

01;05

## Об особенностях установления стационарного режима деформирования твердых тел

© С.Г. Псахье, А.Ю. Смолин, Е.В. Шилько, С.Ю. Коростелев, А.И. Дмитриев, С.В. Алексеев

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,  
634055 Томск, Россия

(Поступило в Редакцию 11 марта 1996 г.)

Теоретически изучены особенности установления стационарного режима деформирования твердых тел. Моделирование различных режимов нагружения проводилось методом подвижных клеточных автоматов. Показано, что на этапе установления стационарного режима напряженное состояние в материале является существенно неоднородным, что в свою очередь может приводить к устойчивым структурам в поле скоростей частиц материала и влиять на развитие деформации на последующих стадиях.

### Введение

Обычно как экспериментальное, так и теоретическое исследование поведения материалов при механическом нагружении осуществляется на этапах установившегося режима деформирования и для степеней деформации, предшествующих разрушению [1,2]. В то же время особенности начальной стадии деформирования остаются практически не изученными. Экспериментальное исследование данного вопроса в настоящее время возможно лишь на основе интегральных характеристик отклика материалов, таких как общая деформация образца, акустоэмиссионные спектры и т.д. Даже в этом случае требуется достаточно высокое временное разрешение (в диапазоне  $10^{-6}$ – $10^{-9}$  с) разрешение измерительной аппаратуры. Измерение же пространственного распределения деформаций с высокой точностью может быть проведено на основе специальной оптико-телевизионной системы, описанной в [3,4]. Данное устройство позволяет измерять векторы смещений на поверхности деформируемого материала с разрешением 1500 точек на  $1 \text{ мм}^2$ . В случае применения электронного оборудования с достаточно высокой производительностью подобные установки могут быть использованы для изучения особенностей процесса установления стационарного режима деформирования. Для теоретического исследования отклика материалов на мезоскопическом уровне в настоящее время главным образом используются методы, основанные на механике сплошных сред. В то же время в моделировании все более широко начинают использоваться дискретные подходы [5–12]. Их применение, помимо прочих преимуществ, требует значительно меньших вычислительных ресурсов, что делает их особенно полезными при решении задач, требующих высокого пространственного и временного разрешения. Поэтому в данной работе развит и применен к изучению отклика твердых тел на стадии установления стационарного режима деформации метод подвижных клеточных автоматов [8–12], который является дальнейшим развитием методов частиц [5] и элементной динамики [8,9].

### Формализм

В рамках данного метода моделируемый материал представляется как ансамбль дискретных элементов (клеточных автоматов), взаимодействующих между собой по определенным правилам, соотношениям и законам. Такие автоматы в свою очередь составляют элементы гетерогенных сред, в частности отдельные зерна поликристалла, отдельные частицы порошковой смеси и т.д. Разумеется, размеры автоматов определяются условиями конкретной задачи.

Благодаря мобильности отдельных автоматов такой подход позволяет моделировать различные процессы, имеющие место в реальном материале, включая эффекты проникания, массоперенос, эффекты фрагментации, образование повреждений, трещин и пор. Путем задания дополнительных условий на границе моделируемого образца можно имитировать различные режимы механического нагружения (сжатие, растяжение, сдвиговая деформация и др.).

В рамках метода подвижных клеточных автоматов моделируемая система характеризуется следующими величинами: радиус-векторы центров автоматов  $\{\mathbf{R}^i\}$ , поступательные скорости автоматов  $\{\mathbf{V}^i\}$ , углы их поворота  $\{\theta^i\}$  и их угловые скорости  $\{\omega^i\}$ . Помимо этого каждый клеточный автомат характеризуется размерным параметром  $d^i$ , массой  $m^i$ , а также тензором момента инерции  $\hat{J}^i$ . Взаимодействие между автоматами рассматривается в парном приближении и определяется центральными силами, силами вязкого и сухого трения, а также силами сопротивления сдвиговой деформации. Взаимодействующие пары автоматов делятся на два типа: связанные — наличие химических связей (элементы одной частицы) и независимые — отсутствие каких-либо химических связей (элементы разных частиц).

В простейшем случае клеточный автомат содержит материал только одного сорта — исходный компонент смеси или продукт реакции, а в общем случае (составной клеточный автомат) совокупность нескольких различных веществ, характеристики которых и будут определять его состояние. При описании свойств состав-

ного клеточного автомата используется аналог модели виртуального кристалла, согласно которой все удельные характеристики автомата и параметры взаимодействия с соседями определяются усреднением по количеству атомов составляющих его композиций.

Клеточный автомат может изменить свое состояние как в результате внутренних превращений (фазовых переходов), так и при химическом реагировании с соседями.

Эволюция ансамбля клеточных автоматов определяется численным решением системы уравнений движения:

$$m^i \frac{d^2 \mathbf{R}^i}{dt^2} = \sum_j \mathbf{F}^{ij},$$

$$\hat{f}^i \frac{d^2 \boldsymbol{\theta}^i}{dt^2} = \sum_j \mathbf{K}^{ij},$$

где  $\mathbf{F}^{ij} = (\mathbf{p}^{ij} + \mathbf{f}^j)$ ,  $\mathbf{K}^{ij} = q^i (\mathbf{n}^{ij} \times \mathbf{F}^{ij})$ ,  $\mathbf{p}^{ij}$  описывает центральное взаимодействие,  $\mathbf{f}^j$  является тангенциальной составляющей силы взаимодействия.

Единичный вектор  $\mathbf{n}^{ij}$  определяется как  $\mathbf{n}^{ij} = (\mathbf{R}^j - \mathbf{R}^i) / r^{ij}$ ,  $r^{ij}$  — расстояние между центрами автоматов, а  $q^i$  — расстояние от центра  $i$ -го автомата до точки его контакта с  $j$ -м автоматом.

Моделируемый объект (в нашем случае материал) может состоять из автоматов одного сорта (образец из чистого материала) или разных сортов (включения, поверхностная обработка и т.д.). Для учета изменения поверхности материала при его разрушении используются специальные алгоритмы.

### Результаты расчетов и их обсуждение

В данной работе для изучения отклика деформируемого материала на мезоуровне моделировался плоский образец, типичная структура связей между автоматами которого показана на рис. 1, *a*. Размер одного автомата варьировался от 4 до 400 мкм. Используемые параметры взаимодействия между автоматами соответствовали чистому Ni или Al и брались из [13].

Рассмотрим поведение материала под действием простого способа нагружения — одноосного растяжения и сжатия с постоянной скоростью  $V_y$ . Нагрузка прикладывалась к нижней части образца. Расчеты проводились для трех скоростей нагружения:  $V_y = -10, -1$  и  $-0.1$  см/с.

В работе [11] было показано, что в случае растяжения образцов Ni стационарный режим деформации устанавливается к моменту времени  $t = 5$  мкс, причем начало движения фронта установления стационарного режима деформации соответствует моменту времени  $t = 0.05$  мкс. Как и следовало ожидать, для однородного образца он имеет плоскую форму. Из дальнейшей эволюции поля скоростей можно видеть, что за фронтом вдоль поверхности материала следует область сжимающих напряжений размером по оси  $OY \approx 30$  мкм

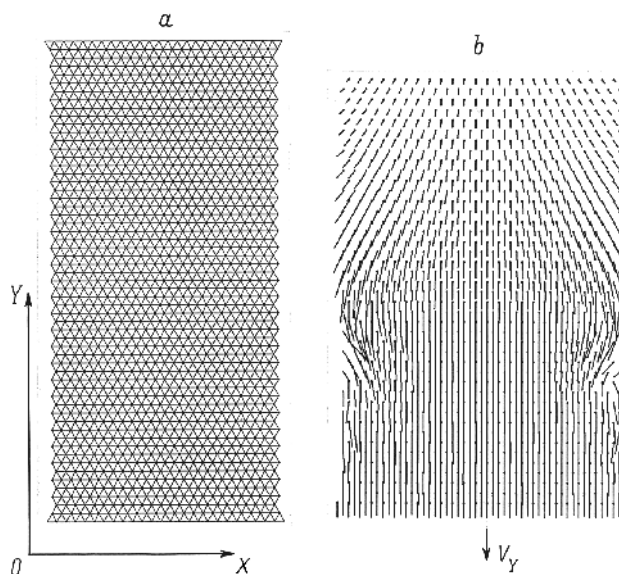
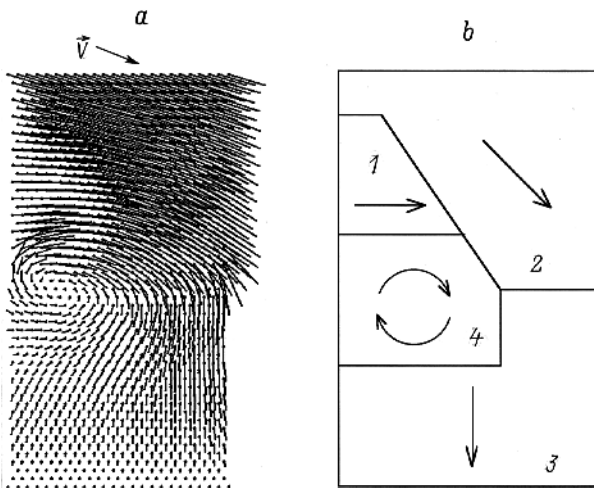


Рис. 1. Структура связей между автоматами в модели образца (размеры по оси  $X = 0.1$  мм, по  $Y = 0.2$  мм) (*a*) и поле скоростей для  $t = 0.26$  мкс и скорости нагружения  $V_y = 10$  см/с (*b*).

(рис. 1, *b*). Данный импульс сжатия распространяется непосредственно за фронтом вплоть до установления стационарного режима деформирования и является устойчивым относительно взаимодействия с поверхностными дефектами. Следует отметить, что при взаимодействии с поверхностным дефектом внутренняя структура импульса изменяется. Таким образом, можно ожидать, что экспериментальное изучение обнаруженного эффекта может быть осуществлено на основе исследования соответствующих акустоэмиссионных спектров.

Дальнейшее исследование обнаруженного в [11] эффекта показало, что существование такого импульса поперечного сжатия объясняется стремлением материала к сохранению первоначального объема. Этот импульс возникает в приповерхностном слое материала, где имеется свобода движения в направлении, перпендикулярном прикладываемой нагрузке. В случае периодических граничных условий на боковых границах моделируемого образца эффекта возникновения импульса сжатия не наблюдалось. После возникновения импульс сжатия распространяется вдоль поверхности со скоростью поперечного звука, а в глубь материала — со скоростью продольного звука. Расчеты показали, что импульсы сжатия, распространяющиеся в глубь материала от двух противоположных границ, взаимодействуют и гасят друг друга. В случае упрочнения поверхности, т.е. увеличения модулей упругости в 2 и 4 раза для поверхностных автоматов, скорость распространения импульса сжатия вдоль поверхности материала увеличивалась соответственно на 10 и 15%. При сжатии образцов наблюдается аналогичный импульс расширения.

В реальности, за исключением специально поставленных экспериментов, вследствие особенностей нагруже-



**Рис. 2.** Поле скоростей в случае нагружения по схеме сжатие + сдвиг в момент времени  $t = 0.022$  мкс (*a*) и схема распределения направлений упругих смещений (стрелками показано направление упругих смещений в различных областях образца) (*b*).

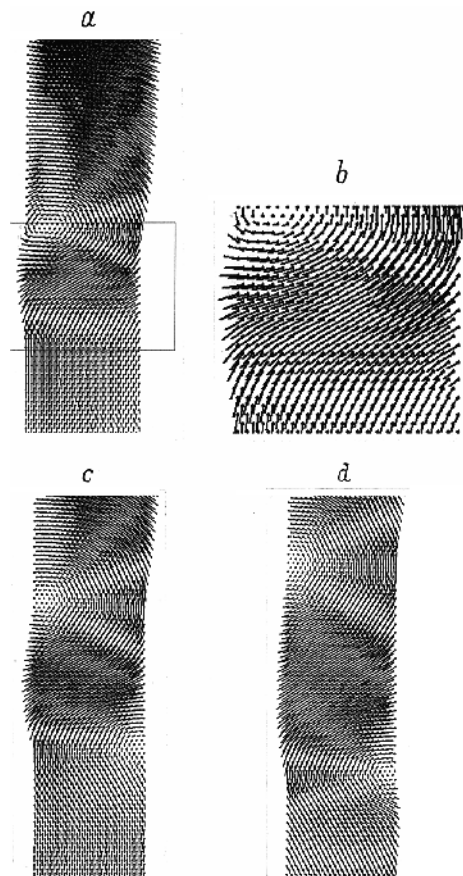
ния и неоднородной внутренней структуры материала прикладываемая нагрузка не ориентирована строго вдоль оси образца, что приводит к возникновению сдвиговых напряжений. Поэтому для практики большой интерес представляет изучение особенностей деформации материала при наличии сдвиговой составляющей. Для этого в настоящей работе моделировались два таких режима нагружения образца Al: растяжение + сдвиг ( $V_x = 12.5$  м/с,  $V_y = 3.75$  м/с) и сжатие + сдвиг ( $V_x = 12.5$  м/с,  $V_y = -3.75$  м/с). Структура образца также соответствовала рис. 1, *a*. Характерный размер каждого автомата составлял 3 мкм.

Предварительные расчеты на основе модели подвижных клеточных автоматов показали, что в случае такого сложного нагружения наличие свободной поверхности и сдвиговой составляющей нагружения приводит к формированию устойчивого "вихря" упругих деформаций, который движется в направлении распространения фронта возмущений. Скорость перемещения такого "вихря" определяется скоростью поперечного звука. Распределение упругих деформаций на стадии установления стационарного режима нагружения, как показано в [12], является сильно неоднородным. На рис. 2 показано поле скоростей (*a*) и схематическое распределение направлений упругих смещений (*b*) в момент времени, когда "вихрь" уже сформировался. Следует отметить, что такая неоднородная картина в поле скоростей обусловлена, как и в случае одноосного нагружения, влиянием свободной поверхности образца. Свойства поверхности оказывают влияние на форму "вихря", особенности его формирования и распространения. Так, в случае упрочненной поверхности "вихрь" является более локализованным и начинает формироваться на большей глубине от поверхности нагружения. На глубину зарождения "вихря"

влияет также и ширина образца: чем больше ширина, тем глубже формируется "вихрь". По-видимому, это объясняется тем, что этот "вихрь" возникает в результате взаимодействия двух импульсов напряжения, один из которых распространяется от поверхности нагружения, а второй — отраженный от боковой поверхности.

Моделирование, проведенное при растяжении, показало, что вихревой характер упругой деформации, обусловленный свободной границей образца, также имеет место, но при этом "вихрь" формируется у противоположной (по сравнению со сжатием) границы образца.

Проведенное исследование показало, что в случае достаточной длины образца такой "вихрь" инициирует образование нового подобного же "вихря", но у противоположной границы и противоположного направления. Процесс рождения нового "вихря" можно разделить на четыре этапа. На первом этапе, ниже по направлению распространения имеющегося "вихря", можно выделить достаточно широкую полосу однородных смещений со сдвиговой составляющей (рис. 3, *a, b*). На втором этапе, ниже этой полосы у боковой поверхности, противоположной направлению сдвиговой составляющей, появляется ядро нового "вихря" (рис. 3, *c*). На третьем этапе новый "вихрь" растет и убегает от порождающего



**Рис. 3.** Поле скоростей для длинного образца в различные моменты времени. *a* —  $t = 0.065$  мкс; *b* — фрагмент, выделенный прямоугольником на рисунке, *a*; *c* —  $t = 0.095$  мкс; *d* —  $t = 0.165$  мкс.

(рис. 3, *d*). На четвертом этапе размеры и скорости распространения нового и порождающего "вихрей" выравниваются. После этого, если позволяют размеры образца, новый "вихрь" по тому же механизму порождает следующий "вихрь". Расстояние между "вихрями" определяется размерами образца и его упругими характеристиками. Таким образом, в достаточно длинном образце установление стационарного режима деформации может реализоваться через распространение характерного волнообразного поля смещений.

Итак, согласно полученным результатам, уже на этапе установления стационарного режима деформации напряженное состояние в материале является существенно неоднородным, что в свою очередь может приводить к формированию в поле скоростей частиц материала устойчивых структур, распространяющихся вблизи поверхности материала со скоростью поперечного звука.

## Список литературы

- [1] Пластическая деформация конструкционных материалов / Под ред. А.Ф. Пименова. М.: Наука, 1988. 272 с.
- [2] Белл Дж.Ф. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. Ч. 1. Малые деформации. М.: Наука, 1984. 596 с.
- [3] Сырямкин В.И., Панин В.Е., Дерюгин Е.Е. и др. // Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов. Т. 1. Новосибирск: Наука, 1995. С. 176–194.
- [4] Панин В.Е. // Изв. вузов. Физика. 1995. Т. 38. № 11. С. 6–25.
- [5] Хокни Р., Иствуд Дж. Численное моделирование методом частиц. Пер. с англ. М.: Мир, 1987. 640 с.
- [6] Wolfram S. Theory and Application of Cellular Automata. Singapore: World Scientific, 1986.
- [7] Philippou G., Kim H., Rajagopalan R. // Comput. Mater. Sci. 1995. Vol. 4. N 2. P. 181–190.
- [8] Панин В.Е., Клименов В.А., Псахье С.Г. и др. Новые материалы и технологии. Конструирование новых материалов и упрочняющих технологий. Новосибирск: Наука, 1993. 151 с.
- [9] Псахье С.Г., Негрескул С.И., Зольников К.П. и др. // Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов. Т. 2. Новосибирск: Наука, 1995. С. 77–105.
- [10] Псахье С.Г., Хори Я., Коростелев С.Ю. и др. // Изв. вузов. Физика. 1995. Т. 38. № 11. С. 58–69.
- [11] Псахье С.Г., Смолин А.Ю., Коростелев С.Ю. и др. // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. Вып. 20. С. 72–76.
- [12] Псахье С.Г., Шилько Е.В., Дмитриев А.И. и др. // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. Вып. 2. С. 90–93.
- [13] Физические величины. Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.