

05;11

Влияние упругих характеристик поверхностного слоя на деформационные свойства материалов с интерфейсно-контролируемой структурой

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

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
634021 Томск, Россия
e-mail: astaf@usgroups.com

(Поступило в Редакцию 16 апреля 2007 г.)

Путем компьютерного моделирования проанализирована возможность изменения величины предельной деформации образцов „интерфейсных“ материалов, механическое поведение которых определяется процессами локализации деформаций на границах раздела структурных элементов (блоков, зерен и т.д.), направленной модификацией поверхностных слоев. Показано, что уменьшением модуля Юнга и предела упругости границ раздела в поверхностном слое можно добиться существенного увеличения деформационной способности образцов при циклическом нагружении. Причиной этого эффекта является вовлечение большего объема материала в процессы накопления необратимых деформаций, что приводит к замедлению локализации деформаций вблизи макроконцентраторов напряжений и более позднему зарождению трещин.

PACS: 68.35.Gy, 62.20.Fe

Важным направлением современного материаловедения является исследование механических характеристик так называемых интерфейсных материалов и особенностей их поведения в сложных условиях внешних воздействий. Термин „интерфейсные материалы“ объединяет материалы, механический отклик которых в значительной степени определяется процессами локализации необратимых деформаций на границах раздела структурных элементов (блоков) [1]. Физической причиной этого эффекта может быть не только разница физико-механических свойств в объеме структурных элементов и на границе раздела, но также относительно высокая плотность дефектов или повреждений на границах раздела. К таким системам относятся, в частности, наноструктурные материалы, в которых размер зерна в значительной степени ограничивает возможность реализации традиционных дислокационных механизмов деформации [2,3]. Из-за этого возрастает роль зернограницных процессов, обеспечивающих деформацию на более высоком, мезоструктурном, уровне [4].

Физико-механические свойства материалов с интерфейсной структурой (в частности, прочность и пластичность) определяются целым рядом факторов, таких как размер структурных элементов, строение и свойства границ раздела и т.д. [3]. Управление внутренней структурой материала связано со значительными трудностями и зачастую требует изменения технологии или даже способов его получения.

Одним из перспективных способов изменения физико-механических свойств интерфейсных материалов является модификация их поверхностных слоев [5,6]. Важным преимуществом данного подхода является отсутствие необходимости изменения свойств материалов в объеме. При этом, поскольку механизмы деформации

в интерфейсных материалах могут быть различными, представляет интерес выявление закономерностей влияния основных параметров механического отклика поверхностных слоев (в частности, модуля Юнга, предела упругости и др.) на макроскопические свойства материала.

В данной работе на основе компьютерного моделирования методом подвижных клеточных автоматов [7] проведено теоретическое исследование влияния модификации поверхности предварительно нагруженных образцов интерфейсных материалов на их деформационный отклик при вибрационных воздействиях. Выбор метода моделирования обусловлен тем, что он позволяет достаточно просто учитывать изменения свойств элементов моделируемой среды на мезоуровне, что важно для теоретического изучения процессов деформации и разрушения сложных гетерогенных сред [8–10].

Для решения поставленной задачи использовалась структурная модель интерфейсного материала, показанная на рис. 1, *a*. Моделируемый образец имел сложную внутреннюю структуру и состоял из высокопрочных элементов, деформирующихся упруго, и границ раздела с механическими свойствами, обеспечивающими возможность накопления необратимых деформаций. Рассматривался модельный материал, упругие характеристики компонентов которого были близки к соответствующим параметрам титана [11]. Функции отклика клеточных автоматов, моделирующих элементы и границы раздела, приведены на рис. 1, *b*. Отметим, что подобное представление интерфейсных материалов хотя и является идеализированным, но качественно верно отражает основные особенности структуры и отклика интерфейсных сред.

Моделируемый образец имел соотношение линейных размеров $L : H = 3 : 1$ (где L — длина образца, H —

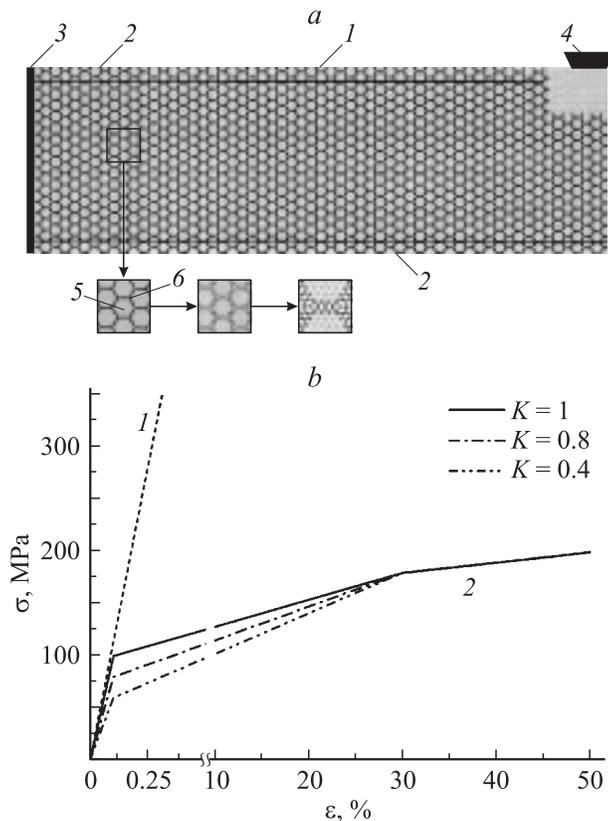


Рис. 1. *a* — структура моделируемого образца: 1 — образец, 2 — модифицированный слой, 3 — зажим, 4 — нагружающий элемент, 5 — структурный элемент, 6 — граница раздела. *b* — функции отклика материалов моделируемого образца: 1 — блоки, 2 — границы раздела.

высота). Модифицировались поверхностные слои толщиной $0.075H$ (рис. 1, *a*). Модификация заключалась в одновременном изменении модуля Юнга (E^{surf}) и предела упругости (σ_y^{surf}) функции отклика автоматов границ раздела пропорционально безразмерному параметру модификации K :

$$\begin{cases} E^{\text{surf}} = KE^0, \\ \sigma_y^{\text{surf}} = K\sigma_y^0, \end{cases}$$

где E^0 и σ_y^0 — модуль Юнга и предел упругости исходного (немодифицированного) материала интерфейсных областей. Полагалось, что модификация поверхности не приводит к изменению размеров структурных элементов и границ раздела. На рис. 1, *b* показаны три функции отклика (кривые 2), соответствующие немодифицированным ($K = 1$) и модифицированным ($K = 0.8$ и 0.6) границам раздела блоков. Можно видеть, что уменьшение упругих характеристик функции отклика по указанному закону сопровождается увеличением степени упрочнения в области неупругих деформаций, при этом величина прочности и предельной деформации остается неизменной. Следует отметить, что в случае на-

ноструктурных материалов подобная модификация при поверхностных слоях может достигаться направленным зернограничным легированием [4].

Условия нагружения соответствовали использованному в работе [1]. Слева образец фиксировался неподвижным зажимом (рис. 1, *a*). Нагружение свободного правого края осуществлялось движением нагружающего элемента и задавалось в две стадии. На первой к нагружаемому элементу прикладывалась постоянная сила F_0 , направленная вертикально вниз, и система „выдерживалась“ вплоть до установления силового равновесия; величина F_0 выбиралась таким образом, чтобы к моменту установления силового равновесия в значительной доле границ раздела был достигнут предел текучести. На второй стадии к нагружаемому элементу прикладывалась вибрационная нагрузка по следующему закону:

$$\begin{cases} V_{\text{load}} = V_A \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right), & (k-1)T < t < (k-0.5)T; \\ F_0, & (k-0.5)T < t < kT, \end{cases}$$

где V_A — амплитуда изменения скорости, t — время, T — период воздействия, $k = 1, 2, 3 \dots$ — номер принудительного смещения нагружающего элемента вниз. В течение второго полупериода действовала только постоянная сила F_0 .

Как отмечалось в [1], при циклическом нагружении важными параметрами моделируемой системы являются четыре собственные частоты, связанные с распространением продольной и поперечной упругих волн по длине L и высоте H образца. Их значения для исследуемого образца заключены между $v_L^\perp = V_\perp/2L$ и $v_H^\parallel = V_\parallel/2H$, где V_\parallel и V_\perp — скорости продольной и поперечной звуковых волн в материале. Для рассматриваемого образца $v_L^\perp/v_H^\parallel \approx 0.23$. В расчетах варьировались частота воздействия ν в пределах от 0 до $5v_H^\parallel$ и параметр модификации функции отклика границ раздела K от 0.6 до 1.

Результаты расчетов показывают, что разрушение образца происходит вследствие генерации и накопления повреждений на границах раздела блоков вблизи зажима. При этом, как было показано в [1], частота воздействия $\nu = 1/T$ существенно влияет на величину предельного изгиба образца γ , определяемого отношением максимального вертикального смещения нагружающего элемента d_{max} в момент разрушения образца к длине образца L ($\gamma = d_{\text{max}}/L$).

Типичная зависимость $\gamma(\nu)$ имеет три характерных участка (рис. 2). На первом (в интервале $\nu < 2v_H^\parallel$) деформационная способность образца практически не меняется. На втором участке ($\nu > 2v_H^\parallel$) происходит значительный (в 2–2.5 раза) рост предельного изгиба. При вибрационных воздействиях с более высокими частотами ($\nu > 3.5v_H^\parallel$) значение γ перестает возрастать и колеблется около нового среднего значения. Как показано в [1], такой характер зависимостей $\gamma(\nu)$ определяется

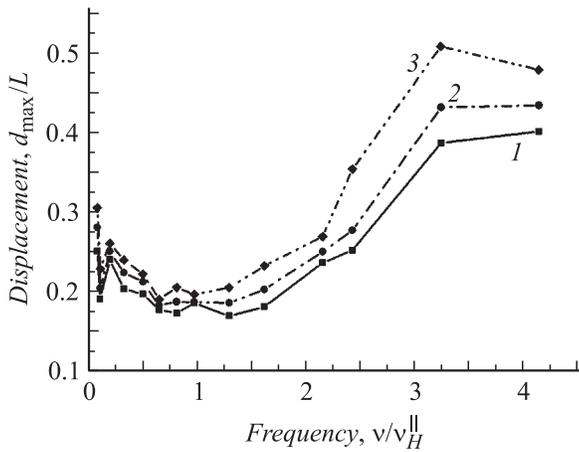


Рис. 2. Графики зависимостей приведенного максимального смещения нагружающего элемента γ от относительного значения частоты вибрации ν/ν_H^{\parallel} : 1 — $K = 1$; 2 — 0.8; 3 — 0.6.

изменением характера распределения пластических деформаций в образце.

Модификация поверхности приводит к изменению деформационной способности рассматриваемых образцов во всем интервале частот нагружения (рис. 2). При этом уменьшение модуля Юнга и предела упругости поверхностных границ раздела на 20 и 40% по сравнению с исходным материалом приводит к росту значения γ в среднем на 10 и 20% соответственно.

Анализ результатов показал, что рост деформационной способности образцов с модифицированной поверхностью связан с увеличением доли межблочных границ, на которых происходит преимущественное накопление необратимых деформаций, „накачиваемых“ вибрационным воздействием. На рис. 3 показано послойное распределение по длине образца нормальных и сдвиговых деформаций, локализованных на границах раздела, для $\nu = 1.6\nu_H^{\parallel}$. Термин „послойное“ означает среднее значение рассматриваемой величины в полосе заданной ширины (на рис. 3 ширина полосы $\approx 0.07L$). Во всех случаях распределения строились для момента времени, предшествующего началу роста макротрещины. Как видно из рис. 3, накопление необратимых деформаций на границах раздела происходит, главным образом, в левой половине образца. При этом модификация поверхностного слоя привела к возрастанию уровня деформаций, накопленных в первой четверти образцов (в интервале от 0 до $0.25L$). Это и обусловило более высокую степень предельной деформации образцов с $K = 0.8$ и 0.6. Детальные исследования показали, что особенно ярко данный эффект выражен для поверхностного слоя. Это свидетельствует о существенной роли пластического деформирования поверхности образца в процессе нагружения [12].

Из вида функции отклика (рис. 1, *b*) видно, что величина предельной деформации одинакова для всех рас-

сматриваемых границ раздела. Отсюда следует, что увеличение деформационной способности образца должно быть связано с более равномерным пространственным распределением необратимых деформаций.

На рис. 4 показаны распределения нормальных и сдвиговых деформационных вкладов на границах раздела в моменты времени, предшествующие разрушению образцов. Для построения распределения определялись максимальное и минимальное значения соответствующей деформации, и полученный диапазон разбивался на определенное количество интервалов. Для каждого интервала определялись автоматы с соответствующими ему значениями деформации. Деформационный вклад интервала определялся суммарным значением соответствующих деформаций этих автоматов. Из рис. 4 видно, что деформационная способность „интерфейсных“ образцов определяется, главным образом, малыми деформационными вкладами, распределенными на большом количестве границ раздела. Так, для нормальных деформаций распределение меняется в интервале от -0.02 до 0.04 , что составляет менее половины длины всего интервала. Аналогичная ситуация имеет место и для сдвиговых деформаций. При этом вклад интерфейсных

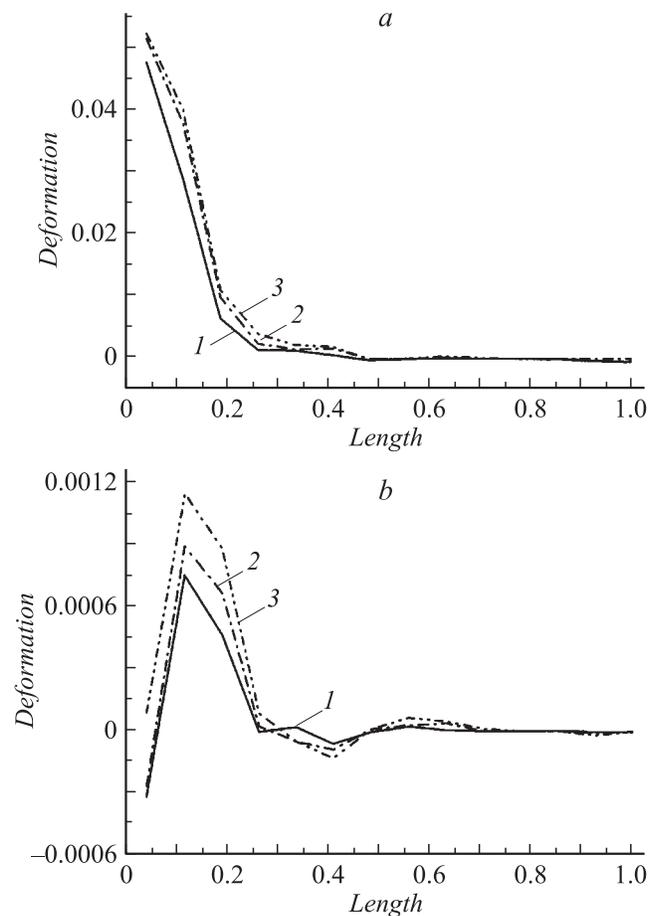


Рис. 3. Распределение нормальных (*a*) и сдвиговых (*b*) деформаций в межблочных прослойках по длине образца ($\nu = 1.6\nu_H^{\parallel}$): 1 — $K = 1$, 2 — 0.8, 3 — 0.6.

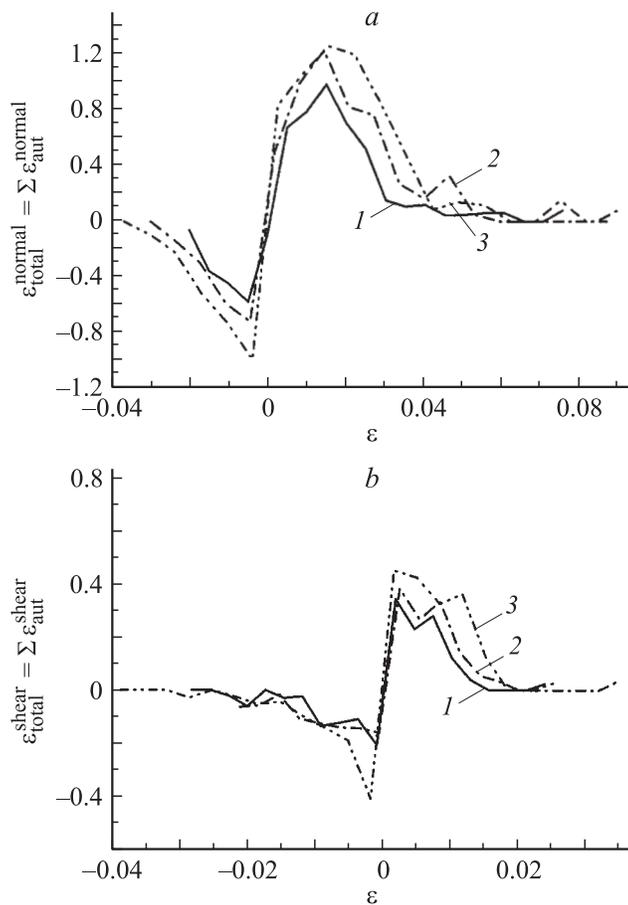


Рис. 4. Распределение вкладов нормальных (а) и сдвиговых (б) деформаций в образце ($\nu = 1.6\nu_H^{\parallel}$): 1 — $K = 1$, 2 — 0.8, 3 — 0.6.

областей, характеризующихся большими деформациями, является незначительным.

Из рис. 4 видно, что рост интегральной деформационной способности образцов с модифицированной поверхностью обусловлен, главным образом, увеличением числа „слабодеформированных“ интерфейсных областей. Таким образом, рассмотренный вариант модификации поверхностных слоев приводит к увеличению объемной доли границ раздела, вовлеченных в процессы накопления необратимых деформаций. Это позволило „затормозить“ локализацию деформаций в узком слое вблизи зажима и тем самым поднять общую деформационную способность.

Таким образом, показано, что модификация поверхностного слоя образцов интерфейсных материалов может существенно влиять на их деформационный отклик при вибрационных воздействиях. В частности, уменьшение модуля Юнга и предела упругости поверхностных границ раздела приводит к росту деформационной способности материала. Данный эффект связан с тем, что в образцах с модифицированным поверхностным слоем малые по абсолютной величине деформации лока-

лизуются в большем объеме материала. Это позволяет замедлить процессы локализации деформаций вблизи макроконцентраторов напряжений и последующего зарождения трещин.

Работа выполнена в рамках интеграционного проекта СО РАН № 87, проекта № 16.3 президиума РАН и при поддержке грантов РФФИ (№ 06-05-64792-а и 06-02-08003-офи).

Список литературы

- [1] Псахье С.Г., Шилько Е.В., Астафуров С.В. // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. Вып. 6. С. 45–51.
- [2] Гусев А.И., Ремпель А.А. Нанокристаллические материалы. М.: Физматлит, 2004. 224 с.
- [3] Meyers M.A., Mishra A., Benson D.J. // Progr. in Mat. Sci. 2006. Vol. 51. P. 427–556.
- [4] Колобов Ю.Р., Валиев Р.З., Грабовецкая Г.П. и др. Зернограничная диффузия и свойства наноструктурных материалов. Новосибирск: Наука, 2001. 232 с.
- [5] Кортаев А.Д., Мошков В.Ю., Овчинников С.В., Пинжис Ю.П., Савостиков В.М., Тюменцев А.Н. // Физическая мезомеханика. 2005. Т. 8. Вып. 5. С. 103–116.
- [6] Панин А.В., Клименов В.А., Почивалов Ю.И., Сон А.А. // Физическая мезомеханика. 2001. Т. 4. Вып. 4. С.85–92.
- [7] Psakhie S., Horie Y., Ostermeyer G. et al. // Theor. and App. Fract. Mech. 2001. N 37. P. 311–334.
- [8] Псахье С.Г., Шилько Е.В., Дмитриев А.И. и др. // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. Вып. 12. С. 69–74.
- [9] Psakhie S.G., Zavshek S., Jezershek J. et al. // Comp. Mat. Sci. 2000. Vol. 19. N 1–4. P. 69–76.
- [10] Ружич В.В., Псахье С.Г., Борняков С.А. и др. // Физическая мезомеханика. 2003. Т. 6. Вып. 1. С. 41–53.
- [11] Бобылев А.В. Механические и технологические свойства металлов. Справочник. М.: Металлургия, 1980. 296 с.
- [12] Панин В.Е. // Физическая мезомеханика. 2001. Т. 4. Вып. 3. С. 5–22.