

МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ С УЧЕТОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДЕФЕКТОВ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ

Д. С. ГРИБОВ, П. В. ТРУСОВ

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

614990, Пермь, просп. Комсомольский, 29, ПНИПУ, каф. ММСП

E-mail: gribowdmittii@yandex.ru

В настоящее время активно разрабатываются многоуровневые модели для описания пластического деформирования моно- и поликристаллических материалов, учитывающие их реальное строение – зёрненную структуру, дислокации и дислокационные субструктуры различных типов и другие дефекты. Увеличение интереса к таким моделям связано с трудностью описания процессов сложного пластического деформирования с применением макрофеноменологических подходов и моделей, а также с ростом вычислительных возможностей и, как следствие этого, возможностью введения большого числа внутренних переменных и эволюционных уравнений для данных характеристик [1-3].

Многоуровневые модели позволяют описать пластическое деформирование кристаллитов с позиций основных мод, наблюдаемых в экспериментах – скольжения дислокаций, двойникования и др. Прямое описание дефектной структуры также позволяет описывать эволюцию критических напряжений и может быть использовано для анализа процессов сложного либо знакопеременного нагружения. Например, с применением данных моделей может быть описан известный эффект Баушингера, заключающийся в падении критических напряжений при реверсивном нагружении – путём описания скольжения поджатых на барьерах дислокаций при нагружении в направлении “от барьера”. Явление дополнительного упрочнения (существенное повышение предела текучести, наиболее заметное в материалах с низкой энергией дефекта упаковки) при сложном циклическом нагружении связано с образованием большого числа барьеров на расщепленных дислокациях и общим увеличением плотностей дислокаций в материале. Феноменологическое описание данных процессов крайне сложно, и обычно сводится к введению непрозрачных в физическом смысле функций от градиента вектора скорости. В части работ вводятся тензорные характеристики, описывающие структуру низших масштабных уровней, таких как тензор плотности дислокаций.

В работе используется прямая трёхуровневая модель, точкой интегрирования макроуровня является элемент мезоуровня 1, состоящий, в свою очередь, из элементов мезоуровня 2. Основной модой пластического деформирования является скольжение краевых дислокаций, применяется аддитивное разложение градиента скорости на упругую и пластическую составляющие. С использованием метода конечных элементов (МКЭ) производится расчёт скоростей деформаций в каждом узле, на мезоуровне 1 определяются упругие деформации и напряжения, на мезоуровне 2 описывается эволюция плотностей дефектов по системам скольжения (СС) и определяются скорости сдвигов. Масштабы мезоуровня 1 и мезоуровня 2 совпадают, и представляют собой часть кристалла, являющегося представительным объёмом кристаллита (в данном объеме полагается однородность всех внутренних переменных).

На мезоуровне 1 определяется отклик (напряжения) кристаллита по передаваемому с макроуровня градиенту скорости и определяемым на мезоуровне 2 скоростям сдвигов на СС (по плотностям дислокаций и скоростям их движения). По известной ориентации решетки на мезоуровне 1 вычисляются касательные напряжения на СС для передачи их на мезоуровень 2.

Мезоуровень 2 служит для описания эволюции дефектной структуры кристаллита. Внутренними переменными мезоуровня 2 являются плотности дислокаций по СС и плотности барьеров скольжению (образуемые реакциями на расщепленных дислокациях). Плотности дислокаций разделяются по двум признакам: мобильные и иммобильные (к их числу относятся только поджатые в направлении “к барьеру” дислокации), и по направлению

нормали к плоскости залегания дислокации (положительные и отрицательные дислокации). Эволюционные уравнения для плотностей мобильных дислокаций по СС описывают: зарождение дислокаций путём работы источников Франка-Рида и др., аннигиляцию дислокаций разных знаков на одной СС, запирающие дислокации на барьерах, обход барьеров по термоактивируемым механизмам и механизму разрушения барьеров при достижении критических напряжений на барьере. Барьеры описываются как преграды, образованные на расщепленных дислокациях (барьеры Ломера–Коттрелла и Хирта); образование барьеров происходит при множественном скольжении, разрушение происходит рекомбинацией при превышении критических напряжений на барьере. Критические напряжения на СС (необходимые для выполнения критерия Шмида) определяются текущим состоянием плотностей дефектов по СС. Средние скорости движения дислокаций определяются действующими напряжениями и плотностями дефектов. Скорости сдвигов определяются с использованием уравнения Орована в скоростной форме.

Общая система уравнений моделей мезоуровней 1 и 2 встраивается в модель макроуровня для описания отклика материала при пластическом деформировании и при описании изменения дефектных структур для дальнейшего сравнения с экспериментальными данными и идентификации параметров модели. Преимуществом данной модели является прямое описание источников пластического деформирования кристаллических материалов и следующая из этого универсальность модели.

Проведен цикл численных экспериментов по определению изменения плотности дислокаций, изменения критических напряжений на различных системах скольжения от интенсивности деформаций.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (базовая часть государственного задания ПНИПУ, проект №9.7434.2017/8.9) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 17-01-00379).

Список литературы

1. H. Gao, Y. Huang, W.D. Nix, J.W. Hutchinson. Mechanism based strain gradient plasticity – I. Theory// Journal of the Mechanics and Physics of Solids. – 1999. – № 47. pp 1239-1263.
2. I.J. Beyerlein, C.N. Tome A dislocation-based constitutive law for pure Zr including temperature effects// International Journal of Plasticity. – 2008. – № 24. – pp 867 – 895.
3. П.В. Трусков, А.И. Швейкин, Е.С. Нечаева, П.С. Волегов. Многоуровневые модели неупругого деформирования материалов и их применение для описания эволюции внутренней структуры. Физическая мезомеханика. – 2012. – № 15. с. 33 – 56.