

05

Изучение особенностей механического отклика гетерогенных материалов с границами раздела, характеризующимися высокой деформационной способностью

© С.Г. Псахье, Е.В. Шилько, С.В. Астафуров

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск
E-mail: astaf@usgroups.com

Поступило в Редакцию 26 августа 2003 г.

На основе дискретного моделирования исследованы особенности деформирования и разрушения материалов с большой долей границ раздела („interfacial materials“) при воздействии сложных знакопеременных нагрузок. Анализировалось влияние частоты циклического воздействия на характер разрушения образцов, их деформируемость, способность диссипировать закачиваемую энергию, а также на распределение деформаций в объеме материала. Показано, что высокочастотные вибрационные воздействия с частотами, значительно превосходящими собственные, могут значительно повышать деформационную способность материалов с большой долей границ раздела.

Хорошо известно, что многие современные материалы, включая наноструктурные, имеют сложную внутреннюю структуру, характеризующуюся значительной долей границ раздела. В литературе материалы такого типа обычно называют „interfacial materials“ [1–3]. Схематически их структуру можно представить в виде набора элементов (блоков), разделенных между собой прослойкой со свойствами, существенно отличающимися от свойств блоков. Во многих случаях, в частности в случае наноструктурных материалов, в качестве прослойки выступает сильно деформированный материал с большой плотностью дефектов. Следует отметить, что более „рыхлая“ структура таких слоев снижает локальное сопротивление сдвигу и оказывает существенное влияние на макроскопические свойства материала. Как с теоретической точки зрения, так и с точки зрения возможных практических приложений

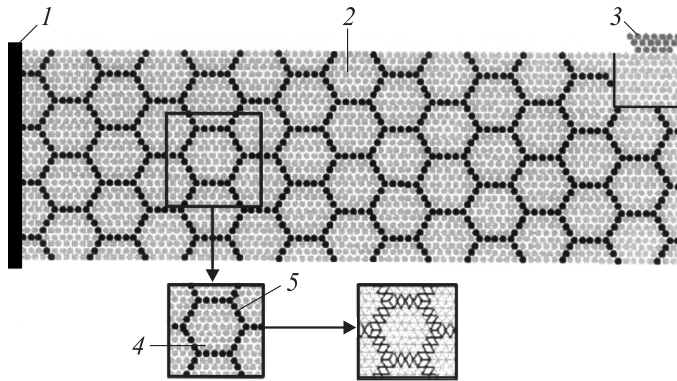


Рис. 1. Геометрические и механические характеристики моделируемого образца, структура образца: 1 — зажим, 2 — исследуемый образец, 3 — нагружающий элемент, 4 — структурный элемент, 5 — прослойка.

представляет интерес исследовать особенности поведения „interfacial materials“ в сложных условиях нагружения, поэтому целью данной работы являлось теоретическое изучение отклика и разрушения материалов с большой долей границ раздела при воздействии знакопеременных нагрузок.

Для моделирования использовался вычислительный метод, основанный на дискретном подходе — метод подвижных клеточных автоматов [4,5]. На протяжении уже ряда лет данный метод успешно используется для теоретического исследования режимов отклика и разрушения сложных гетерогенных сред, таких как спеченные композиционные материалы, горные массивы, сыпучие грунты, угольные пласты и т.д. [6–9].

В работе рассматривался двумерный образец, структура которого показана на рис. 1 (линейные размеры 0.03×0.01 м). Левый край образца фиксировался неподвижным захватом. Нагружение незакрепленного правого края осуществлялось движением нагружающего элемента. Исследуемый образец имел композиционную внутреннюю структуру и состоял из высокопрочных блоков, разделенных некоторой „пластичной“ прослойкой. Упругие характеристики как блоков, так и прослоек были близки к соответствующим параметрам титана [10].

Для автоматов структурных элементов задавалась линейная функция отклика, отвечающая хрупкому, но высокопрочному материалу (например, зернами наноскопического размера, прочность которых приближается к теоретической). Для автоматов прослойки функция отклика имела длинный необратимый участок, что отражает ее вышеописанную специфику. При этом эффективное снижение сопротивления сдвигу в зоне границ раздела достигалось введением разрывов межавтоматных связей (рис. 1).

Необходимо отметить, что подобное представление материалов с большой долей границ раздела хотя и является идеализированным, но качественно верно отражает основные особенности их структуры. При этом размеры блоков и толщина прослоек определяются типом моделируемого материала.

В настоящей работе исследовался отклик предварительно нагруженного образца при знакопеременном циклическом воздействии. Предварительная деформация образца моделировалась путем приложения к нагружаемому элементу постоянной силы $F_0 = 35 \text{ N}$, направленной вертикально вниз. Значение силы выбиралось таким образом, чтобы к моменту установления в системе силового равновесия (t_0) в значительной части прослоек был достигнут предел текучести. При этом вертикальное смещение нагружающего элемента составило $d_0 = 0.82 \text{ mm}$, что соответствует углу изгиба образца $\gamma = 1.6^\circ$.

Циклическое воздействие на нагруженный образец осуществлялось заданием нагружаемому элементу периодически изменяющейся скорости, направленной вертикально вниз. Суммарную нагрузку на образец можно условно представить в форме

$$\begin{cases} F_0 + V_A \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right), & (k \times T) < t < (k + 0.5) \times T, \\ F_0, & (k + 0.5) \times T < t < (k + 1) \times T, \end{cases}$$

где V_A — амплитуда изменения скорости, t — время, T — период, k — номер цикла. Таким образом, скорость смещения задавалась только в течение первого полупериода. В течение же второго полупериода действовала только постоянная сила F_0 . В проведенных расчетах использовалось значение $V_A = 0.5 \text{ m/s}$. Это соответствует достаточно слабым периодическим ударам (амплитуда смещения нагружающего элемента не превышала $20 \mu\text{m}$) и может быть реализовано, в частности, путем ультразвукового воздействия.

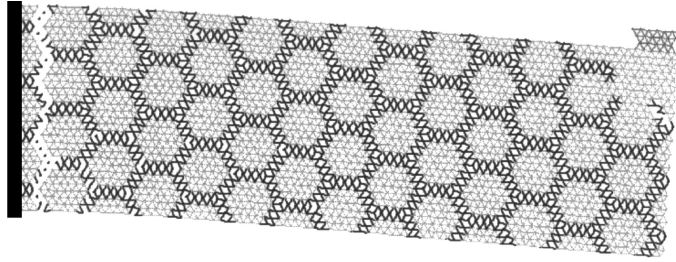


Рис. 2. Система межавтоматных связей после прохождения магистральной трещины.

В работе варьировалось значение частоты вибрации $\nu = 1/T$ и исследовалось ее влияние на особенности деформирования материала и величину максимального изгиба образца вплоть до его разрушения.

При подобном нагружении важными параметрами моделируемого образца являются четыре собственные частоты, связанные с распространением продольной и поперечной упругих волн по длине L и высоте H образца. Их значения заключены в интервале между $\nu_L^\perp = V_\perp/2L \approx 70 \text{ kHz}$ и $\nu_H^\parallel = V_\parallel/2H \approx 330 \text{ kHz}$, где V_\parallel и V_\perp — соответственно продольная и поперечная скорости звука в материале образца.

Проведенные расчеты в интервале частот от $0.2 \times \nu_L^\perp$ до $4 \times \nu_H^\parallel$ показали, что разрушение образца при всех значениях частот происходит путем генерации и накопления повреждений в зоне захвата (рис. 2). Важно отметить, что повреждения формируются и развиваются в магистральную трещину только по границам раздела блоков.

Детальный анализ результатов моделирования показал, что частота нагружения существенно влияет на характер и степень распределения пластических деформаций в образце и, как следствие, на величину максимального изгиба образца d_{\max} . Под максимальным значением изгиба понимается вертикальное смещение нагружающего элемента в момент раскрытия магистральной трещины (t_c). Так, на рис. 3 представлены зависимости d_{\max} от частоты циклического нагружения ν . Можно выделить два характерных участка. На первом (в интервале

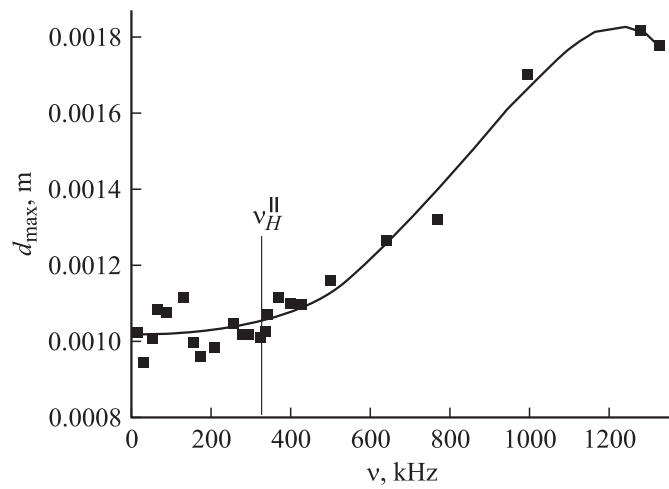


Рис. 3. Зависимость максимального смещения нагружающего элемента от частоты.

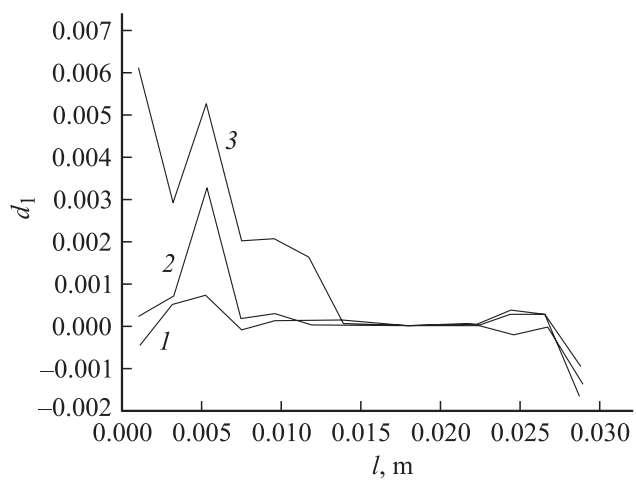


Рис. 4. Распределение нормальных и сдвиговых „приведенных“ деформаций в межблочных прослойках по длине образца: 1 — 30 КHz, 2 — 260 КHz, 3 — 1300 КHz.

частот $\nu \leq \nu_H^{\parallel}$) d_{\max} колеблется около среднего значения $\sim 1.03 \text{ mm}$ ($\gamma \approx 2^\circ$), практически не возрастая. На втором участке ($\nu > \nu_H^{\parallel}$) происходит почти двукратное увеличение максимального смещения нагружающего элемента. Отметим, что при дальнейшем увеличении частоты вибрации ($\nu \gg \nu_H^{\parallel}$) d_{\max} перестает возрастать и колеблется около нового среднего значения $\sim 1.7 \text{ mm}$ ($\gamma \approx 3.2^\circ$), что было учтено при построении интерполирующей зависимости.

На рис. 4 показано послойное распределение „приведенных“ нормальных (d_1) и сдвиговых (d_2) деформаций по длине образца в материале прослойки. Кривые построены в момент времени, соответствующий началу раскрытия магистральной трещины. Термин „приведенная деформация“ в данном случае означает разницу между полной (упругая + необратимая) деформацией в момент разрушения t_c и ее значением в начале вибрационного воздействия t_0 . Из рис. 4 хорошо видно, что возрастание деформационной способности материала при увеличении ν связано прежде всего с вовлечением в процесс деформирования большего объема материала.

Отметим, что основным отличием „высокочастотных“ кривых ($\nu > \nu_H^{\parallel}$) является вовлечение в интенсивный процесс деформирования второй четверти образца (интервал от 0.0075 до 0.015 m). Накопление пластических деформаций в этой области (кривая 3 на рис. 4) позволило размыть концентратор напряжений вблизи захвата и тем самым увеличить „время жизни“ и максимальную величину изгиба образца.

Таким образом, полученные результаты показывают возможность повышения деформационной способности материалов с большой долей границ раздела в условиях высокочастотного циклического воздействия. При этом необходимо отметить, что, хотя характерные размеры структурных элементов модельного образца на несколько порядков превышают размеры зерен наноструктурных материалов, предлагаемая модель является достаточно общей для выявления характерных особенностей поведения сред с большой долей границ раздела.

Работа выполнена при поддержке гранта Фонда содействия отечественной науке, гранта президента РФ для поддержки молодых российских ученых (№ МК-2573.2003.05), гранта президента РФ для поддержки ведущих научных школ РФ („Научная школа академика В.Е. Панина“ № НШ-2324.2003.1) и гранта CRDF (ТО-016-02).

Список литературы

- [1] *Raghunathan V.A., Richetti P., Roux D* // *Langmuir*. 1996. V. 12. N 16. P. 3789–3792.
- [2] *Jin L., Bower C., Zhou O* // *Appl. Phys. Lett.* 1998. V. 73. N 9. P. 1197–1199.
- [3] *Ochiai S., Hojo M., Schulte K., Fiedler B.* // *Composites A*. 2001. V. 32. N 6. P. 749–761.
- [4] *Псахье С.Г., Хори Я., Коростелев С.Ю.* и др. // *Изв. вузов. Физика*. 1995. № 11. С. 58–69.
- [5] *Psakhie S., Horie Y., Ostermeyer G.* et al. // *Theor. and App. fract. Mech*. 2001. N 37. P. 311–334.
- [6] *Псахье С.Г., Шилько Е.В., Дмитриев А.И.* и др. // *Письма в ЖТФ*. 1996. Т. 22. В. 12. С. 69–74.
- [7] *Псахье С.Г., Моисеенко Д.Д., Дмитриев А.И.* и др. // *Письма в ЖТФ*. 1998. Т. 24. В. 4. С. 71–76.
- [8] *Psakhie S.G., Zavshek S., Jezershek J.* et al. // *Comp. Mat. Sci*. 2000. V. 19. N 1–4. P. 69–76.
- [9] *Ружич В.В., Псахье С.Г., Борняков С.А.* и др. // *Физ. Мехомех*. 2003. Т. 6. № 1. С. 41–53.
- [10] *Бобылев А.В.* Механические и технологические свойства металлов (Справочник). М.: Металлургия, 1980. 296 с.