

УДК 541.64 : 539.3

© 1992

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ НЕОДНОРОДНОЙ СИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Н. И. Лебовка, В. В. Манк, Н. С. Пивоварова

Методом компьютерного моделирования исследована кинетика разрушения неоднородной плоской квадратной решетки в условиях линейного увеличения деформации. Показано, что при достаточно больших значениях характеристического времени нарастания деформации θ отчетливо проявляются три стадии временной эволюции данных систем. Сначала наблюдается инкубационный период, в течение которого происходит накопление отдельных трещин; затем протекает активная фаза роста магистральных трещин, которая заканчивается фазой потери целостности материала. Показано, что степень разрушения системы уменьшается, а долговечность увеличивается при увеличении θ . Обсуждаются деформационные свойства для систем различной степени неоднородности.

Методы компьютерного моделирования широко применяются для изучения процессов роста и распада агрегатов, осадкообразования, распространения трещин, электрического пробоя и ряда других явлений. При исследовании различных физических процессов часто используются общие базисные модели и наблюдаемые структуры обычно проявляют фрактальные свойства [1]. При моделировании разрушения материалов под действием механических нагрузок до настоящего времени в основном применялись два различных подхода — молекулярно-динамический [2-4] и сеточный [5-7].

Применение первого подхода несколько ограничено вследствие необходимости затрат больших вычислительных мощностей. Для второго подхода, в котором материал рассматривается как система узлов, соединенных деформируемыми связями, особо важен выбор адекватной модели для описания требуемого механического свойства. В рамках данного подхода проведены исследования особенностей разрушения систем при различных выборах модели для вероятности разрушения отдельных связей, для решеток различной симметрии, при учете эффектов анизотропии системы для различных моделей разрушения поверхностных пленок и ряда других задач [6].

Большой научный интерес и практическую ценность представляют вопросы, связанные с исследованием кинетики процессов разрушения под действием внешних механических нагрузок и, в частности, нестационарных нагрузок [8]. Важным представляется выяснение влияния скорости изменения внешней нагрузки или деформации на кинетику протекания процесса разрушения и характер образующихся структур в системе. Различные кинетические модели разрушения обсуждаются в [6, 7, 9, 10].

В настоящей работе используется детерминистический сеточный подход к изучению кинетики разрушения неоднородной системы в нестационарном поле [7]. При данном подходе на первом этапе происходит разрыв связей, определяемый используемым критерием разрушения, а затем система релаксирует до достижения равновесия и процедура повторяется. В [11, 12] этот подход применяется для

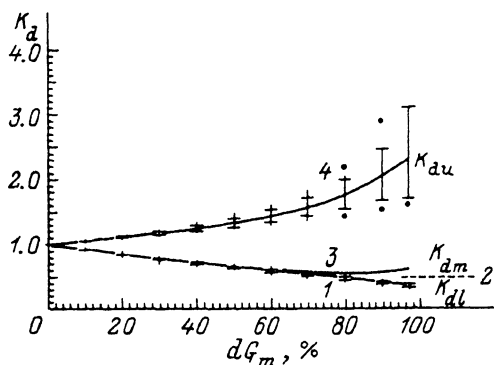


Рис. 1. Карта разрушения для неоднородной плоской квадратной решетки.

Различные точки соответствуют различным начальным конфигурациям, а сплошные линии отвечают конфигурации со стартовым числом $N_s = 1$.

определения условий развития пробоя в электрическом поле и механического разрушения неоднородных материалов. Физическим аналогом элементарного временного шага в данной модели является время образования дилатона в модели Журкова [13].

1. Модель

Неоднородный материал моделируется системой хрупких стержней, связывающих узлы плоской квадратной решетки. Модули упругости данных стержней распределены случайным образом в интервале $G(i, j) = G_m (1 \pm \pm dG_m/100)$, где G_m — средний модуль стержня, dG_m (%) — величина дисперсии, определяющая степень неоднородности системы. Решетка между верхним и нижним рядами узлов деформировалась на величину d . Коэффициент деформации определяется как $K_d = d/Nd_c$, где d_c — критическая деформация разрушения одного стержня, N — размер решетки. На боковых гранях задавались периодические граничные условия $d(1, j) = d(N, j)$ ($j = 1, N$).

Различные конфигурации распределения G задавались выбором стартового числа N_s для генератора случайных чисел. Вычисления проводились для достаточно больших решеток 50×50 . Карта разрушения в координатах $K_d - dG_m$ для данных решеток представлена на рис. 1. На карте выделены 4 области, соответствующие различным режимам разрушения. В области 1 разрушение отсутствует; в области 2 образуются только отдельные трещины, но магистральные трещины не растут; в области 3 наблюдается длительный рост магистральных трещин, образуется перколяционный кластер и происходит потеря целостности материала; в области 4 потеря целостности происходит на первом шаге эволюции. Сплошными линиями показана карта для конфигурации со стартовым числом $N_s = 1$, которое использовано в настоящей работе. Точками показаны результаты для других начальных конфигураций, пределы указывают стандартное отклонение.

В нестационарных условиях моделирования использован наиболее простой линейный закон изменения коэффициента деформации, соответствующий испытаниям с постоянной скоростью деформации [8]

$$\begin{aligned} K_d &= K_{d1} + (t - 1)/\theta, & K_d < K_{d\max}, \\ K_d &= K_{d\max}, & K_d = K_{d\max}, \end{aligned} \quad (1)$$

где величина $\theta = 1/K_d$ является характеристическим временем нарастания деформации; K_{d1} — значения, соответствующие нижней ветви диаграммы разрушения (рис. 1).

Для всех dG_m в интервале 0—100% моделирование проводилось при выборе одинакового и достаточно большого значения $K_{d\max} = 1$. Такой выбор обусловлен тем, что в стационарных условиях моделирования (т. е. в

пределе $\theta \rightarrow 0$) для решеток различной степени неоднородности начальная конфигурация системы при $t=1$ и $K_d=1$ является в некотором смысле стандартной. В данном случае характер разрушений в системах различной степени неоднородности при $t=1$ отличается незначительно и число разрушенных элементов примерно равно 1241 ± 5 (для решетки $N=50$). В условиях нестационарной деформации, задаваемой соотношениями (1), в начальный период образуется некоторое количество трещин на тех участках, где реализован критерий разрушения, а затем происходит развитие в основном только магистральной трещины (или трещин), которое определяется перераспределением нагрузок при разрушении связей.

2. Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлены характерные картины разрушений для двух систем различной степени неоднородности $dG_m=20$ (а) и 90 (б) при различных значениях θ на конечном этапе эволюции после окончательного завершения процесса разрушения. При больших скоростях нарастания K_d в системе, кроме основных магистральных трещин, образуется также большое количество малых трещин, т. е. происходит процесс микрорастрескивания системы. При уменьшении скорости нарастания деформации наблюдается преимущественный рост перколяционных трещин, причем степень разветвленности трещин уменьшается. В пределе бесконечно малой скорости нарастания деформации практически образуются только связанные элементы трещин.

Для систем с малой степенью неоднородности характерно образование достаточно протяженных линейных трещин (рис. 2, а). При уменьшении θ наблюдается уменьшение количества перколяционных трещин. Для сильно неоднородных систем (рис. 2, б) форма трещин значительно отличается от линейной и степень разветвленности трещин в поперечном направлении увеличивается.

Типичные кинетические кривые относительной скорости разрушения $Nb(t)/Nb_{\max}$ и относительного числа разрушенных элементов $Nb(t)/N_{00}$ (Nb_{\max} — производная числа разрушенных элементов в точке максимума, N_{00} — число разрушенных элементов при $t \rightarrow \infty$) для системы с большой степенью неоднородности $dG_m=90$ представлены на рис. 3, а, б. Отметим, что для данных систем отчетливо наблюдаются различные фазы разрушения. В начальный период эволюции происходит процесс роста одиночных трещин, который полностью контролируется скоростью изменения деформации. При этом наблюдаются характерные «волнообразные» изменения скорости роста. Данный инкубационный период продолжается до тех пор, пока не происходит образования достаточно большой магистральной трещины, включающей в себя $0.4-0.5N_{00}$ ($P_d=0.025$) элементов. После этого наступает активная фаза разрушения, протекающая относительно короткий период (5—10 шагов). Отметим, что наблюдаемые аномалии кинетики разрушения для сильно неоднородных систем проявляются в области существования особенностей на диаграмме разрушения (область 2 на рис. 1).

На рис. 4, а, б приведены зависимости времени, соответствующего максимальной скорости пробоя t_m и полуширины функции $Nb(t)\Delta$ от величины θ . Данные величины характеризуют положение активной фазы пробоя и ее продолжительность соответственно. Время инкубационного периода равно приблизительно $t_m - \Delta$. Отметим, что для систем с не очень высокой степенью неоднородности $dG_m < 50 \div 60$ величина t_m незначительно отличается от Δ . Вследствие этого для слабо неоднородных

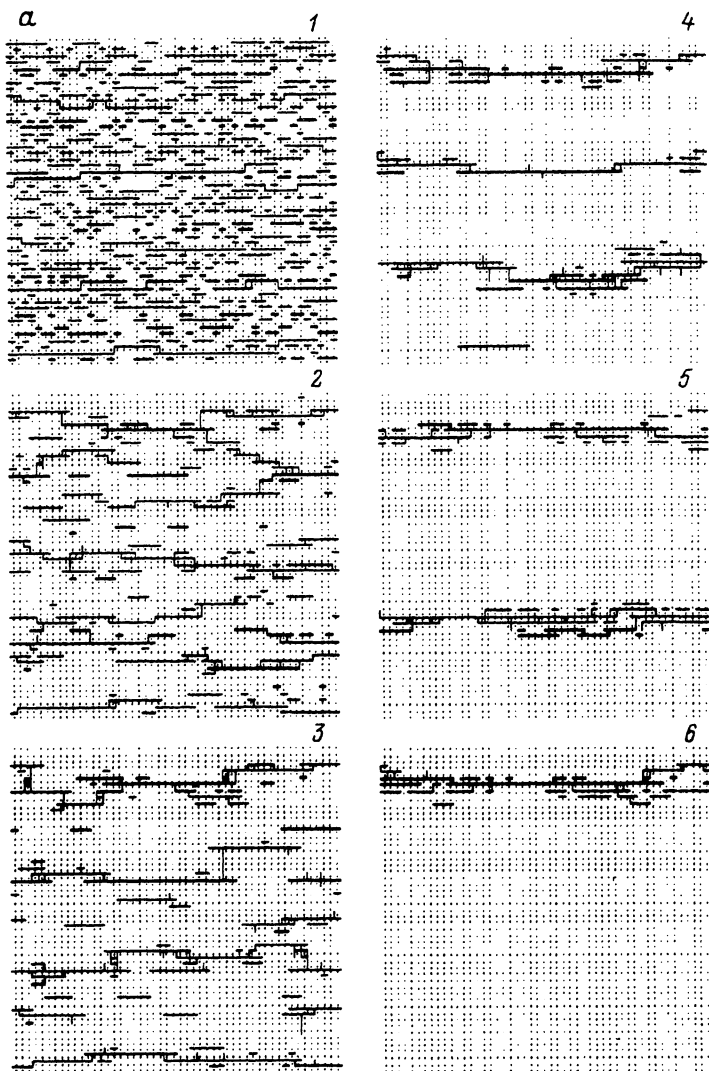


Рис. 2. Диаграммы разрушения на конечном этапе эволюции разрушения при различных значениях характеристического времени нарастания деформации $\theta = 2$ (1), 10 (2), 50 (3), 100 (4), 500 (5), 1000 (6) для решетки с $dG_m = 20$ (а) и 90 (б).

систем не имеет смысла выделять инкубационный период. При увеличении θ величины t_m и Δ возрастают, причем наиболее значительные эффекты наблюдаются для сильно неоднородной системы ($dG_m = 90$).

При увеличении θ (как и при увеличении dG_m) общее число разрушенных элементов уменьшается, причем при $\theta = 1000$ степень разрушения системы $P_d = N_{00}/N_t$ (N_{00} — число разрушенных элементов на конечном этапе эволюции $N_t = NN + N(N - 1)$ — общее число элементов системы) составляет $P_d = 0.04 \div 0.06$ (рис. 5, а). При увеличении dG_m степень разрушения системы незначительно уменьшается. Отметим интересную особенность поведения величины N_{00} при очень малых скоростях нарастания деформации ($\theta > 2000$). В данном случае при достижении некоторых критических значений θ в системе начинает уменьшаться количество

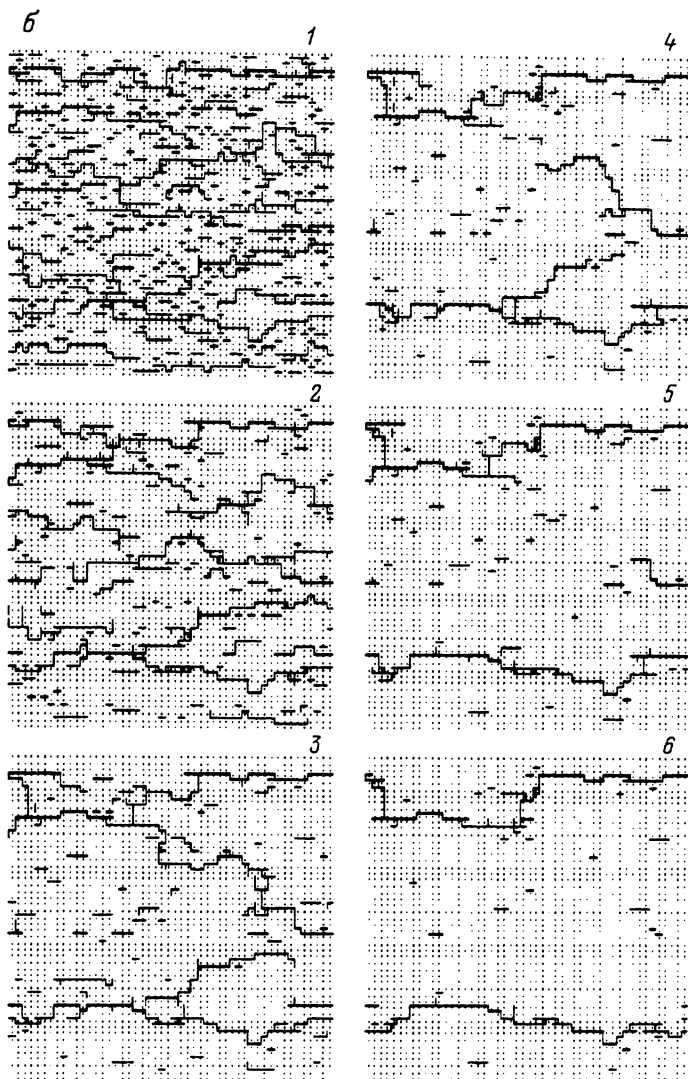


Рис. 2 (продолжение).

развивающихся магистральных трещин и соответственно при достижении очередного критического значения θ величина N_{00} будет скачком уменьшаться. В пределе бесконечно больших значений $\theta \rightarrow \infty$ в системе наблюдается рост только одной магистральной трещины.

В [12] показано, что кинетические кривые нарастания относительного числа разрушенных элементов $Nb(t)/N_{00}$ могут быть удовлетворительно описаны с помощью функции распределения Вейбулла

$$Nb(t)/N_{00} = 1 - \exp - (t/\tau)^r, \quad (2)$$

где τ — характеристическое время разрушения (по порядку величины сравнимо с долговечностью), r — степенной показатель в экспоненте. Данное соотношение позволяет также с удовлетворительной степенью точности (с коэффициентом

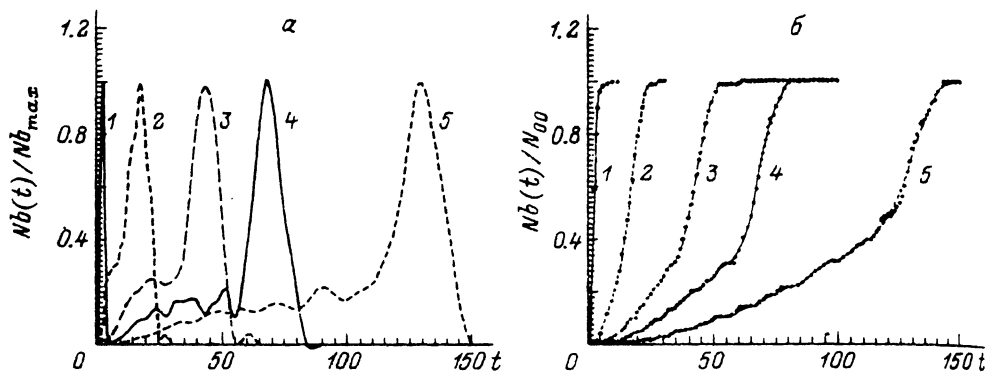


Рис. 3. Зависимость нормированной производной по времени числа разрушенных элементов $Nb(t)/Nb_{max}$ (Nb_{max} — производная в точке максимума) (а) и относительного числа разрушенных элементов $Nb(t)/N_{00}$ (б) от времени при различных значениях θ ($dG_m = 90$).

1 — $\theta = 5$, 2 — 100, 3 — 300, 4 — 400, 5 — 1000.

корреляции метода наименьших квадратов $\rho = 0.91 \div 0.99$) описать результаты моделирования в условиях нестационарной деформации.

Зависимость (2) по форме подобна уравнению Аврами [14], широко применяемому для описания кинетики фазовых превращений. Физическим обоснованием такого подобия может служить то обстоятельство, что кинетический процесс при разрушении можно рассматривать как динамический фазовый переход, связанный конденсацией газа дефектов [15].

Зависимости величин τ и r от θ при различных dG_m представлены на рис. 5, б, в. Показатель экспоненты r при $\theta > 50$ слабо зависит от θ , и эта величина для систем различной степени неоднородности лежит в интервале $r = 2 \div 3.2$. Обращает на себя внимание факт достаточно строгого линейного роста характеристического времени τ с увеличением θ (по крайней мере при достаточно больших $\theta > 25$)

$$\tau = \tau_0 + A\theta, \quad (3)$$

где $\tau_0 = 1.3 \div 3$, а величина A увеличивается с ростом dG_m .

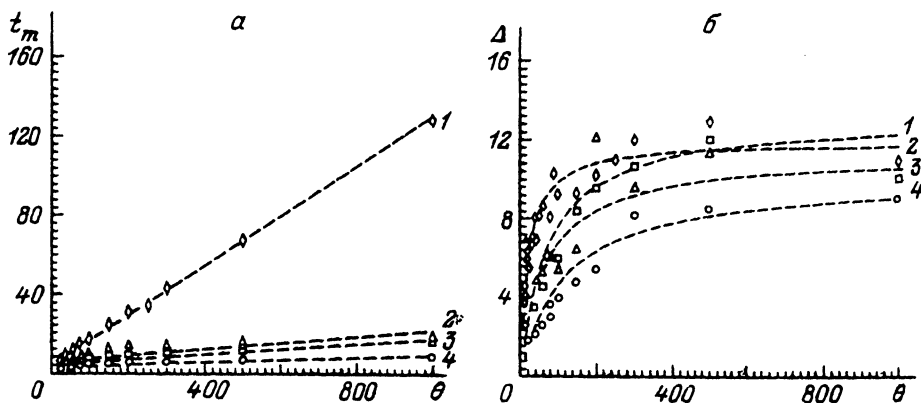
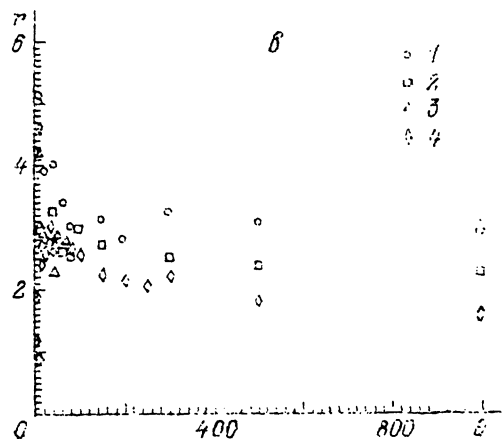
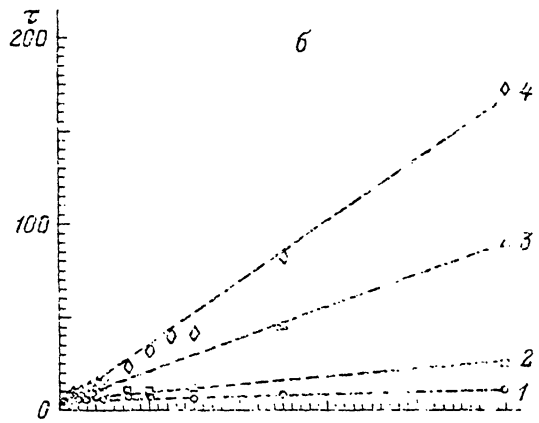
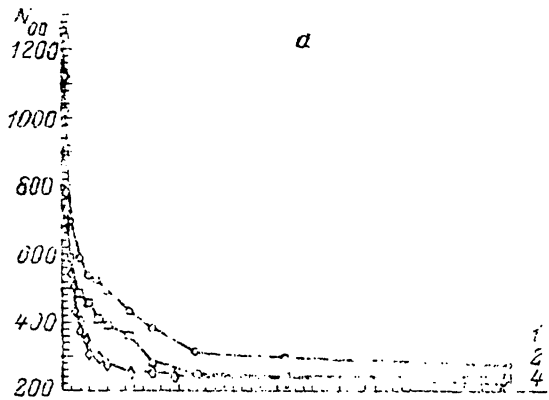


Рис. 4. Зависимости времени, соответствующего максимальной скорости разрушения t_m (а), и полуширины функции $Nb(t)$ (б) от θ при $dG_m = 90$ (1), 60 (2), 40 (3), 20 (4).

Рис. 5. Зависимости предельного числа разрушенных элементов N_{00} (а), характеристического времени нарастания числа разрушенных элементов τ (б) и степенного показателя в обобщенной экспоненциальной зависимости r (в) от θ при $dG_m = 20$ (1), 40 (2), 60 (3), 90 (4).

Результаты линейного сглаживания показаны на рис. 5, б штрихом. Для сильно неоднородных систем характеристическое время τ и, следовательно, долговечность при больших θ могут достигать больших значений, хотя при этом величина τ приблизительно на порядок ниже θ .

Деформационные кривые суммарное напряжение σ —коэффициент деформации K_d при различных значениях θ для систем различной степени неоднородности представлены на рис. 6, а, б. Данные кривые типичны для деформационно разупрочняющихся систем. После начального периода деформационной стабильности $\sigma \sim K_d$ в области вблизи образования перколяционных кластеров происходит достаточно резкое уменьшение величин σ и затем наблюдается область разрыва (резкого увеличения K_d при постоянном σ). При увеличении θ , как и при увеличении dG_m , максимум кривых деформационного разупрочнения смещается в сторону меньших значений K_d и снижение σ происходит в более узком интервале значений ΔK_d . При очень больших значениях θ (пределе $\theta \rightarrow \infty$) область упругой деформации сменяется областью полного разупрочнения, в которой наблюдается резкое падение σ при условии практически постоянной деформации ($\Delta K_d = 0$). Деформационное разупрочнение при данных условиях сопровождается, как уже отмечалось выше, образованием преимущественно связанных кластеров из разрушенных элементов.



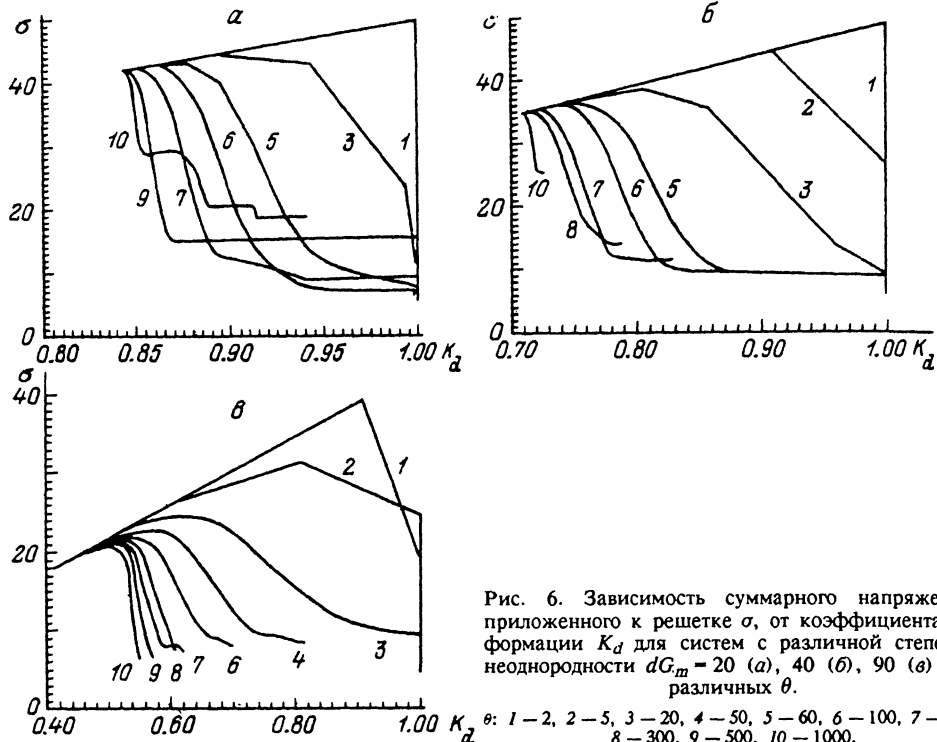


Рис. 6. Зависимость суммарного напряжения, приложенного к решетке σ , от коэффициента деформации K_d для систем с различной степенью неоднородности $dG_m = 20$ (а), 40 (б), 90 (в) при различных θ .
 θ : 1—2, 2—5, 3—20, 4—50, 5—60, 6—100, 7—200, 8—300, 9—500, 10—1000.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

1. При разрушении неоднородной системы в условиях линейного повышения внешней деформации наблюдаются три фазы временной эволюции: инкубационный период накопления отдельных разрушенных элементов, активная фаза разрушения, сопровождающаяся ростом магистральных трещин, и фаза потери целостности материала.

2. Продолжительность инкубационного периода и периода активной фазы возрастает с увеличением степени неоднородности системы и характеристического времени нарастания напряжения.

3. Для сильно неоднородных систем их долговечность практически контролируется изменением θ .

4. Максимальная степень разрушения системы наблюдается при минимальных значениях θ и достигает $P_d = 0.25$. При увеличении θ (как и при увеличении dG_m) степень разрушения уменьшается, причем в пределе $\theta \rightarrow \infty$ эта величина составляет $P_d = 0.04 \div 0.06$.

Список литературы

- [1] Фракталы в физике / Под ред. Л. Пьетронеро и Э. Тозатти. М.: Мир, 1988. 670 с.
- [2] Meakin P. // Phase Transitions. 1988. V. 12. P. 335—489.
- [3] Shchukin D., Yuschenko V. S. // J. Material Sci. 1981. V. 16. P. 313.
- [4] Paskin A., Gonar A., Dienes G. J. // Phys. Rev. Lett. 1980. V. 44. P. 940.
- [5] Добродумов З. В., Ельяшевич А. М. // ФТТ. 1973. Т. 15. № 6. С. 1891—1893.
- [6] Meakin P., Li G., Sander L. M., Yan H., Guinca F., Pla O., Louis E. // Simple stochastic models for material failure. Preprint. Wilmington, USA, 1989. P. 41.
- [7] Takayasu H. // Prog. Theor. Phys. 1985. V. 74. P. 1343.
- [8] Пуарье Ж. П. Ползучесть кристаллов. Механизмы деформации металлов, керамики и минералов при высоких температурах. М.: Мир, 1988. 288 с.
- [9] Овчинский А. С., Гусев Ю. С. // ФТТ. 1981. Т. 23. № 11. С. 3308—3314.
- [10] Дамаскинская Е. Е., Томилин Н. Г. // ФТТ. 1991. Т. 33. № 1. С. 278—286.

- [11] Лебовка Н. И., Манк В. В., Овчаренко Ф. Д., Купчик М. П., Гулый И. С. // ДАН СССР. 1990. Т. 310. С. 1170—1173.
- [12] Лебовка Н. И., Манк В. В., Овчаренко Ф. Д. // ДАН СССР. 1990. Т. 315. С. 401—405.
- [13] Журков С. Н. // ФТТ. 1983. Т. 25. № 10. С. 3119—3122.
- [14] Шестак П. Основы термического анализа. М.: Мир, 1987.
- [15] Хитин А. К. // ФТТ. 1988. Т. 30. № 10. С. 3024—3029.

Отделение природных дисперсных систем
института коллоидной химии и химии воды

АН Украины
Киев

Научно-инженерный центр
автоматизированных биотехнических систем «Сонар»
НТК ИК им. А. В. Глушкова
АН Украины
Киев

Поступило в Редакцию
22 июля 1991 г.
