

Литература

1. Шефтель И.Т. Терморезисторы. М.: Наука, 1972, 415 с.
2. Першиц Я.Н., Вейсман В.Л. Физика твердого тела, 1970, 12, вып. 4, 1285-1288.
3. Мурин А.Н. Химия несовершенных ионных кристаллов. Л.: изд-во ЛГУ, 1975, 252-253.
4. Шамовский Л.М. Кристаллофосфоры и сцинтилляторы в геологии. М.: Недра, 1985, 239 с.
5. Першиц Я.Н., Павлов Е.В. Физика твердого тела, 1968, 10, вып. 5, 1420-1424.

Осташев В.В., Петров С.В.

ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ МИКРОПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ НА МЕЗОУРОВНЕ

1. Общие положения. Известные физические представления о пластической деформации в поликристаллах на мезоуровне позволяют определить ее как защитную реакцию в деформируемом поликристаллическом материале (ДПМ) на воздействие внешней среды, а сами механизмы пластичности сводятся к нескольким моментам [1]:

-пластическая деформация есть результат нелинейных взаимодействий крупномасштабных деформационных дефектов, называемых мезодефектами, в представительном объеме по схеме “сдвиг-поворот”;

-мезодефект определяется как масштабное пространственно-временное образование, существующее в дискретной или непрерывной форме в виде отдельных функционально-структурных единиц, взаимодействующих кластеров или целостной структуры.

-мезодефекты различного уровня, содержащие как сдвиговую, так и поворотную компоненты деформации, делают возможным перемещение в деформируемом поликристаллическом материале структурных элементов различного масштаба;

-ведущим механизмом деформации является первичное скольжение, которое всегда порождает первичный материальный поворот- все остальные механизмы деформации являются аккомодационными, обеспечивающими релаксацию поля поворотных моментов, действующих на мезодефект со стороны окружающего материала.

Принципиально такой подход может быть реализован только в рамках замкнутой системы определений, когда деформируемый поликристаллический материал представляется как система открытая, нелинейная динамическая, грубая, многоуровневая иерархическая, диссипативная, самоорганизующаяся, информационная [2].

Для ДПМ, работающего в режиме самоорганизации, время имеет определенную энергетическую стоимость – можно сказать, что мезодефект призван решать экстремальные задачи преобразования энергии и информации в материальных потоках. Предположение о том, что мезодефект, выбирая свои действия, пытается максимизировать определенную целевую функцию с учетом всей имеющейся у него информации, называем гипотезой рационального поведения. Согласно этой гипотезе мезодефект, прежде всего, должен выжить в условиях стесненной релаксации, а разряд “сдвиг-поворот” или отдельный акт (сдвиг или поворот), рассматриваем как финальный этап решения этой задачи. При этом установление связей с другими мезодефектами на одноименном уровне или по иерархическому принципу служит средством оптимальной организации таких разрядов и всегда носит общий компенсационный характер.

Мезодефект каждого иерархического уровня образуется в результате когерентных энергетических и информационных взаимодействий на предыдущем структурном уровне – при этом энергия является мерой интенсивности процесса, а информация мерой его упорядочения. Одновременно интенсивность сдвигов определяет процессы массопереноса и объем поступления энергии и информации в систему, а интенсивность поворотов меняет скорость их поступления

на разных уровнях, так что парное взаимодействие “сдвиг-поворот”, как релаксационный процесс, обеспечивает макроскопическую пластическую деформацию.

Трансляционные и ротационные составляющие тензора деформации (e_i, g_i, w_i) для мезодефекта структурного уровня i , определенные по ансамблю мезодефектов на длине X в зависимости от средней деформации Θ_j , описываются некоторыми случайными функциями $e_{ij}(x_i | \Theta_j)$. Возникающая при этом деформационная структура рассматривается как форма локализации процесса, характеризуется как определенная корреляция в расположении мезодефектов и связей между ними, приспособленных для обработки, хранения и передачи информации [2].

2. Постановка задачи и определения. В данной работе использованы формальные представления синергетической теории информации [3]. В отличие от математической теории информации, где информация атрибутивно связана с процессами управления и представляет собой снимаемую неопределенность выбора одной из множества возможностей, областью исследования синергетической теории являются информационные аспекты отражения системных образований друг в друга. Качественно обособленное множество элементов (e_i, g_i, w_i) , обладающее потенциальным свойством образовывать статические или динамические структуры в деформируемом поликристаллическом материале, необходимые для их выживания или системы в целом, определяем как системные объекты $\Gamma\{g_i\}, \Omega\{w_i\}, E\{e_i\}$. При этом отражаемый и отражающий объекты рассматриваются в качестве единого целого, а их элементы, участвуя в процессе отражения всей своей совокупностью, обладают интегративными характеристиками, которые принимаются за количественную меру энтропии и информации.

Рассмотрим деформируемый поликристаллический материал на мезоуровне как конечное дискретное пространство N со структурой, состоящей из $S(e_i, g_i, w_i) \in N$ взаимосвязанных мезодефектов одного иерархического уровня. Совокупность сдвиговых g , поворотных w и линейных деформаций e образуют информационное пространство системных объектов $\Gamma\{g_i\}, \Omega\{w_i\}, E\{e_i\}$, представляющих собой класс одинаково структурированных множеств. Функциональная модель структуры задается отображением:

$$M: \Gamma \times \Omega \times E \times [0, T] \rightarrow \Theta, \quad (1)$$

которое каждой тройке $g \in \Gamma, w \in \Omega, e \in E$ ставит в соответствие среднюю деформацию Θ , рассматриваемую как множество возможных в зависимости от условий деформации в интервале времени $[0, T]$. Принимаем, что количество элементов в составе каждого из системных объектов Γ, Ω, E равно соответственно $m(\Gamma), m(\Omega), m(E)$.

Структура модели. С информационной точки зрения развитие микропластических деформаций на мезоуровне представляет собой последовательный процесс уменьшения неопределенности исходной информации, в основе которого лежит структурирование системных объектов $\Gamma\{g_i\}, \Omega\{w_i\}, E\{e_i\}$. При этом математическая структура, заданная на множествах-состояниях, моделирует лишь те свойства реальной системы, которые сохраняются неизменными при ее переходах из одного состояния в другое, то есть имеются соответствия, сохраняющие структуру.

В общем случае при наличии трех системных объектов Γ, Ω, E и отображений $a: \Gamma \rightarrow \Omega, b: \Omega \rightarrow E$ каждая пара содержит полную взаимную информацию $I_{\Gamma \rightarrow \Omega}, I_{\Omega \rightarrow E}$

$$\begin{aligned}
I_{\Gamma \rightarrow \Omega} &= H(\Gamma) - H(\Gamma | \Omega) = H(\Omega) - H(\Omega | \Gamma) \\
I_{\Omega \rightarrow E} &= H(\Omega) - H(\Omega | E) = H(E) - H(E | \Omega)
\end{aligned}
\tag{2}$$

$H(\Gamma) = I_{\Gamma}$, $H(\Omega) = I(\Omega)$, $H(E) = I(E)$ – безусловная энтропия или самоотражаемая информация системы объектов Γ , Ω , E – это максимальная информация, потенциально содержащаяся в системном объекте. Несмотря на внешнее совпадение, энтропия H и информация I принципиально различны. Энтропия выражает среднюю неопределенность объекта, является его объективной характеристикой как источника и может быть выражена априорно, то есть до получения сообщения. Информация рассматривается как апостериорная характеристика, которая определяет ее количество на входе другого системного объекта.

$H(\Gamma | \Omega)$, $H(\Omega | \Gamma)$, $H(\Omega | E)$, $H(E | \Omega)$ – условная энтропия или энтропия отражения.

Каждое из выражений (2) представляет собой принцип максимума информации соответствующего отображения, записанный в двух эквивалентных совершенно равноправных, но интерпретируемых по-разному формам. В первом случае деформируемый поликристаллический материал стремится приспособиться к условиям деформирования, повышая соответственно $H(\Gamma | \Omega)$ или $H(\Omega | E)$, стремясь сохранить при этом постоянство условий протекания диссипативных процессов. Во втором – деформируемый поликристаллический материал стремится увеличить безусловное разнообразие реакций $H(\Omega)$, поскольку это условие выживаемости мезодефекта, и в то же время уменьшить $H(\Omega | \Gamma)$ и $H(E | \Omega)$, то есть неточность реакции на конкретную величину сдвига или поворота.

Информацию $I_{\Gamma \rightarrow \Omega}$, $I_{\Omega \rightarrow E}$ будем называть негэнтропией отражения. Она представляет собой информацию об одном системном объекте, отраженную через непосредственно связанный с ним другой системный объект. Представляется очевидным, что информация, самоотражаемая любым из системных объектов Γ , Ω , E , является монотонно возрастающей функцией от мощности множества $m(\Gamma)$, $m(\Omega)$, $m(E)$. В качестве интегративной характеристики элементов g, w, e системных объектов Γ , Ω , E , определяющей инвариант структуры и соответственно меру информации, принимается интегративный символьный код, представляющий собой определенное сообщение о каждом из системных объектов $\Gamma\{g_i\}$, $\Omega\{w_i\}$, $E\{e_i\}$ как о целостном образовании, а общее число таких сообщений соответственно равно $m(\Gamma)$, $m(\Omega)$, $m(E)$.

Определим количество информации, самоотражаемой системным объектом, как величину средней длины интегративного кода его элементов [3]

$$I_{\Gamma} = \log_2 m(\Gamma), \quad I_{\Omega} = \log_2 m(\Omega), \quad I_E = \log_2 m(E), \tag{3}$$

а величину негэнтропии отражения $I_{\Gamma \rightarrow \Omega}$ как результат воспроизведения средней длины интегративного кода элементов системного объекта Γ через непосредственно связанный с ним системный объект Ω .

Гомоморфное отображение $a : \Gamma \rightarrow \Omega$ может быть представлено как суммарный объем информации V_{Γ} , направляемый (отражаемый) системным объектом Γ в Ω

$$V_{\Gamma} = I_{\Gamma} \cdot m(\Gamma) \tag{4}$$

Потенциал системного объекта Ω определяется объемом информации:

$$V_{\Omega} = I_{\Omega} \cdot m(\Omega). \quad (5)$$

В общем случае связующий системный объект Ω позволяет воспроизвести объект Γ в виде процесса $\Gamma \rightarrow \Omega$ со средней длиной интегративного кода

$$I_{\Gamma \rightarrow \Omega} = \frac{V_{\Omega}}{m(\Gamma)} = I_{\Omega} \cdot \frac{m(\Omega)}{m(\Gamma)}, \quad (6)$$

а суммарный объем информации, поступающий из системного объекта Γ в системный объект E и средняя длина интегративного кода $\Gamma \rightarrow E$

$$V_{\Gamma \rightarrow E} = I_{\Gamma \rightarrow \Omega} \cdot m(\Omega) = I_{\Omega} \cdot \frac{m(\Omega)^2}{m(\Gamma)},$$

$$I_{\Gamma \rightarrow E} = \frac{V_{\Gamma \rightarrow E}}{m(E)} = I_{\Omega} \cdot \frac{m(\Omega)^2}{m(\Gamma)m(E)} = \frac{m(\Omega)^2}{m(\Gamma)m(E)} \cdot \log_2 m(\Omega). \quad (7)$$

Суммируя по всему объему N , выражение (2) для условной энтропии

$$H(\Gamma|\Omega) = \log_2 m(\Gamma) - \sum_{i=1}^N \frac{m(\Omega_i)^2}{m(\Gamma_i)m(E_i)} \log_2 m(\Omega_i). \quad (8)$$

В открытых системах в силу физических представлений о деформируемом поликристаллическом материале и в зависимости от условий нагружения не всегда наблюдается однозначное отображение $m(\Gamma) \Leftrightarrow m(\Omega)$ или $m(\Omega) \Leftrightarrow m(E)$, и поэтому верхние грани, например, $I_{\Gamma \rightarrow \Omega}$ и $I_{\Omega \rightarrow \Gamma}$ всегда различны. В зависимости от направления взаимодействия отличаются также условные энтропии $H(\Gamma|\Omega)$ и $H(\Omega|\Gamma)$.

Соответствия, осуществляющие отражения системных объектов в структуре деформируемого поликристаллического материала, определим как информационные морфизмы. В зависимости от особенностей отображений $a: \Gamma \rightarrow \Omega$, $b: \Omega \rightarrow E$, которые определяются условиями деформирования, информационный гомоморфизм отношений может быть информационным мономорфизмом, эпиморфизмом, или изоморфизмом и теоретически позволяет выделить следующие наиболее важные типы соответствий:

1. Всюду определенное соответствие $P_1 \subset \Gamma \times \Omega$, $P_2 \subset \Gamma \times E$, для которого $P(\Gamma) \neq \emptyset$ при любом $w \in \Omega$, $e \in E$.
2. Сюръективное соответствие $S \subset \Gamma \times \Omega$, для которого $S^{-1}(\Omega) \neq \emptyset$ при любом $w \in \Omega$, и $S \subset \Omega \times E$, для которого $S^{-1}(E) \neq \emptyset$ при любом $e \in E$.
3. Функциональное соответствие $f_1 \subset \Gamma \times \Omega$, $f_2 \subset \Omega \times E$, для которого $f_1(\Gamma)$ либо пусто, либо состоит из одного элемента для любого $g \in \Gamma$.
4. Инъективное соответствие $I \subset \Gamma \times \Omega$, для которого $I^{-1}(\Gamma)$ либо пусто, либо состоит из одного элемента для любого $w \in \Omega$.

В зависимости от условий испытания возможны различные комбинации, например,

всюду определенные $P \subset \Gamma \times \Omega$ и одновременно функциональные $f_2 \subset \Omega \times E$ соответствия, которые будем отождествлять с обычными отображениями.

Тип соответствия, принимаемый в модели или определяемый по экспериментальным данным, позволяет:

- учесть степень открытости деформируемого материала, как системы,
- отклонение от закона сохранения информации,
- потери информации в процессе преобразования.

Принципиально важным является случай потери информации при комбинации сюръективного и функционального соответствия, определяется соотношениями:

$$m(\Gamma) - m(\Omega) \geq 0, \quad m(\Omega) - m(E) \geq 0, \quad V_\Gamma > V_\Omega > V_E \quad (9)$$

С учетом (9) после преобразований выражения для условной информации

$$H(\Gamma|\Omega) = - \sum_{i=1}^N \frac{m(\Omega_i)}{m(\Gamma_i)} \log_2 \frac{m(\Omega_i)}{m(\Gamma_i)} \quad (10)$$

Меру структурной организации деформируемого поликристаллического материала характеризуем функцией независимости $i_{\Gamma\Omega}$, $i_{\Omega\Gamma}$ и функцией причинности Y [4]:

$$i_{\Gamma\Omega} = H(\Gamma|\Omega)/H(\Gamma), \quad i_{\Omega\Gamma} = H(\Omega|\Gamma)/H(\Omega), \quad 0 \leq i \leq 1 \quad (11)$$

$$Y = i_{\Gamma\Omega}/i_{\Omega\Gamma} \quad 0 \leq Y < \infty.$$

Предельные значения $i = [0, 1]$ соответствуют однозначной зависимости между системными объектами Γ и Ω или отсутствию ее.

Функция причинности Y вследствие асимметрии отношения выявляет механизм развития микропластических деформаций на мезоуровне при различных условиях нагружения. Процессы, контролируемые $Y > 1$, определяют причинную связь между системными объектами

$\Gamma \rightarrow \Omega \rightarrow E$. При $Y < 1$ наиболее вероятны процессы $\Gamma \rightarrow E$ или $\Omega \rightarrow E$.

Таким образом, теоретическим базисом информационной модели микропластических деформаций на мезоуровне является синергетическая теория информации, в рамках которой подтверждены основные информационные законы – закон сохранения информации, информационный закон отражения системных объектов, принцип минимума диссипации.

Литература

1. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов: В 2 т. / В.Е Панин, П.В. Макаров и др. – Новосибирск: Наука, 1995. – 320 с.
2. Остаев В.В., Шевченко О.Д. Формализация моделей деформируемого поликристаллического материала в терминах мезомеханики // ЖТФ, 2002, Т. 72, В. 4, С. 41-45.
3. Вяткин В.Б. Синергетическая теория информации: общая характеристика и примеры практического использования // Наука и оборонный комплекс. Материалы региональной научно-практической конференции. Екатеринбург: УРО РАН, 2002.
4. Коротаяев С.М. Гелиогеофизические эффекты нелокальности // Геомагнетизм и аэрномия, 35(3), 116, 1995.

Павлов Е.В.