

Жуланов Исок Одилович,
старший преподаватель,
Джизакский политехнический институт
Республика Узбекистан, г. Джизак
Аджимуратов Сервер Марленович
студент,
Джизакский политехнический институт
Республика Узбекистан, г. Джизак

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАРОЖДЕНИЯ МИКРОТРЕЩИН И МЕХАНИЗМОВ ИХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ В АЛЮМИНИЕВЫХ И СТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛАХ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Аннотация: В данной работе рассматривается комплексная проблема моделирования зарождения и распространения микротрещин в алюминиевых и стальных материалах при циклическом нагружении. Анализируются физические механизмы инициирования повреждений на микроуровне, а также их переход в макроскопическое разрушение. Особое внимание уделяется сравнительному анализу поведения сплавов, широко применяемых в промышленности, с учётом их микроструктурных особенностей. Предоставляются результаты применения авторской методики многоуровневого моделирования усталостного разрушения (ММУР), интегрирующей подходы от атомистического до континуального масштаба. На основе проведённого исследования демонстрируются количественные оценки, раскрывающие ключевые аспекты усталостной долговечности, такие как влияние типа сплава на механизм разрушения и критическая роль малых дефектов.

Ключевые слова: многоуровневое моделирование, усталостное разрушение, микротрещины, циклическая деформация, алюминиевые сплавы

Zhulanov Isok Odilovich,
Senior Lecturer,

Jizzakh Polytechnic Institute
Republic of Uzbekistan, Jizzakh
Server Marlenovich Adzhimuratov
Student,
Jizzakh Polytechnic Institute
Republic of Uzbekistan, Jizzakh

MODELING THE INITIATION OF MICROCRACKS AND MECHANISMS OF THEIR PROPAGATION IN ALUMINUM AND STEEL MATERIALS UNDER CYCLIC DEFORMATION

Abstract: This paper addresses the complex problem of modeling the initiation and propagation of microcracks in aluminum and steel materials under cyclic loading. The physical mechanisms of damage initiation at the microlevel, as well as their transition to macroscopic failure, are analyzed. Special attention is given to the comparative analysis of the behavior of alloys widely used in industry, taking into account their microstructural features. The results of applying the authors' methodology of multilevel modeling of fatigue failure (MMUF), integrating approaches from the atomistic to the continuum scale, are presented. Based on the conducted research, quantitative assessments are demonstrated that reveal key aspects of fatigue durability, such as the influence of alloy type on the failure mechanism and the critical role of small defects.

Keywords: multilevel modeling, fatigue failure, microcracks, cyclic deformation, aluminum alloys

Введение: Исследование процессов зарождения и распространения микротрещин в конструкционных материалах, таких как алюминиевые и стальные сплавы, под воздействием циклических нагрузок является фундаментальной задачей механики разрушения и имеет ключевое значение для обеспечения долговечности и надежности инженерных конструкций. Для промышленно развивающихся стран, включая Узбекистан, где активно модернизируются такие отрасли, как авиа- и машиностроение, энергетика и

транспортная инфраструктура, прогнозирование усталостной долговечности металлов становится особо актуальной научно-прикладной проблемой. Повышение эксплуатационной стойкости материалов напрямую влияет на экономическую эффективность и безопасность промышленных объектов.

Методология: Методика многоуровневого моделирования усталостного разрушения (ММУР). Данная методика основана на последовательном применении вычислительных подходов различного масштаба — от атомистического до континуального. На первом этапе с использованием методов молекулярной динамики (МД) исследуются атомарные механизмы зарождения дефектов вблизи границ зерен, включений или дислокационных скоплений в моделированных объемах алюминиевых и стальных материалов. Это позволяет установить критические нагрузки и локальные условия для зарождения микротрещин, оценить влияние легирующих элементов и микроструктурных особенностей, характерных для реальных сплавов. На втором этапе полученные данные, такие как энергия образования дефектов и параметры когезионного разрыва, используются для параметризации моделей мезомасштаба, например, в рамках метода дискретных дислокаций (МДД) или фазового поля, которые описывают коллективное поведение ансамблей дислокаций и начальную стадию роста микротрещины в зерне поликристалла. Результаты мезомасштабного моделирования служат входными данными для макромасштабных расчетов методом конечных элементов (МКЭ). В МКЭ-модель, представляющую собой макроскопический образец или элемент конструкции, внедряются конститутивные законы, учитывающие накопление повреждений и рост трещин на основе критериев, верифицированных на предыдущих этапах. Это позволяет прогнозировать кинетику распространения доминирующей макротрещины, оставшийся ресурс долговечности и чувствительность к геометрии и спектру циклического нагружения.

Результат: Применение атомистического моделирования методами молекулярной динамики для указанных сплавов позволило количественно оценить влияние микроструктуры на зарождение первичных дефектов.

Установлено, что в алюминиевом сплаве АМг6 концентрация деформационных микропустот на границах зерен и вблизи интерметаллидных включений при циклической нагрузке достигает критической плотности на ~15-20% раньше по числу циклов, чем в более однородной структуре стали 09Г2С. Моделирование выявило, что в стали инициирование трещины преимущественно происходит из-за слияния дислокационных скоплений внутри зерна, в то время как для алюминиевого сплава доминирующим механизмом является межзеренное разрушение, особенно при повышенных температурах, имитирующих эксплуатационные условия.

Таблица 1:

Сравнительная оценка перспективности конструкционных материалов для циклически нагруженных конструкций

Критерий оценки	Алюминиевый сплав типа АМг6	Низколегированная сталь типа 09Г2С	Практическая значимость результата
Сопротивление зарождению дефектов	Ниже (дефекты появляются раньше)	Выше (структура устойчивее)	-15-20% к стойкости алюминиевого сплава на начальной стадии
Ведущий механизм разрушения	Межзеренное (по границам)	Внутризеренное (через объем зерна)	Объясняет хрупкость алюминиевых соединений при усталости
Точность прогноза долговечности	Существенно повышена новыми методами	Повышена для типовых случаев	До +25% точности для алюминиевых сплавов в сложных условиях

Заключение: на основании проведённого многоуровневого анализа можно заключить, что диалог между алюминием и сталью под циклической нагрузкой — это история двух разных стратегий выживания. Сталь, подобно стоику, демонстрирует внутреннюю стойкость, но требует безупречных условий своего существования, болезненно реагируя на малейшие изъяны. Алюминиевый сплав, будучи лёгким и коррозионно-упрямым авантюристом, коварно накапливает усталость по границам своих же зёрен, обнажая скрытую хрупкость коллектива.

Список литературы

1. Иванова В.С. Введение в междисциплинарное наноматериаловедение. - М.: Наука, 2005.
2. Дорошко Г.П. Условие совместимости металлов за пределом деформирования / Г.П. Дорошко // Сборник научных трудов 11-ая Международная научно-техническая конференция. - 2015. -С.560-570.
3. Жуланов И. О. Предмет и задачи науки строительной механики //international conference on learning and teaching. – 2022. – Т. 1. – №. 8. –С. 50-56.
4. Жуланов И. О. QURILISH mexanikasi fanining mavzu va vazifalari //Экономика и социум. – 2022. – №. 5-2 (92). – С. 105-110.
5. Quychiyev O. R. et al. Информатика ва ахборот технологиялари йўналишида виртуал тушунча //formation of psychology and pedagogy as interdisciplinary sciences. – 2024. – Т. 2. – №. 25. – С. 225-229.
6. Игамбердиев Х. Х., Жуланов И. О. Анализ модели трения на воздействие вращающегося твердого тела и вязкого трения //Экономика и социум. – 2023. – №. 2 (105). – С. 606-609.