ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

«Физическая мезомеханика.

**Материалы с многоуровневой иерархически
организованной структурой и интеллектуальные
производственные технологии»,**

посвященная 90-летию со дня рождения
основателя и первого директора ИФПМ СО РАН
академика Виктора Евгеньевича Панина

в рамках

**Международного междисциплинарного симпозиума
«Иерархические материалы: разработка и приложения
для новых технологий и надежных конструкций»**

**5–9 октября 2020 года
Томск, Россия**

Томск
Издательство ТГУ
2020

DOI: 10.17223/9785946219242/27

**ТРЕХУРОВНЕВАЯ УПРУГОВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ: ВЛИЯНИЕ
ЭВОЛЮЦИИ ДИСЛОКАЦИОННОЙ СУБСТРУКТУРЫ НА ПОВЕДЕНИЕ
ПОЛИКРИСТАЛЛОВ ПРИ НЕПРОПОРЦИОНАЛЬНОМ ЦИКЛИЧЕСКОМ
НАГРУЖЕНИИ**

Грибов Д.С., Попов Ф.С., Трусов П.В.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

Пластическое деформирование кристаллических материалов зачастую приводит к увеличению напряжений течения, связываемое большинством исследователей с существенной перестройкой дефектных структур внутри зёрен. Считается, что явление упрочнения материалов при пластическом деформировании связано с эволюцией дислокационных структур: образованием новых дислокаций, аннигиляции существующих, образованием барьеров на расщепленных дислокациях и общего повышения плотности дислокаций, происходящих при пластическом деформировании (на примере материалов с ГЦК–решеткой и преимущественно низкой энергией дефекта упаковки (ЭДУ) [1]). При низкой ЭДУ дислокации перемещаются в расщепленном состоянии, что при множественном скольжении может приводить к их рекомбинации в барьеры, и последующему накоплению поджатых дислокаций, что повышает предел текучести.

Движение дислокаций – основной источник пластического деформирования. В связи с этим рассмотрение взаимодействий, происходящих на уровне дефектной структуры, важно для выяснения причин упрочнения. К основным видам взаимодействия краевых дислокаций в материалах с ГЦК-решеткой относятся [2,3]:

- образование источников дислокаций, и их работа, приводящая к появлению новых дислокаций, генерирующих расширяющиеся дислокационные петли;
- взаимодействие частичных дислокаций, приводящее к появлению барьеров Ломера-Коттрелла и Хирта, непреодолимых на части систем скольжения;
- при сближении двух дислокаций в одной или близких плоскостях скольжения, но имеющих противоположные вектора Бюргерса, происходит аннигиляция обеих дислокаций.

Все виды взаимодействий влияют друг на друга и на характер скольжения в целом. Важной является задача выделения и учета основных взаимодействий, приводящих к изменению микроструктуры, и по этим изменениям определять текущие значения критических напряжений.

Интерес вызывает экспериментальная работа [4], где был проанализирован ряд проведенных экспериментов на циклическое деформирование стальных образцов. Результаты экспериментов согласуются с теоремами о приспособляемости Мелана и Койтера о смене пластического деформирования системы на упругое после определенного числа циклов нагружения при ограничении значений прикладываемых сил. При циклическом непропорциональном нагружении наблюдается увеличение амплитудных значений сдвиговых напряжений (при неизменной амплитуде деформаций), зависящее от степени непропорциональности деформирования. Эффект был назван дополнительным упрочнением, его величина могла составлять до сотен процентов от упрочнения, происходящего при пропорциональном циклическом нагружении. Данный эффект наблюдается преимущественно на материалах с низкой энергией дефекта упаковки. При интенсивных пластических деформациях данный класс материалов склонен к образованию сложных дефектных структур, обусловленных появлением различных барьеров к скольжению краевых дислокаций.

Для описания деформирования поликристаллического агрегата в модели вводится три масштабных и структурных уровня: макроуровень, мезоуровень-1 и мезоуровень-2. При построении модели использовался подход, основанный на введении внутренних переменных [5], характеризующих микроструктуру материала. Связь подмоделей организована путём введения в структуру определяющих соотношений явных внутренних переменных. Для

Секция 1. Современные задачи и новые приложения физической мезомеханики материалов с иерархической структурой

определения значения внутренних переменных, используются замыкающие уравнения, описывающие процессы деформирования на более низких масштабных уровнях. Определяющие соотношения макроуровня позволяют определить механический отклик представительного объема материала – напряжения. Воздействием на мезоуровень с макроуровня передаются кинематические воздействия. Принимается гипотеза Фойгта о равенстве градиентов скоростей перемещений макроуровня и мезоуровня-1. Неупругая составляющая тензора деформации скорости макроуровня определяется осреднением скоростей неупругих деформаций элементов мезоуровня-1. Для описания деформирования

Рис. 1. Схема взаимодействия уровней

кристаллита применяется модель мезоуровня-1, для описания эволюции плотностей дефектов используется модель мезоуровня-2. Касательные напряжения по СС с мезоуровня-1 передаются на мезоуровень-2, данные напряжения позволяют определить скорость изменения плотностей дефектов различного рода, а также описать упрочнение по СС. С мезоуровня-2 на мезоуровень-1 передаются скорости сдвигов по системам скольжения.

На мезоуровне-2 введены плотности дислокаций двух знаков на одной СС – положительные и отрицательные, знак определяется в соответствии с направлением эксплапоскости. Переменными мезоуровня-2 являются: плотности дислокаций (положительных и отрицательных), плотности источников дислокаций на СС, плотности дефектов на расщеплённых дислокациях. Основопологающей гипотезой в предлагаемой работе является детальное физически обоснованное описание дислокационного скольжения, взаимодействия дислокаций друг с другом (образование барьеров).

В работе представлена трехуровневая конститутивная модель для описания пластического деформирования, основное внимание уделено дислокационной подмодели. Проведены численные эксперименты по определению изменения критических напряжений на различных системах скольжения в ходе пластического деформирования, проведён анализ работы источников эволюции плотностей дефектов.

Рис. 2. Зависимость напряжений (левый), зависимость плотностей дислокаций на СС (правый) в численном эксперименте на растяжение - сдвиг от общих накопленных деформаций. Материал – легированная медь (Cu-7Al)

1. Kocks U.F., Mecking H., Physics and phenomenology of strain hardening: the FCC case // Progress in Materials Science. – 2003. – Vol. 48. – Pp. 171–273
2. Хирт Дж., Лотэ И. Теория дислокаций. – М.: – Атомиздат. – 1972 – 599 с
3. Орлов, А.Н. Введение в теорию дефектов в кристаллах. – М.: Высшая школа. – 1983. – 144 с.
4. Benallal A., Marquis D., Constitutive Equations for Nonproportional Cyclic Elasto-Viscoplasticity // J. Eng. Mater. Technol. – 1987. – Vol. 109. – Pp. 326–336.
5. 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.