

МНОГОУРОВНЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕННОСТИ В МЕТАЛЛАХ

К.А.КУРМОЯРЦЕВА, П.В. ТРУСОВ, Н.В. КОТЕЛЬНИКОВА

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

E-mail: kurmoiartseva.k@mail.ru

Увеличение срока эксплуатации деталей и конструкций является одной из проблем, в течение многих десятилетий стоящих перед механиками и материаловедом. Ее решение требует создания и совершенствования надежных методов и моделей для прогнозирования поведения материала вплоть до момента разрушения. Одним из наиболее перспективных направлений представляется построение многоуровневых моделей, основанных на физических теориях упруговязкопластичности. В предлагаемой работе особое внимание уделено описанию поведения поликристаллических материалов, имеющих гексагональную плотноупакованную структуру (в частности – титана и его сплавов, широко применяемых в аэрокосмической промышленности).

Целью настоящего исследования является разработка математической модели для анализа поведения поликристаллических материалов, позволяющей описывать процессы накопления поврежденности в поликристаллических материалах как многостадийного и многоуровневого процесса накопления микро- и мезодефектов, в широком диапазоне скоростей нагружения, с учетом температурных воздействий. Рассматривается структура модели для описания разрушения поликристаллических материалов, без изначального выбора определенной моды разрушения. При этом в рассмотрение включены как диффузионные процессы, так и дислокационные процессы зарождения микропор и микротрещин и увеличение их количества и размеров (накопление повреждений) с дальнейшим слиянием микроповреждений с образованием макроскопической трещины и ее роста.

Использование в качестве основы физических теорий пластичности позволяет описывать эволюцию внутренней структуры материала с учетом накопления дефектов различной природы. Исследование разрушения деталей и конструкций в процессах их изготовления и эксплуатации невозможно без создания соответствующих моделей, которые бы в явном виде учитывали физические первопричины эволюции внутренней структуры материала и накопления поврежденности при больших деформациях.

Для описания физических механизмов процессов пластического деформирования и разрушения необходимо изучать поведение материала на более низких, чем макроуровень, масштабных уровнях. При этом на каждом масштабном уровне рассматриваются различные механизмы накопления поврежденности, полное описание деформирования и разрушения требует подхода, учитывающего многостадийность процесса и смену ведущего механизма.

В структуре разрабатываемой модели выделены макроуровень, мезоуровень–I и мезоуровень–II. Представительным объемом на макроуровне является поликристаллический агрегат, состоящий из большого (не менее 400) количества кристаллов (зерен, субзерен), каждый из которых рассматривается как представительный объем мезоуровня–I. На макроуровне деформирование материала описывается с помощью несимметричной индифферентной меры скорости деформации [1], которую можно разложить на упругую, пластическую и температурную составляющие. На мезоуровне–I описание осуществляется в терминах сдвигов по системам скольжения (СС) кристаллита, упрочнения СС. На мезоуровне–II рассматриваются кинетические соотношения для эволюции плотностей дефектов различной природы и размерности. При этом для адекватного описания процесса накопления повреждений детально анализируется взаимодействие дислокаций разных плоскостей скольжения.

В качестве основы модели мезоуровня–II использованы кинетические уравнения, описывающие изменение плотностей дислокаций на СС, и соотношения дислокационной теории разрушения. Основным механизмом неупругого деформирования является движение краевых дислокаций, которые при этом взаимодействуют между собой и с дефектами

кристаллической решетки различной размерности. Моделирование на основе кинетических уравнений для плотностей дислокаций является универсальным подходом к изучению поведения большого количества дислокаций и различных конкурирующих деформационных механизмов их взаимодействия. Данные модели позволяют получить зависимости плотности дислокаций от параметров воздействия и параметров внутренней структуры материала. Достоинством таких моделей является способность описать структуру, прочность и пластичность металлов и сплавов на микроструктурном уровне. Дислокационная модель, развитая для анализа эволюции микроструктуры и механизмов деформации, включает уравнения для плотностей мобильных и иммобильных дислокаций, плотности источников дислокаций и барьеров, а также – для описания процессов аннигиляции, образования барьеров и т.д. На основе такого подхода можно оценить влияние отдельных механизмов накопления повреждений и деформирования на экспериментально наблюдаемые особенности поведения материалов.

Дислокационная теория разрушения основана на идее определяющей роли пластической деформации и включает в себя силовые условия зарождения и распространения трещин. К данному направлению относятся широко известные дислокационные модели зарождения трещин Зинера, Стро, Коттрелла [2]. При этом можно выделить три основных направления данной теории: модели, базирующиеся на концепции нагромождения дислокаций в отдельных плоскостях скольжения перед препятствиями типа границ двойников, включений и т.д., модели, связывающие возникновение трещин в результате взаимодействия дислокаций, расположенных в пересекающихся СС, и безбарьерные модели.

Основной задачей настоящего этапа работы является физический анализ механизмов накопления повреждений в титановых сплавах и его математическое описание. При этом используется явное описание изменения внутренней структуры дефектов материала как в процессе изготовления, так и в процессе эксплуатации. Используется подход к построению конститутивных моделей, основанный на введении внутренних переменных. Данный класс моделей позволяет анализировать процессы деформирования на различных масштабных уровнях, учитывать эволюцию микроструктуры и накопление повреждений. Представлены результаты анализа существующих моделей дислокационных механизмов зарождения и докритического подрастания трещин. Среди основных механизмов можно выделить слияние экстраплоскостей нескольких дислокаций, ведущее к формированию полости, и механизмы, связанные с заторможенным сдвигом, при котором возникновение микротрещины обусловлены полями упругих напряжений в голове скопления; разрыв или частичное смещение стенки дислокаций. Рассматривается общая структура и математические соотношения конститутивной модели для описания неупругого деформирования, учитывающей накопление поврежденности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №17-19-01292).

Список литературы

1. Трусов П.В., Нечаева Е.С., Швейкин А.И. Применение несимметричных мер напряженного и деформированного состояния при построении многоуровневых конститутивных моделей материалов // Физ. мезомех. – 2013. – Т. 16. – № 2. – С. 15–31
2. Иванова В.С., Гордиенко Л.К., Геминев В.Н. Роль дислокаций в упрочнении и разрушениях металлов. – М.: Наука, 1965. – 180 с.