

## ДИСЛОКАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ОПИСАНИЯ ПРЕРЫВИСТОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ

Ф.С. Попов

Научный руководитель: профессор, д.ф.-м.н. П.В. Трусов  
 Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
 Россия, г.Пермь, пр. Комсомольский, 29, 614990  
 E-mail: [popovfyodor@yandex.ru](mailto:popovfyodor@yandex.ru)

В настоящее время при разработке математических моделей технологических процессов одной из наиболее актуальных проблем является построение моделей, позволяющие описывать эволюцию мезо- и микроструктуры моно- и поликристаллических материалов и сплавов [1]. Существенное влияние на поведение деформируемых материалов оказывают диффузионные процессы, которые могут проявляться в известных эффектах, например, эффекте прерывистой пластичности или Портевена–Ле Шателье [2].

В предлагаемой трехуровневой дислокационной модели принимается разделение по структурным уровням, т.е. для каждого из указанных уровней явно вводятся в рассмотрение соответствующие механизмы деформирования. В данном случае в рассмотрение для поликристаллического образца вводятся следующие масштабные уровни: макроуровень, мезоуровень-1 и мезоуровень-2. При описании деформирования кристаллита используется модель мезоуровня-1 и подмодель мезоуровня-2. Низшим уровнем, т. е. мезоуровнем-2, в каждом кристаллите (элементе мезоуровня-1) считается уровень дислокационных структур и диффундирующих примесных атомов, а высшим уровнем (макроуровнем) является представительный макрообъем материала (совокупность элементов мезоуровня-1). В модели мезоуровня-2 используется разделение плотностей дислокаций по системам скольжения на мобильные и иммобильные, а также разделение на положительные и отрицательные (в зависимости от направления экстраплоскости), поэтому внутренними переменными мезоуровня-2 являются: плотность мобильных дислокаций (положительных и отрицательных), плотность иммобильных дислокаций (положительных и отрицательных), плотность барьеров на каждой СС. Принимается гипотеза об однородном распределении дислокаций по СС в пределах каждого элемента мезоуровня-2. Объектом исследования мезоуровня-1 является монокристалл с приближенно совершенной решеткой, но в котором имеется значительное число дефектов (дислокаций и примесных атомов). К внутренним переменным мезоуровня-1 относятся сдвиги, скорости сдвигов по системам скольжения и критические напряжения, которые определяются дислокационной субструктурой с учетом взаимодействий с примесными атомами на мезоуровне-2. В связи с необходимостью детального описания дефектной структуры поставленная задача будет решаться на достаточно мелкой сетке. Математическая постановка модели мезоуровня-2 включает следующую систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_{meso-1}^{(k)} = \tau_{meso-2}^{(k)}, \\ \rho^{(k)} = \rho_{m+}^{(k)} + \rho_{m-}^{(k)}, \\ \dot{\rho}_{m\pm}^{(k)} = \dot{\rho}_{nuc\pm}^{(k)}, \\ \dot{\rho}_{nuc}^{(k)} = \rho_s^{(k)} \frac{v_{\pm}^{(k)}}{h_{ann}}, \\ \rho_s^{(k)} = \rho_{s0} + C\rho_s^{(k)}, \\ v_{m+}^{(k)} = v_{m-}^{(k)} = v_0^{(k)} \exp \left[ -\frac{\Delta G}{\kappa\theta} \left( 1 - \left( \frac{|\tau_-^{(k)}|}{\tau_c^{(k)}} \right)^p \right)^q \right], \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $k$  – номер системы скольжения,  $\rho^{(k)}$  – общая плотность дислокаций, которая складывается из сумм плотностей дислокаций обоих знаков, вследствие чего происходит повторное удвоение числа систем скольжения (СС),  $\rho_{m+}^{(k)}, \rho_{m-}^{(k)}$  – плотность положительных и отрицательных мобильных дислокаций на  $k$ -й СС,  $\dot{\rho}_{mic}^{(k)}$  – скорость, с которой генерируются дислокации,  $\rho_s^{(k)}$  – плотность активных источников дислокаций,  $h_{ann}$  – расстояние между вновь образованными дислокациями, при сближении дислокаций на меньшее расстояние они аннигилируют [3],  $v_{\pm}^{(k)}$  – скорость положительных и отрицательных мобильных дислокаций в кристаллитах [4],  $\rho_{s0}$  – начальная плотность источников,  $C$  – параметр, отвечающий за степень активности источников дислокаций.

На мезоуровне-1 и макроуровне принимается гипотеза об аддитивности упругой и неупругой составляющих меры скорости деформации, для связи которых используется модифицированная гипотеза Фойгта. Связь между мезоуровнем-1 и мезоуровнем-2 полагается следующей: с мезоуровня-1 на мезоуровень-2 передается действующее напряжение; в свою очередь, из плотностей дислокаций и примесей, барьеров по системам скольжения на мезоуровне-2 определяются критические напряжения на соответствующих системах скольжения, скорости движения дислокаций и скорости сдвигов, которые передаются обратно на мезоуровень-1. На первом этапе работы были приняты некоторые дополнительные допущения: эволюция микроструктуры (элементов мезоуровня-2) ограничивается введением в рассмотрение только мобильных дислокаций вместе с генерацией новых дислокаций.

Проведен численный эксперимент на одноосное нагружение монокристаллического образца из чистой меди. На основе полученных результатов можно сделать вывод о том, что критические напряжения и плотность дислокаций с ростом интенсивности деформации выходят на так называемое состояние «насыщения», вследствие чего могут образовываться неустойчивости пластического течения. Таким образом, в работе исследуется эффект прерывистой пластичности или эффект Портевена – Ле Шателье при помощи дислокационной модели; в качестве основного физического механизма рассматриваемого эффекта принято динамическое деформационное старение. Сформулированы концептуальная и математическая постановки задачи исследования неупругого деформирования поликристаллического образца: введен мезоуровень-2 для рассмотрения взаимодействия линейных дефектов, таких как мобильные и иммобильные дислокации, барьеры и точечные дефекты, с целью описания и анализа рассматриваемого эффекта. Получены зависимости критических напряжений и плотности дислокаций от интенсивности деформации, на основе чего можно констатировать пригодность дислокационных моделей к описанию диффузионных процессов, происходящих во время пластических деформаций.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 17-41-590694-р\_а).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трусов П.В., Швейкин А.И., Нечаева Е.С., Волегов П.С. Многоуровневые модели неупругого деформирования материалов и их применение для описания эволюции внутренней структуры // Физическая мезомеханика. – 2012. – Т. 15, № 1. – С. 33-56.
2. Трусов П.В., Швейкин А.И. Теория пластичности: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2011. – 419 с.
3. Davoudi K., Nicola L., Vlassak J. Dislocation climb in two-dimensional discrete dislocation dynamics // Journal of Applied Physics – 2012. – Vol. 111.
4. Alankar A., Field D., Zbib M. Explicit incorporation of cross-slip in a dislocation density-based crystal plasticity model // Philosophical Magazine – 2012. – Vol. 92:24. – Pp. 3084-3100.