

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОДВИЖЕНИЯ ФРОНТА ТРЕЩИНЫ ПРИ СВЕРХМНОГОЦИКЛОВОМ РЕЖИМЕ НАГРУЖЕНИЯ**

Бураго Н.Г.<sup>1</sup>, Никитин А.Д.<sup>2</sup>, Никитин И.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт Проблем Механики РАН, 101, пр-т Вернадского, Москва

<sup>2</sup> Институт Автоматизации Проектирования РАН, 19/18, 2<sup>ая</sup> Брестская, Москва

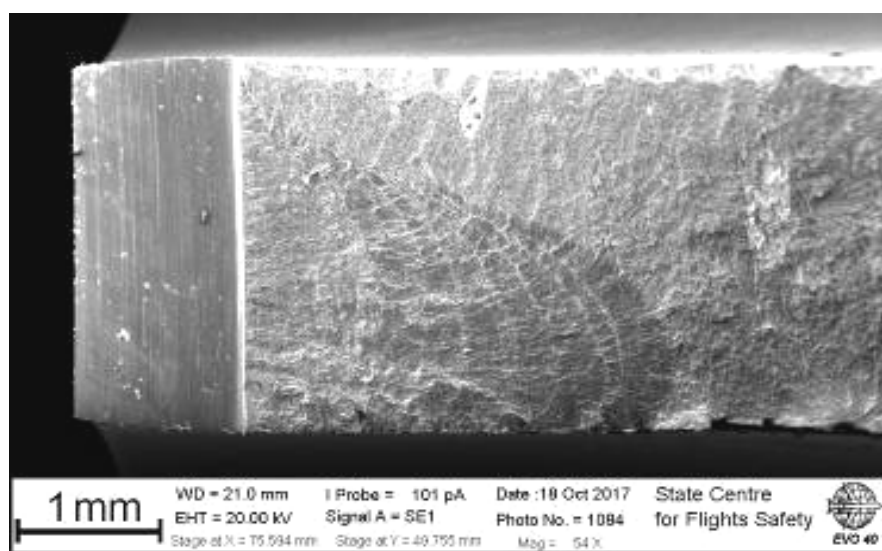
Исследование закономерностей роста усталостных трещин, как правило, проводится при помощи образцов с центральным или краевым надрезом. При этом наблюдение за положением фронта усталостной трещины наиболее часто производится оптическим методом. То есть наблюдаемая скорость трещины оценивается по приращению длины трещины по поверхности образца. Предполагается, что такая оценка правомерна в том случае, когда фронт трещины прямой. В этом случае продвижение трещины по «лицевой» и «тыльной» стороне образца одинаково, а фронт трещины представляет собой прямую линию, соединяющие вершины трещин, наблюдаемых на этих сторонах. В действительности, такая идеальная картина не может быть реализована в силу целого ряда причин, таких как наличие микроструктурных особенностей в материале, несовершенство изготовления образцов, неоднородность поля напряжений и так далее. В настоящей работе проводится оценка правомерности использования данных эксперимента с квазипрямым фронтом усталостной трещины, для оценки эволюции произвольного фронта трещины при СВМУ нагружении. Экспериментальное исследование проводилось с использованием пьезоэлектрической усталостной испытательной установки [1] при частоте нагружения 20 кГц. Положение фронта трещины фиксировалось при помощи оптической системы, а затем верифицировалось по данным фрактографического исследования поверхности излома.

На Рис. 1,2 представлены поверхности излома образцов на рост трещин из титанового сплава ВТ3-1. Результаты получены при высокочастотном режиме нагружения (20 кГц). На Рис.1 представлен излом с квазипрямым фронтом трещины. По положению макролиний хорошо видно, что на каждом из этапов фронт положения вершины трещины по лицевой и тыльной стороне образца практически одинаков.



*Рис. 1. Внешний вид излома усталостной трещины с квазипрямым фронтом*

На Рис. 2 отчетливо видно, что трещина была зарождена ближе к одной из сторон образца и в дальнейшем развивалась не симметрично. Приращения длины трещины по различным направлениям во внутренних объемах материала не одинаковы.



*Рис. 2. Внешний вид излома усталостной трещины с произвольным фронтом.*

Отчетливые макролинии при этом также соответствуют моментам остановки испытаний. Для каждого из образцов была построена кинетическая кривая роста трещины.

На основании результатов фрактографического исследования поверхности излома образца с несимметричным фронтом трещины, Рис. 2, были построены кривые, описывающие положения этого фронта. Затем был проведен расчет напряженно-деформированного состояния образца с заданным положением фронта трещины методом конечных элементов. В результате проведенного анализа были получены

значения коэффициента интенсивности напряжений для трещины нормального отрыва вдоль криволинейного фронта трещины. Затем, предполагая, что скорость роста трещины остается постоянной в пределах одного этапа нагружения (в пределах погрешности коэффициент интенсивности напряжений (КИН) считается постоянным на всем этапе нагружения) были получены оценки приращения трещины. При этом криволинейный фронт был разбит на малые элементы, в пределах которого КИН также считается постоянным, а приращение трещины задается по нормали к выбранному участку в плоскости трещины. Величина скорости роста трещины при заданном значении КИН определялась из экспериментальных данных, полученных при высокочастотном нагружении титанового сплава ВТЗ-1 для образца с квазипрямым фронтом, Рис. 1. В результате данного численного эксперимента были получены расчетные положения фронта трещины и сравнены с экспериментально наблюдаемыми. Численный эксперимент был проведен на различных этапах развития трещины. В случае, когда по некоторым из направлений наблюдалось несоответствие экспериментальных и расчетных данных, в выявленных областях был проведен дополнительный фрактографический анализ с целью установления причин расхождения.

В результате исследования были построены численные модели трещин с произвольным положением фронта, определены значения КИН вдоль фронта на различных этапах роста трещины, проведено численное моделирование приращение длины трещины. Проведен анализ применимости результатов исследования кинетики роста трещины, полученных на образцах с прямой линии фронта, для оценки эволюции трещины с произвольным фронтом. Обнаружены расхождения численных и экспериментальных результатов. Предложено объяснение данных расхождений на основании фрактографического анализа поверхности излома.

## **Список литературы**

1. Bathias C., Paris P.C. Gigacycle fatigue in mechanical practice. New York. Dekker. 2004. 328 p.