



Р и с. 3. Типичная картина распределения деформаций по образцу при растяжении на стадии линейного упрочнения.

локаций. Это находится в соответствии с предложенной в ХФТИ концепцией о существенном влиянии облучения на изменение энергии дефектов упаковки дислокаций.

Показана принципиальная возможность снижения эффектов локализации (охрупчивания) с помощью активизации микроуровня пластической деформации, связанного с термо-активируемыми процессами пластической деформации. При этом все изученные эффекты не зависят от типа кристаллической структуры.

#### Библиографический список

1. Паршин А.М., Неклюдов И.М., Камышанченко Н.В. и др. Физика радиационных явлений и радиационное материаловедение. – Белгород: Изд-во БелГУ. – 1998.
2. Малыгин Г.А. Самоорганизация дислокаций и локализация скольжения в пластически деформируемых кристаллах // ФТТ. – 1995. – Т.37. – Вып.1. – С. 3.
3. Камышанченко Н.В., Красильников В.В., Неклюдов И.М., Пархоменко А.А. Кинетика дислокационных ансамблей в деформированных облучен-

ных материалах // ФТТ. – 1998. – №9. – Т.40. – С.1631-1634.

4. Баранникова С.А., Зуев Л.Б., Данилов В.И. Кинетика периодических процессов при пластическом течении // ФТТ. – 1999. – Т. 41. – Вып.7. – С. 1222 - 1224.

5. Лихачев В.А., Панин В.Е., Засимчук Е.Э. и др. Кооперативные деформационные процессы и локализация деформации. – Киев: Наук. думка, 1989.

6. Kamyshanchenko N.V., Krasilnikov V.V., Neklyudov I.M., Parkhomenko A.A. Influence of irradiation kinetics with allowance for the dislocation velocity distribution // Journal Nucl. Mater., 271& 272 (1999) 84-86.

7. Малыгин Г.А. Процессы самоорганизации дислокаций и пластичность кристаллов // УФН. – 1999. – Т. 169. – №9. – С.980-1009.

8. Камышанченко Н.В., Красильников В.В., Сирота В.В., Неклюдов И.М., Пархоменко А.А. К вопросу о развитии пластической неустойчивости в облученных материалах // Известия РАН. Металлы. – 2000. – №4. – С.110-113.

9. Ханнанов Ш.Х. Флуктуации плотности дислокаций при пластическом течении кристаллов // ФММ. – 1994. – Т. 78. – Вып. 2. – С. 31-39.

10. Алексеев А.А., Кудряшов Н.А. Препринт 027-88 / МИФИ. – М., 1988.

УДК 539

## СИНЕРГЕТИКА И МОДЕЛИ РАЗВИТИЯ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ В ПОЛИКРИСТАЛЛАХ НА МЕЗОУРОВНЕ

*В.В. Осташев, О.Д. Шевченко*

г. Псков, Псковский политехнический институт (филиал СПбГТУ)

**Общие положения.** Синергетика, вообще говоря, изучает макроскопические системы, обладающие большим количеством микроскопических степеней свободы и кото-

рые под действием внешних воздействий или внутренних потоков выведены из состояния равновесия настолько, что линейные динамические законы не удовлетворяются.

В рамках этого подхода деформируемый поликристаллический материал на мезоуровне рассматривается как ансамбль взаимодействующих элементов-мезодефектов, которые обладают определенными геометрическими размерами и отделены друг от друга границами. Эволюция моделируемой системы определяется динамическим состоянием мезодефектов, их механическими характеристиками и взаимодействием внутри представительного объема. Взаимодействие подвижных мезодефектов приводит к образованию диссипативных структур, как правило, корреляционного типа, однако функциональное упорядочение способствует образованию и геометрических структур, характерных для мезоуровня [1].

**Формализация системы.** В соответствии с синергетическими представлениями деформируемый поликристаллический материал относится к системам открытым, нелинейным, динамическим, многоуровневым, иерархическим, диссипативным, самоорганизующимся, информационным.

Открытая система всегда предполагает массоперенос в процессе деформирования, обмен энергией и информацией в потоках деформационных дефектов. Система, захватывая потоки обмена, даже если они некоторым образом структурированы, трансформирует, организует их, навязывает им свою собственную пространственно-временную структуру. По существу это способ организации деформируемым материалом своей структуры, т. е. самоорганизация.

Нелинейность поликристаллического материала при внешнем воздействии выражается в свойствах его, как системы, иметь целый спектр возможных стационарных состояний, соответствующих различным потенциальным законам поведения. Динамическая система – это процесс или объект, начальное состояние которого определяется совокупностью параметров, и всегда есть оператор, описывающий поведение системы во времени и пространстве.

Под иерархической многоуровневой системой понимается совокупность структур различных уровней иерархии. Принято выделять три масштабных уровня: макроуровень, мезоуровень, микроуровень. Ие-

рархическая структура мезоуровня содержит структурные уровни [1] и представляется как множество  $U$  структурных уровней и множество  $R$  связей (отношений) между ними. Два множества  $U$  и  $R$ , называемые информационной структурой  $SS$ , делятся на подсистемы низшего уровня, динамика которых определяется взаимодействием мезодефектов в представительном объеме. При этом на каждом следующем уровне мезодефектами являются системы предыдущего уровня, т. е. распределение мезодефектов по уровням отображается системой вложенных множеств:

$$U_j \rightarrow U_{j+1} \rightarrow U_{j+2} \rightarrow SS \quad (1)$$

Необходимость возникновения диссипативных структур в процессе деформации можно видеть в действии общих термодинамических принципов [2]. Основные предпосылки возникновения самоорганизации в диссипативных системах:

- поток энергии или информации извне, обусловленный открытостью системы;

- неравновесность системы, способствующая усилению флуктуаций до такой степени, при которой хаос создает порядок;

- наличие потенциальности, допускающей обмен устойчивостью между содержащимися в ней структурами.

Представление деформируемого поликристаллического материала информационной системой основано на концептуальной идее существования материи и энергии в виде производного продукта, возникающего в процессе накопления и передачи информации [3].

**Экспериментальные основы.** Экспериментальное подтверждение принципов синергетики, обсуждаемых в данной работе, основано на исследовании полей смещения узлов делительной сетки, нанесенной непосредственно на деформируемый образец. Геометрическим образом мезодефекта на нижнем структурном уровне является ячейка делительной сетки размером 10 мкм. Более грубые структурные уровни характеризуются набором первичных ячеек. Исследовались делительные сетки на длине 10 мм на модельных материалах (медь МО) при статическом деформировании и различных условиях испытания (величина зерна мате-

риала, скорость нагружения, рабочая длина образца, жесткость испытательной машины). Поле смещений численным дифференцированием преобразуется в поле дисторсии  $\beta_{ij} = \varepsilon_{ij} + \omega_{ij}$ . Для плоского случая по формулам Коши рассчитываются все компоненты тензора  $\beta_{ij}$  симметричной и антисимметричной составляющих.

Линейные, сдвиговые и поворотные составляющие микропластических деформаций для структурного уровня  $x_i$ , определенные по ансамблю мезодефектов, описываются некоторыми случайными функциями

$$\epsilon_{ij}(x_i|e_j)_{i=1,2,3,4} [1],$$

где  $i$  – структурный уровень,

$j$  – средняя деформация.

По периодограммам случайных функций  $\epsilon_{ij}(x_i|e_j)_i$  рассчитывали коэффициент синхронизации для набора деформационных дефектов, отождествляемых с размерами ячейки делительной сетки от 10 до 120 мкм [1]. Фазовые и бифуркационные диаграммы, представленные как амплитудо-фазо-частотные характеристики, позволяют выявить формы взаимодействия между сдвиговыми и поворотными модами деформации и оценить представительный объем.

Статистическая обработка предусматривала определение закона распределения микропластических деформаций, расчет автокорреляционных функций, тесты на стационарность и эргодичность случайных функций  $\epsilon_{ij}(x_i|e_j)_i$ .

**Модели синергетики.** Для полномасштабного описания процессов пластической деформации поликристаллических материалов и построения моделей в терминах синергетики необходимо принятие нескольких идеализаций – распределенная модель, точечная модель, модель статистических взаимодействий, модели теории катастроф и информационная модель [4].

1. Распределенная система характеризуется тем, что параметры кинетических составляющих самого процесса зависят от времени и координат. Формализация этих условий может быть отражена на деформируемый поликристаллический материал отождествлением его с возбудимой средой. Под возбудимой средой понимаем распределенную непрерывно в пространстве сис-

тему, каждый участок которой обладает нелинейными динамическими свойствами и взаимодействует с окружающими по законам диффузии.

В общем случае для двух кинетических параметров, соответствующим сдвиговым ( $u$ ) и поворотным ( $v$ ) модам деформации, можно записать:

$$\begin{aligned} u_t &= Q(u, v, \lambda) + D_u u_{xx}; \\ v_t &= Q(u, v, \lambda) + D_v v_{xx}; \end{aligned} \quad (2)$$

при граничных и начальных условиях – соответственно:

$$u_x(a, t) = v_t(a, t) = u_x(b, t) = v_t(b, t) = 0 \quad (3)$$

$$u(x, 0) = u_0(x) \quad v(x, 0) = v_0(x),$$

где  $D_u, D_v$  – транспортные коэффициенты;

$a, b$  – границы представительного объема;

$\lambda$  – управляющий параметр,

$Q$  – нелинейная функция от  $u, v$ .

2. Строгое математическое определение точечной системы можно сделать при предельных переходах в распределенных системах. Точечная система реализуется в двух случаях ( $D_u = D_v = 0$  и  $D_u = D_v \rightarrow \infty$ ):

$D_u = D_v = 0$ , выполнение данного условия физически можно представить на начальной стадии процесса, когда еще роль мезоуровня мала;

$D_u = D_v \rightarrow \infty$  во всем пространстве  $[a, b]$  процесс протекает так же, как и в бесконечно малом объеме, т.е. взаимодействие между кинетическими элементами системы происходит синхронно во всех точках  $r \in [a, b]$ .

В обоих случаях дефектную структуру можно считать хорошо перемешанной, и при ее описании пространственные эффекты можно не учитывать.

Автономные точечные модели описываются системой обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\dot{x}_i = F_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

Величины  $F_i(x_1, x_2, \dots, x_n)$  – нелинейные функции кинетических или динамических переменных  $x_i$ .

3. Моделирование кинетики пластической деформации марковскими цепями развивает представление о процессах деформации в статистической многоуровневой интерпретации на основе сигнального графа состояний.

Задача исследования заключается в следующем:

- определение границ и интервалов работы материала на анализируемом уровне;
- определение переходной вероятности нахождения системы на одном из уровней в зависимости от степени макроскопической деформации;
- корреляция между статистической и физической моделью.

4. Особенность моделей теории катастроф является исследование предельных ситуаций:

- скачкообразное изменение состояния системы при непрерывном изменении ее параметров;
- возможность перехода системы в далекие друг от друга конечные состояния при одном и том же изменении параметра даже из близких начальных состояний.

К этой группе можно отнести модели, описывающие режимы с обострением и режимы с самоорганизованной критичностью.

5. Информационная модель деформируемого поликристаллического материала предполагает взаимодействие между деформационными дефектами, называемыми информационными. Концептуально выделяем связанную и переданную информацию. Связанная или структурная информация  $C(S)$  определяется совокупностью статистических данных о состоянии мезодефектов на каждом структурном уровне (2). Связанная информация есть мера структурной сложности материала при деформации.

$$C(S) = -(f_1 \lg f_1 + f_2 \lg f_2 + f_n \lg f_n) = -\sum f_k \lg f_k, \quad (2)$$

где  $f_k$  – параметры частотного распределения моды деформации для мезодефектов расчетного структурного уровня.

Переданная информация  $I(S)$  представляется как отображение связанной информации на нижнем уровне на структуру более высокого иерархического уровня – определяется как условная информация.

$$I(S) = -[\sum f_k(\varepsilon) \lg f_k(\varepsilon) - \sum f_{k\omega}(\varepsilon) \lg f_{k\omega}(\varepsilon) - \sum f_{k\gamma}(\varepsilon) \lg f_{k\gamma}(\varepsilon)] \quad (3)$$

$f_k(\varepsilon) \lg f_k(\varepsilon)$  – связанная информация на расчетном структурном уровне, определяемая линейной пластической деформацией;

$\sum f_{k\omega}(\varepsilon) \lg f_{k\omega}(\varepsilon)$ ,  $\sum f_{k\gamma}(\varepsilon) \lg f_{k\gamma}(\varepsilon)$  – условная информация, зависящая от реализации сдвигового и поворотных механизмов деформации.

**Результаты моделирования.** Общим признаком анализируемых моделей является их кинетический характер – наличие возможности описания устойчивых деформационных структур и способности их к развитию.

По результатам вычислительного эксперимента можно сказать, что поле деформации всегда характеризуется набором микровихрей, их движением и взаимодействием [5].

При одинаковых средних деформациях и транспортных коэффициентах при малых деформациях для всех условий деформирования образуется модулированная структура, отражающая бегущую волну возбуждения. Для образцов с максимальной пластичностью характерны следующие структуры:

- образованные генерацией волн ведущими центрами (трансляционно-ротационные вихри ТРВ).

- образование диссипативных структур с переходом в синхронные автоколебательные структуры по всему представительному объему.

В образце с максимальными характеристиками прочности модулированная структура превращается в локальные образования типа спиральных волн, охватывающих группу зерен.

#### Библиографический список

1. Осташев В.В., Шевченко О.Д. Дефекты мезоуровня и принципы структуризации в мезомеханике// Актуальные проблемы прочности. Механизмы деформации и разрушения перспективных материалов: Материалы XXXV семинара. Ч. II. – Псков, С. 433–435.
2. Рыбин В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. – М: Металлургия, 1986. – 224 с.
3. Беркович С.Я. Клеточные автоматы как модель реальности. Поиски новых представлений физических и информационных процессов. – М., 1993.
4. Осташев В.В., Шевченко О.Д. Моделирование процессов пластической деформации в поликристаллах на мезоуровне//Актуальные проблемы прочности: Материалы семинара. Т. 1. – Витебск, 2000.– С. 76–80.
5. Осташев В.В., Шевченко О.Д. Исследование распределенной модели при пластической деформации

УДК 539.211

## ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ МЕДИ М1 ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСНЫХ ПУЧКОВ ЭЛЕКТРОНОВ

*Н.В. Камышанченко, В.А. Беленко*

г. Белгород, Белгородский государственный университет

*И.М. Неклюдов, В.Б. Юферов*

г. Харьков, ННЦ «Харьковский физико-технический институт»

*Представлены результаты экспериментальных исследований влияния мощных импульсных электронных пучков на структуру и свойства меди М1. Установлено значительное влияние импульсного облучения ускоренными электронами на структуру и твердость поверхности, а также на механические характеристики медных образцов. Структурные изменения на поверхности меди и изменение механических свойств зависят от числа импульсов облучения.*

В последние годы все больший интерес проявляется к нетрадиционным методам обработки материалов. В связи с этим интенсивно ведутся исследования изменения структурно-фазового состояния и свойств металлов и сплавов под воздействием концентрированных потоков энергии (КПЭ): ионные, плазменные и электронные пучки, лазерное и высокочастотное излучение [1, 2].

Применение импульсных высокоплотных потоков частиц и энергии на уровне мощностей  $10^5 \dots 10^9$  Вт/см<sup>2</sup> и потоков энергии 1..100 Дж/см<sup>2</sup> и выше позволяет проводить направленное изменение свойств материалов за очень короткое время. Все виды импульсного облучения приводят к сверхбыстрому (до  $10^{12}$  К/с) нагреву с последующим (до  $10^9$  К/с) охлаждением. Такие огромные скорости изменения температурного режима приповерхностных слоев материала приводят к структурно-фазовым изменениям, модификации дефектной структуры и к изменению свойств облученного материала. Ионное и плазменное облучение, кроме того, вследствие внедрения ионов в материал мишени, приводит к изменению состава материала и к образованию специфических поверхностных структур [3-5].

Для модификации структуры поверхностей используют пучки электронов с энергиями от десятков до сотен КэВ, с глубиной модифицированного слоя от 5 до 500 мкм и энерговыделениями 5-50 Дж/см<sup>2</sup>. При этом скорость нагрева для наносекундных пучков

может достигать  $10^9$  К/с, а для микросекундных пучков –  $10^6$ - $10^8$  К/с и меньше. Скорость охлаждения может достигать величин  $10^8$  К/с [6].

Исследование образцов стали X18H10T после импульсного облучения ускоренными электронами, показало существенное изменение структуры приповерхностных слоев и значительное изменение микротвердости поверхности. Причем эффект влияния определяется величинами мощности и энергии пучка и временем воздействия [4].

В данной работе исследовалось влияние облучения импульсами ускоренных электронов на структуру и свойства меди М1. Облучение проводилось на импульсном электронном ускорителе ННЦ ХФТИ с энергией электронов до 300 кэВ и плотностью мощности  $\sim 10^{11}$  Вт/см<sup>2</sup>, при длительности импульса до 1,5 мкс. Число импульсов изменялось от 1 до 20 на каждую сторону образца. Образцы для механических испытаний высекались из фольги толщиной 0,47 мм. Перед воздействием ускоренными электронами образцы меди М1 отжигались в вакууме  $\sim 10^{-5}$  мм рт. ст., при температуре 1000°C в течение получаса.

Исходные образцы меди имели крупнозернистую, рекристаллизованную структуру после деформации и отжига (рис. 1, а). Средний размер зерна примерно равен 250 мкм.

Металлографические исследования образцов меди М1, подвергнутых импульсно-