967. С. 212–263.
14. Баренблатт Г.И., Черепанов Г.П. О влиянии границ тела на развитие трещин хрупкого разрушения // Изв. АН СССР, ОТН, механика и машиностроение. 1960. № 3.
15. Еремин М.О., Макаров П.В., Смолин И.Ю. и др. Изучение влияния ориентации трещины на разрушение хрупких образцов при сжатии // Материалы XXI Международной научной школы. Симферополь: Таврич. нац. ун-т, 2011. 412 с.

Статья поступила 23.06.2012 г.

Makarov P. V., Eremin M. O. SIMULATION OF CERAMIC COMPOSITIONAL MATERIALS FRACTURE UPON UNIAXIAL COMPRESSION. Based on the developed model of quasi-brittle media, the brittle and quasi-brittle fracture of ceramic compositional materials with zirconium dioxide matrix and different percent content of corundum hardening particles is studied. The fracture is shown to develop in two stages – slow quasi-stationary phase of damage accumulation and superspeed catastrophic phase – aggravation mode when the fracture process reaches the macro-level and the macro-crack formation occurs.

Keywords: brittle and quasi-brittle fracture, quasi-stationary phase, aggravation mode

MAKAROV Pavel Vasiliyevich (Tomsk State University)

E-mail: pvm@ispms.ru

YEREMIN Mikhail Olegovich (Tomsk State University)

E-mail: bacardi@sibmail.com