

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕТИКИ КОРОТКИХ И МАЛЫХ УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН В ВАКУУМНОЙ КАМЕРЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СКАНИРУЮЩЕГО ЭЛЕКТРОННОГО МИКРОСКОПА

Азаров Н.А.

*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет), Москва*

Ключевые слова: усталость, короткая трещина, малая трещина, in-situ сканирующая электронная микроскопия, циклическое нагружение, вакуум, кулачковый механизм.

Аннотация. Предложена концепция экспериментальной установки для исследования зарождения и роста коротких и малых усталостных трещин при циклическом нагружении миниатюрных образцов непосредственно в вакуумной камере сканирующего электронного микроскопа. Нагружение реализуется электродвигателем через кулачковый механизм, обеспечивающий заданную амплитуду и частоту циклов. Прямое наблюдение зоны вершины трещины в сканирующем электронном микроскопе позволяет регистрировать момент зарождения дефекта, измерять эволюцию длины трещины и связывать параметры кинетики с микроструктурными механизмами разрушения. Рассмотрены ключевые технические проблемы реализации установки: подвод электроэнергии в вакуум, износ узлов контактного нагружателя и обеспечение достоверной регистрации трещины в условиях вибраций и дрейфа изображения.

EXPERIMENTAL METHOD FOR STUDYING THE KINETICS OF SHORT AND SMALL FATIGUE CRACKS IN A VACUUM CHAMBER USING A SCANNING ELECTRON MICROSCOPE

Azarov N.A.

Bauman Moscow State Technical University (National Research University), Moscow

Keywords: fatigue, short crack, small crack, in-situ scanning electron microscopy, cyclic loading, vacuum, cam mechanism.

Abstract. A concept of an experimental setup is proposed for investigating the initiation and growth of short and small fatigue cracks under cyclic loading of miniature specimens directly inside the vacuum chamber of a scanning electron microscope. Loading is applied by an electric motor through a cam mechanism that provides a specified load amplitude and cycle frequency. Direct scanning electron microscope observation of the crack-tip region makes it possible to capture the moment of defect initiation, measure the evolution of crack length, and correlate kinetic parameters with microstructural fracture mechanisms. The key technical challenges of implementing the setup are considered, including electrical power feedthrough into vacuum, wear of contact loading components, and reliable crack registration under image vibrations and drift.

Проблема усталостного разрушения является одной из ключевых в механике материалов и надежности конструкций. Наиболее опасными и трудно прогнозируемыми являются короткие и малые усталостные трещины, возникающие на начальных стадиях разрушения. Их кинетика может существенно отличаться от закономерностей развития длинных трещин, описываемых классическими моделями механики разрушения и эмпирическими зависимостями типа закона Пэриса [1].

Традиционные подходы к оценке усталостной долговечности опираются на кривые «напряжение – число циклов» и параметры линейно-упругой механики разрушения. Однако для коротких трещин характерны выраженная роль микроструктуры, эффекты закрытия трещины, неоднородность напряженно-деформированного состояния и сильная чувствительность к локальным концентраторам, что приводит к расхождениям между расчетной и реальной долговечностью [2, 3]. В этих условиях востребованы экспериментальные методики прямого наблюдения процесса зарождения и роста трещины.

Наибольшую информативность обеспечивают методы электронной микроскопии, позволяющие с высокой пространственной разрешающей способностью фиксировать рост трещины на микроуровне. Создание специализированной установки с управляемым циклическим нагружением образца непосредственно в камере сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) обеспечивает возможность наблюдения процесса в реальном масштабе времени и получения данных для верификации моделей кинетики коротких трещин.

Схематично предлагаемая компоновка установки приведена на рисунке 1. Электродвигатель обеспечивает вращение вала, которое преобразуется кулачковым механизмом в периодическое перемещение нагружающего элемента, воздействующего на образец. СЭМ осуществляет визуализацию исследуемой зоны и регистрацию последовательности изображений вершины трещины. Вся механическая часть размещается в вакуумном объеме, совместимом с рабочей камерой микроскопа.

Для количественной оценки кинетики роста трещины предполагается измерение ее длины a по серии СЭМ-изображений при известных значениях числа циклов N . Скорость роста определяется как

$$\frac{da}{dN} = \frac{a_2 - a_1}{N_2 - N_1} \quad (1)$$

где $\frac{da}{dN}$ – скорость роста трещины на цикл, N_1 и N_2 – значения числа циклов в двух точках измерения, a_1 и a_2 – длина трещины в момент N_1 и N_2 .

При необходимости сопоставления с параметрами механики разрушения может использоваться оценка диапазона коэффициента интенсивности напряжений

$$\Delta K = Y \Delta \sigma \sqrt{\pi a}, \quad (2)$$

где ΔK – диапазон коэффициента интенсивности напряжений, $\Delta \sigma$ – диапазон номинальных напряжений, a – длина трещины, Y – безразмерный коэффициент геометрии, определяемый формой образца и трещины [4].

Полученные зависимости $a(N)$ и $\frac{da}{dN}(\Delta K)$ позволяют сопоставлять поведение коротких трещин с данными для длинных трещин и выявлять влияние микроструктуры и условий нагружения.

Схема установки для in-situ испытаний представлена на рисунке 1.

Вакуум

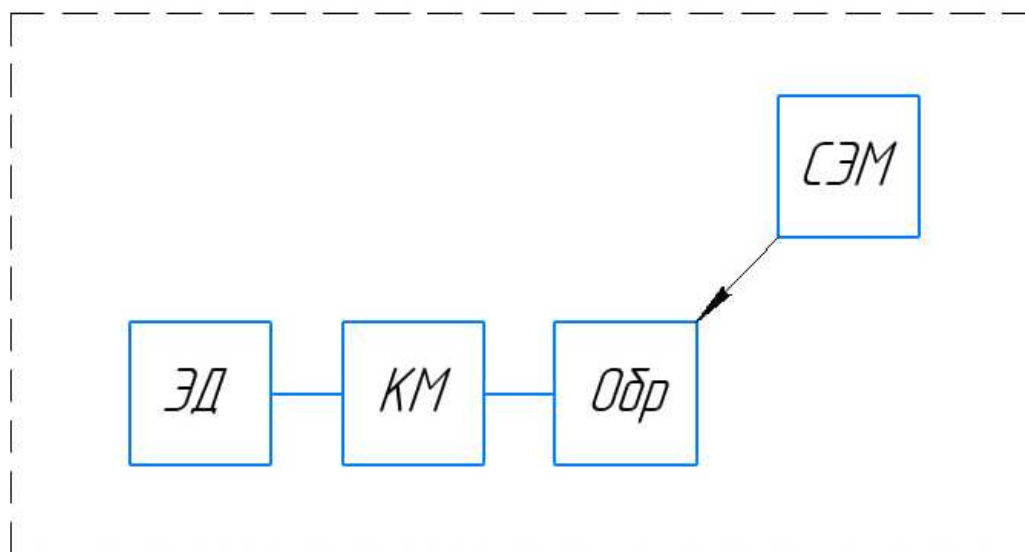


Рис. 1. Блок-схема компоновки: ЭД – электродвигатель, КМ – кулачковый механизм, Обр – образец, СЭМ – сканирующий электронный микроскоп

Реализация установки в условиях вакуума и ограниченного объема камеры СЭМ предъявляет требования к совместимости материалов, минимизации газовыделения и вибраций, а также к обеспечению воспроизводимого циклического нагружения.

1) Подвод электроэнергии к электродвигателю внутрь вакуумной камеры. Практически реализуемыми являются два подхода: (а) размещение электродвигателя вне вакуума с передачей вращения через вакуумный вращательный ввод; (б) размещение компактного двигателя в вакууме с подводом питания через герметичный электрический ввод. В обоих случаях требуется обеспечение электромагнитной совместимости с электроникой микроскопа и стабильности частоты циклов.

2) Износ кулачкового механизма и элементов контактного нагружателя при циклическом контакте с образцом. В вакууме отсутствует эффект смазки влагой и кислородом, что повышает склонность к задирам и схватыванию. Для повышения ресурса узлов целесообразны: применение высокотвердых пар трения (инструментальные стали, карбиды, керамика), использование покрытий (например, DLC) и твердосмазочных материалов (например, MoS₂), а также минимизация боковых нагрузок за счет кинематически правильной схемы передачи усилия.

3) Регистрация появления и изменения малых и коротких усталостных трещин в СЭМ. Критичны дрейф изображения, вибрации от привода, зарядовая нестабильность (для неметаллических включений) и ограничение времени наблюдения из-за нагрева и электронного облучения. Для повышения достоверности измерений требуются: жесткое крепление стенда, развязка по вибрации, синхронизация съемки с фазой нагружения и применение автоматизированной обработки изображений для измерения $a(N)$.

Табл. 1. Проблемы реализации и возможные технические решения

Проблемный узел	Возможный подход	Контролируемый параметр
Электроподвод в вакуум	Герметичный электрический ввод или вынос двигателя за пределы вакуума с вращательным вводом	Стабильность частоты, уровень помех
Кулачковый механизм	Высокотвердые материалы, покрытия и твердосмазочные пары трения; оптимизация кинематики	Износ, люфт, амплитуда перемещения
Наблюдение малой или короткой усталостной трещины	Виброразвязка, синхронизация съемки, автоматическая обработка изображений	Погрешность измерения длины трещины a , повторяемость

Предложена концепция экспериментальной установки, обеспечивающей циклическое нагружение образцов и прямое наблюдение зарождения и роста коротких усталостных трещин в вакуумной камере СЭМ. Реализация подхода позволяет формировать зависимости $a(N)$ и $\frac{da}{dN}(\Delta K)$, а также связывать кинетику трещин с микроструктурными механизмами разрушения. Определены ключевые технические риски: подвод электроэнергии в вакуум, износ контактных узлов кулачкового механизма и обеспечение достоверной регистрации трещины. Решение указанных задач создаст основу для разработки экспериментально обоснованных моделей ресурса ответственных деталей.

Список литературы

1. Suresh S. Fatigue of Materials. – 2nd ed. – Cambridge: Cambridge University Press, 1998.
2. Ritchie R.O. Mechanisms of fatigue-crack propagation in ductile and brittle solids // International Journal of Fracture. 1999, vol. 100, pp. 55-83.
3. Newman J.C., Phillips E.P., Swain M.H. Fatigue-life prediction methodology using small-crack theory // International Journal of Fatigue. 1999, vol. 21, pp. 109-119.
4. ASTM E647. Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates. – ASTM International, 2023.

Сведения об авторе:

Азаров Николай Александрович – аспирант.