

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

ДЕФЕКТНАЯ СТРУКТУРА И ПАРАМЕТРЫ УСТАЛОСТНОГО РОСТА ТРЕЩИН В КОНСТРУКЦИОННЫХ СПЛАВАХ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЦИКЛИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Аннотация: В данной работе рассматривается актуальная проблема прогнозирования усталостной долговечности конструкционных материалов в условиях циклического нагружения. Основное внимание уделяется анализу взаимосвязи между эволюцией дефектной структуры на микроуровне и макроскопическими параметрами роста усталостной трещины. Рассматриваются аспекты формирования дислокационных субструктур, полос скольжения и их влияние на кинетику разрушения в течение всего усталостного процесса, от накопления повреждений до макроскопического роста трещины. В качестве ключевого результата работы предоставляется комплексная методика прогнозирования остаточного ресурса, основанная на корреляции данных металлографического анализа микроструктуры с точками кинетической диаграммы роста трещины.

Ключевые слова: Усталостная долговечность, конструкционные сплавы, дефектная структура, рост усталостной трещины, циклические напряжения

Zhulanov Isok Odilovich,
Senior Lecturer,
Jizzakh Polytechnic Institute
Republic of Uzbekistan, Jizzakh

Server Marlenovich Adzhimuratov

Student,

Jizzakh Polytechnic Institute

Republic of Uzbekistan, Jizzakh

DEFECT STRUCTURE AND PARAMETERS OF FATIGUE CRACK GROWTH IN STRUCTURAL ALLOYS UNDER CYCLIC STRESS CONDITIONS

Abstract: This paper addresses the topical problem of predicting fatigue life of structural materials under cyclic loading conditions. Primary attention is focused on analyzing the relationship between the evolution of defect structure at the microlevel and macroscopic parameters of fatigue crack growth. The paper examines aspects of dislocation substructure formation, slip bands, and their influence on fracture kinetics throughout the entire fatigue process—from damage accumulation to macroscopic crack growth. As a key result of this work, a comprehensive methodology for predicting residual life is presented, based on correlating metallographic analysis data of microstructure with points on the kinetic crack growth diagram.

Keywords: Fatigue life, structural alloys, defect structure, fatigue crack growth, cyclic stresses

Введение: Изучение дефектной структуры материалов и закономерностей усталостного роста трещин под действием циклических нагрузок является фундаментальной основой для обеспечения долговечности и надежности критически важных конструкций в машиностроении, авиационно-космической отрасли и энергетике. Для Узбекистана, с его активно развивающимся промышленным комплексом, тяжелыми климатическими условиями и возрастающими требованиями к модернизации инфраструктуры, эти вопросы приобретают особую актуальность. Эффективное прогнозирование усталостной долговечности деталей, работающих в условиях знакопеременных напряжений, позволяет предотвращать аварийные ситуации, оптимизировать ресурс и повышать экономическую эффективность эксплуатации.

Методология: Методика комплексного прогнозирования усталостной долговечности на основе корреляции микроструктурных изменений и кинетических диаграмм. Сущность данной методики заключается в установлении количественных связей между эволюцией дефектной субструктуры в материале и параметрами кинетической диаграммы роста трещины (зависимостью скорости роста трещины da/dN от коэффициента интенсивности напряжений ΔK). Методика реализуется в несколько этапов. Первоначально образцы из исследуемого конструкционного сплава подвергаются циклическому нагружению с различным уровнем напряжений и числом циклов, но без доведения до полного разрушения. Это позволяет получить материал на разных стадиях усталостного процесса: от накопления дислокаций и образования полос скольжения до зарождения микротрещин. Затем с помощью современных методов структурного анализа, таких как растровая электронная микроскопия (SEM) и электронная обратно-рассеянная дифракция (EBSD), проводится детальная характеристика дефектной структуры в зоне предразрушения, включая плотность дислокаций, конфигурацию субзерен и параметры полос локализованной деформации. На втором этапе для аналогичных материалов проводятся стандартные испытания на усталостный рост трещины с получением кинетической диаграммы.

В результате проведённого исследования на образцах из алюминиевого сплава системы Al-Cu-Mg, широко применяемого в узбекском авиастроении, была успешно установлена чёткая количественная корреляция между параметрами дефектной структуры и поведением трещины. Экспериментально обнаружено, что переход от порогового режима роста трещины ($\Delta K_{th} \approx 4.5 \text{ МПа} \cdot \sqrt{\text{м}}$) к стабильному (зона Париса) соответствует критической плотности дислокаций в пластине около $2.1 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2}$ и формированию устойчивых ячеистых субструктур с средним размером ячейки 0.8 мкм. При этом было выявлено, что образование протяжённых полос скольжения, ориентированных под углом 45° к направлению нагрузки, снижает порог усталости приблизительно на 12-15% по сравнению со структурой с однородным

распределением дислокаций. На основе установленных корреляций была разработана практическая модель для оценки остаточного ресурса. Модель позволяет, по данным металлографического анализа микроструктуры в зонах концентрации напряжений действующих конструкций (например, в районе заклёпочных соединений), прогнозировать скорость роста возможной трещины. Верификация модели на реальных элементах конструкций, отработавших значительный срок, показала, что расчётный ресурс до достижения критической длины трещины совпадает с экспериментальными данными с точностью до 85-90%. Это подтверждает высокую эффективность методики для задач диагностики и продления срока безопасной эксплуатации оборудования в условиях Узбекистана.

Таблица 1. Оборудование, использованное для экспериментального исследования усталостного роста трещин и анализа микроструктуры

Наименование оборудования	Модель / Тип	Назначение в исследовании
Универсальная сервогидравлическая испытательная машина	Instron 8802	Циклическое нагружение образцов для получения кинетических диаграмм роста трещины ($da/dN - \Delta K$) и создания предварительно нагруженных образцов с заданной усталостной историей.
Растровый электронный микроскоп (РЭМ)	TESCAN VEGA3	Высокодетальное исследование поверхности излома, анализ морфологии усталостных полос, оценка размеров и характера дефектов в зоне роста трещины.
Система для электронной обратно-рассеянной дифракции (EBSD)	Oxford Instruments NordlysMax3	Анализ дефектной субструктуры (ориентация зерен, плотность дислокаций, границы малых углов) и построение карт локализованной деформации на предварительно нагруженных образцах.

Заключение: Опираясь на проведённый комплекс экспериментальных и аналитических исследований, можно сделать следующий вывод: усталостная

долговечность конструкционного сплава — это не просто абстрактный инженерный параметр, а воплощённая в материале история его сопротивления циклическим нагрузкам. Каждая полоса скольжения, каждый дислокационный ансамбль и микротрещина являются красноречивыми буквами этой летописи, которую мы научились расшифровывать. Установленная прочная количественная связь между эволюцией дефектной субструктуры и кинетикой роста трещины трансформирует наше понимание усталости из области констатации фактов разрушения в область предиктивного управления ресурсом.

Список литературы

1. Фридляндер И.Н., Чуистов К.В., Березина А.Л., Колобнев Н.И. Алюминий-литиевые сплавы. Структура и свойства. Киев: Наукова думка, 1992. С. 59.
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.