ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

**МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«Перспективные материалы с иерархической структурой
для новых технологий и надежных конструкций»**

**X МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«Химия нефти и газа»**

Томск

Издательский Дом ТГУ

2018

DOI: 10.17223/9785946217408/16

**МНОГОУРОВНЕВАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ДЕФОРМИРОВАНИЯ
МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ СТРУКТУРНОЙ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ:
МОДИФИЦИРОВАННЫЕ КИНЕТИЧЕСКИЕ УРАВНЕНИЯ**

Шарифуллина Э.Р., Трусов П.В., Швейкин А.И.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

Предлагается модифицированная многоуровневая статистическая модель на основе физической теории упруговязкопластичности [1], позволяющая описывать поведение поликристаллических металлов и сплавов при «обычном» пластическом деформировании и при деформировании в режиме структурной сверхпластичности (СП). Преимуществом выбранного подхода является возможность явного описания изменяющейся структуры материала и наиболее важных физических механизмов деформирования на различных масштабных уровнях за счет введения в структуру модели внутренних переменных и уравнений для их эволюции. Рассматриваемая трехуровневая (макромасштабный, уровень описания зернограницного скольжения и мезомасштабный уровни) статистическая модель включает описание основных механизмов неупругого деформирования и сопутствующих процессов: внутризеренного дислокационного скольжения (ВДС), зернограницного скольжения (ЗГС), зернограницной диффузии, ротаций решеток кристаллитов, динамической рекристаллизации. В зависимости от рассматриваемого диапазона температурно-скоростных воздействий и различного состояния зеренной структуры изменяется роль перечисленных процессов и физических механизмов, а также вклад последних в (текущую) реализацию неупругого деформирования в различных режимах.

Анализируемые процессы неупругого деформирования относятся к классу геометрически нелинейных, что порождает определенные сложности при построении конститутивных моделей для их описания. Использование многоуровневых моделей позволяет корректно решить вопрос формулировки определяющих соотношений, удовлетворяющих требованию независимости от выбора системы отсчета и учитывающих симметричные свойства материала [2]. Основное внимание в предлагаемой модификации многоуровневой модели уделяется описанию механизма ЗГС, физическому обоснованию законов эволюции критических напряжений сдвига для ЗГС и ВДС, учитывающих взаимовлияние ключевых механизмов, а также оценке их вкладов в неупругое деформирование. Описание механизма ЗГС выделяется в отдельный структурный уровень (подмодель ЗГС), деформационные характеристики (скорости зернограницных сдвигов в представительном макрообъеме) формулируются по аналогии с уравнением Орована с использованием осреднения скоростей смещений пар соседних кристаллитов по общей фасетке границы и записываются на основе закона аррениусовского типа. Для передачи заданных кинематических воздействий с макроуровня на мезоуровень применяется модифицированная гипотеза Фойгта, учитывающая реализацию части деформаций за счет ЗГС. Анализ результатов экспериментальных исследований по СП в различных металлических сплавах показал, что ВДС и зернограницная диффузия существенным образом влияют на реализацию ЗГС в качестве аккомодационных механизмов: приток решеточных дислокаций в границу делает ее более дефектной, повышает ее энергию и способствует ЗГС; при действии зернограницной диффузии происходит «выглаживание» границы, что ведет к снижению критических напряжений для ЗГС. Кроме того, в поликристаллических материалах скольжению по каждой границе препятствуют соседние кристаллиты вплоть до достижения некоторого предельного напряжения сдвига, после чего реализуется «механическое выглаживание» границ при проскальзывании по ним. Все перечисленные факторы учитываются в соотношении для критических напряжений зернограницных сдвигов [3]. Для определения скоростей внутризеренных сдвигов используются упруговязкопластические соотношения (для скоростей сдвига – степенного типа с учетом термоактивируемого движения внутризеренных дислокаций). Закон упрочнения для описания эволюции

Секция 1. Основные принципы и методология физической мезомеханики материалов с иерархической структурой

критических напряжений внутризеренных сдвигов учитывает изменения, связанные с действием ВДС, ЗГС и температуры.

Наличие в материале равноосной мелкозернистой структуры с преобладающей долей высокоугловых границ является важным условием для реализации деформирования в режиме структурной СП. Во многих сплавах при испытаниях на растяжение в режиме СП даже при умеренных температурах наблюдается динамическая рекристаллизация, которая сопровождается ограниченным ростом среднего размера зерна и поддержанием необходимой равноосной формы зерен. Разработанная модификация модели содержит описание размеров, формы, взаиморасположения кристаллитов и границ, а также их изменения в процессе деформирования с учетом динамической рекристаллизации.

Разработан алгоритм реализации трехуровневой модели, на основе которого создан комплекс вычислительных программ. В качестве моделируемого объекта рассмотрены образцы из материалов класса промышленных алюминиевых сплавов, для многих из которых при оптимальных для СП условиях наблюдается стадийность кривых зависимости напряжения течения от деформации [4]. Проведено моделирование растяжения представительного макрообъема некоторых поликристаллических алюминиевых сплавов при различных температурно-скоростных условиях (рассматриваются умеренные температуры, не превосходящие 0.7 гомологической) и исходном состоянии внутренней структуры материала (форма и размер зерна). Проанализировано влияние варьирования исходных условий на реализацию различных механизмов и их вклад в общую деформацию, полученные результаты сопоставлены с данными экспериментальных исследований на образцах из рассматриваемых сплавов. Получена наблюдаемая в экспериментах стадийность кривых растяжения при оптимальных для данного материала условиях для режима структурной СП [4]: до некоторой степени деформации ВДС является основным механизмом и кривая характеризуется упрочняющимся участком, после чего происходит перегиб кривой и начинается вторая стадия, определяемая ниспадающим участком кривой и преобладающей ролью механизма ЗГС (ВДС становится аккомодационным механизмом). Исследование эволюции зеренной структуры в процессе деформирования показало важность учета динамической рекристаллизации.

Полученные результаты численных расчетов демонстрируют важность включения соотношений для описания ЗГС и динамической рекристаллизации, а также физически обоснованного описания законов упрочнения ЗГС и ВДС с учетом их взаимовлияния при моделировании неупругого деформирования материалов с выходом в режим структурной СП. Разработанная модификация модели позволяет описать наблюдаемые в экспериментах закономерности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (базовая часть государственного задания ПНИПУ, проект №9.7434.2017/8.9), Российского фонда фундаментальных исследований (проекты №17-01-00379-а, 17-41-590694-р_а).

Литература

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. № 15, 1. С. 33–56.
2. Трусов П.В., Швейкин А.И., Янц А.Ю. О разложении движения, независимых от выбора системы отсчета производных и определяющих соотношениях при больших градиентах перемещений: взгляд с позиций многоуровневого моделирования // Физическая мезомеханика. 2016. №19, 2. С. 47–65.
3. Trusov P.V., Sharifullina E.R., Shveykin A.I. Three-level modeling of fcc polycrystalline inelastic deformation: grain boundary sliding description // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2015. Vol.71. P. 012081.
4. Myshlyaev M.M., Shpeizman V.V., Kamalov M.M. On the multistage nature of deformation of the microcrystalline aluminum-lithium alloy 1420 under superplasticity conditions // Physics of the Solid State. 2001. Vol.43, №11. P. 2099–2104.