

## МНОГОУРОВНЕВАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПИСАНИЯ НЕУСТОЙЧИВОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

*Е.А. ЧЕЧУЛИНА, Ф.С. ПОПОВ*

Пермский национальный исследовательский политехнический университет  
614990, Пермь, просп. Комсомольский, 29, ПНИПУ, каф. ММСП

E-mail: [Zhenya-chechulina@yandex.ru](mailto:Zhenya-chechulina@yandex.ru)

Известно, что неустойчивость пластического течения (эффект Портевена – Ле Шателье (ПЛШ)) проявляется для широкого класса материалов в определенных температурно-скоростных диапазонах деформирования в виде скачков на диаграммах нагружения. Актуальность проблемы подтверждается неуклонным ростом количества работ [1,2], посвященных выявлению общих закономерностей и характера распределения неоднородной пластической деформации на мезо- и макромасштабах, поскольку эффект ПЛШ оказывает негативное влияние на качество готовых деталей, получаемых методами обработки давлением.

Лидирующим механизмом, ответственным за проявление эффекта ПЛШ, полагается динамическое деформационное старение (ДДС), обусловленное взаимодействием между дислокациями, временно остановившимися на препятствиях (дислокациях леса или других дефектах), и диффундирующими атомами примеси, которые дополнительно закрепляют дислокации. При численном исследовании процессов деформации важную роль играет корректное описание свойств материала деформируемого образца в широком диапазоне величин пластических деформаций, скоростей деформаций и температур.

Для комплексного описания деформирования поликристаллических материалов при термомеханическом нагружении предлагается использование многоуровневых моделей, основанных на введении внутренних переменных и физических теориях пластичности [3], позволяющих явно описывать эволюцию внутренней структуры и различные физические механизмы деформирования.

В работе предлагается трехуровневая (макроуровень, мезоуровень I и мезоуровень II) конститутивная упруговязкопластическая математическая модель, для описания особенностей деформирования поликристаллических материалов в температурно-скоростных диапазонах, в которых существенное влияние на поведение материалов оказывают диффузионные процессы, в частности, имеет место эффект Портевена – Ле Шателье.

Основная задача разбивается на три связанных между собой подзадачи: задачу определения напряженно-деформированного состояния (НДС), задачу теплопроводности, задачу диффузии, которые реализуются с использованием дислокационной подмодели.

Подмодель для анализа дислокационной субструктуры включает описание диффузии примесей к дислокациям и взаимодействие их с последними, образование нано- и субмикроскопических вторичных включений из примесных атомов или их соединений. Подход к описанию дислокационной структуры основан на введении однородных плотностей дислокаций на каждой системе скольжения и получении эволюционных уравнений, описывающих механизмы их зарождения и взаимодействия.

Для учета наиболее важных термически активируемых механизмов деформирования в работе вводятся соответствующие кинетические уравнения. Текущее состояние микро-структуры отслеживается через плотности дислокаций, которые служат внутренними переменными мезоуровня II. При описании эволюции плотности дислокаций учитываются конкурентные процессы генерации и аннигиляции дислокаций различного вида, образование дислокационных барьеров, мобилизация и иммобилизация дислокаций. Плотность дислокаций на каждой системе скольжения кристаллита полагается однородной и изменяющейся с течением времени.

Для элементов мезоуровня II представлены формулировки дифференциальных эволюционных уравнений для плотностей дислокаций, которые описывают упругие взаимо-

действия между дислокациями, что стало возможным в результате обобщения описания упругих взаимодействий между участками дислокаций.

Разработан алгоритм реализации подмодели мезоуровня II, учитывающей генерацию новых источников дислокаций и изменение критических напряжений. Проведены численные эксперименты по определению изменения плотности дислокаций, изменения критических напряжений на различных системах скольжения с течением времени. Получены зависимости плотности дислокаций, критических напряжений от времени, критических напряжений от плотности дислокаций на системах скольжения при различных нагружениях.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 16-31-00215 мол\_а, 17-41-590694\_p\_а-Урал).*

#### **Список литературы**

1. Трусов П.В., Чечулина Е.А. Прерывистая текучесть: физические механизмы, экспериментальные данные, макрофеноменологические модели // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2014. – № 3. – С. 186–232.
2. Трусов П.В., Чечулина Е.А. Прерывистая текучесть: модели, основанные на физических теориях пластичности // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2017. – № 1. – С. 134–163.
3. П.В. Трусов, 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, 1, с. 33 – 56.

## **СИНТЕЗ СЖИГАНИЯ В ВОЗДУХЕ СМЕСЕЙ НАНОПОРОШКА АЛЮМИНИЯ И ПЕНТАОКСИДА НИОБИЯ**

*А.О. ЧУДИНОВА, А.П. ИЛЬИН*

Томский политехнический университет

Институт физики высоких технологий

E-mail: [chudinova.1509@mail.ru](mailto:chudinova.1509@mail.ru)

Смешивание нанопорошка алюминия с пентаоксидом ниобия проводили механическим способом в сухом виде, в атмосфере воздуха. Смесь, из порошков нанопорошка алюминия и пентаоксида ниобия, растирали на кальке, с помощью пробки, обернутой в кальку. Полученные смеси подвергли просеиванию через сито, которое имело размер ячеек 63 мкм, с целью разрушения агломератов, тем самым выравнивая распределение компонентов в образце [1-4].

На металлическую подложку, из нержавеющей стали свободно насыпали подготовленные смеси, придавая им коническую форму. Процесс горения смеси нанопорошка алюминия с пентаоксидом ниобия производился в свободно насыпанном состоянии на воздухе [5].

Процесс горения смесей в воздухе проводили в одинаковых условиях для того, чтобы в дальнейшем сравнить результаты. При визуальном наблюдении был определен процесс горения смесей, который проходил в одну или две стадии, в зависимости от выбранного состава горячей смеси.

Наблюдалось распространение тепловой волны на поверхности образца от точки воспламенения к периферии образца - первая стадия (низкотемпературная). В середине образца (зона минимального теплоотвода), температура образца самопроизвольно увеличива-