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: 10.17223/9785946217408/18

**МНОГОУРОВНЕВЫЙ ПОДХОД К ОПИСАНИЮ ПРОЦЕССОВ НАКОПЛЕНИЯ
ПОВРЕЖДЕННОСТИ В ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ**

Курмоярцева К.А., Трусов П.В.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

Определение срока безопасной эксплуатации деталей и конструкций является важным вопросом механики и материаловедения. Во многих отраслях промышленности выдвигаются строгие требования к механическим свойствам используемых материалов. Как в процессе изготовления, так и в процессе эксплуатации деталей происходит изменение свойств и эволюция внутренней структуры материала, включая образование и накопление несплошностей. Большинство современных задач разрушения материалов рассматриваются с позиций либо анализа распространения уже существующих трещин, либо эволюции осредненных мер поврежденности. Целью данного исследования является разработка математической многоуровневой модели, основанной на физической теории упруговязкопластичности и пригодной для анализа поведения поликристаллических материалов и описания процессов накопления микро- и мезоповреждений, зарождения трещин, их развития и перехода к разрушению. Данный подход позволяет явным образом описывать эволюционирующую внутреннюю структуру материала.

Деформирование и разрушение являются многоуровневыми и многостадийными процессами. На каждой стадии и масштабе активными являются свойственные соответствующим этапам ведущие механизмы. Необходимо физическое обоснование реализации тех или иных механизмов и разработка надежных методов и моделей для описания зарождения поврежденности и перехода к разрушению. В рамках данного исследования рассматривается разрушение поликристаллических материалов, тесно связанное с пластическим деформированием. Основным механизмом пластической деформации считается скольжение краевых дислокаций. Зарождение микротрещин является коллективным эффектом взаимодействия дислокаций с превращением запасенной энергии в поверхностную энергию. К таким механизмам относят широко известные дислокационные модели зарождения трещин Зинера, Стро, Коттрелла [1]. К основным физическим механизмам деформирования и накопления повреждений на разных масштабных уровнях можно отнести: движение и взаимодействие дислокаций друг с другом и другими дефектами решетки, образование микротрещин, увеличение их размеров, ветвление трещин, их взаимодействие и образование макроскопической трещины. Детальное описание этих механизмов подразумевает многоуровневый подход, учитывающий смену ведущего механизма и эволюцию внутренних параметров материала. Свойства поликристаллических материалов на макроуровне полностью определяются эволюционирующей мезо- и микроструктурой материала. Многоуровневая модель позволит описывать изменение во времени внутренней структуры материала и дефектов различной природы.

Для описания процессов накопления повреждений в металлах предполагается использовать многоуровневую математическую модель, основанную на физических теориях упруговязкопластичности. При этом деление на масштабные уровни производится с учетом необходимости описания различных физических процессов. Так, в структуре разрабатываемой модели выделены макроуровень, мезоуровень-I и мезоуровень-II.

На макроуровне решается краевая задача для представительного объема поликристаллического агрегата, записываются уравнения баланса для большой (не менее 400) совокупности зерен. Под разрушением подразумевается прорастание магистральной трещины и появление свободных поверхностей на уровне представительного макрообъема.

Деформирование отдельных кристаллитов (зерен, субзерен) рассматривается на мезоуровне-I. При этом учитываются повороты кристаллитов как жесткого целого и их деформирование. Также на этом уровне осуществляется описание подрастания микротрещин и их объединения. В качестве базового определяющего соотношения на данном уровне принят

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

гипоупругий закон с использованием несимметричной индифферентной меры скорости деформации [2], которую в общем случае можно разложить на упругую, пластическую и температурную составляющие. Пластическая составляющая определяется суммированием скоростей сдвигов по всем системам скольжения кристаллита. При этом эволюция субструктуры носителей пластической деформации – дислокаций, – рассматривается на мезоуровне-II.

Элементом мезоуровня-II является части зерен и субзерен, в рамках которых предполагается равномерное распределение плотностей дислокаций по каждой из систем скольжения. Основные соотношения мезоуровня-II включают кинетические уравнения, описывающие изменение плотностей дислокаций на системах скольжения, и соотношения дислокационной теории разрушения. Моделирование с использованием плотностей дислокаций позволяет исследовать поведение большого количества дислокаций и различных конкурирующих деформационных механизмов их взаимодействия. При этом можно напрямую отслеживать эволюцию плотностей дислокаций в зависимости от параметров воздействия и структуры материала. В рамках разрабатываемой модели, плотность дислокаций аддитивно раскладывается на положительную и отрицательные составляющие (в зависимости от расположения экстраплоскостей). Дислокации вне зависимости от знака могут быть заторможены препятствиями (барьерами дислокационной и недислокационной природы, границами зерен и т.д.), что учитывается в соотношении для критических напряжений. В общем случае изменение плотностей дислокаций происходит за счет таких механизмов, как аннигиляция, зарождение новых дислокаций и приток/отток из соседних элементов мезоуровня-II.

На данном этапе предполагается включить в модель дислокационный механизм зарождения трещин в результате слияния скопления дислокаций [3]. Подобным механизмом объясняется образование фасеток на поверхности разрушения титановых сплавов при усталостном разрушении. Фасетки образуются в зернах при транскристаллитном разрушении. При этом скопление дислокаций приводит к локальным перенапряжениям и, как следствие, образованию микротрещины [4]. Данный дислокационный механизм зарождения трещины предполагает скопления дислокаций в определенной системе скольжения и создание высоких локальных напряжений. При приложенном напряжении наиболее благоприятно ориентированные зерна, могут накапливать деформацию за счет дислокационного скольжения. Скольжение блокируется границей зерна таким образом, что образуется скопление. Нагромождение дислокаций вызывает напряжения, действующие на соседнее зерно, что может стать причиной зарождения трещины. Подобные механизмы предполагается включить на уровень рассмотрения кристаллита, что позволит отслеживать зарождение микротрещин.

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

Литература

1. Владимиров В.И. Физическая природа разрушения металлов. – М.: Металлургия, 1984. — 280 с.
2. Trusov P.V., Shveykin A.I. On motion decomposition and constitutive relations in geometrically nonlinear elastoviscoplasticity of crystallites // *Physical Mesomechanics*. – 2017. – Vol. 20, Is. 4. – Pp 377–391.
3. Stroh A. N. The formation of cracks as a result of plastic flow // *Proc. R. Soc. London Ser .* –1954. – A 223. Pp. 404–414.
4. Bache M. A review of dwell sensitive fatigue in titanium alloys: the role of microstructure, texture and operating conditions // *Int. J. Fatigue*. – 2003. – V. 25. – P. 1079–1087.