

УДК 620.178.6

МОДЕЛЬ РАЗВИТИЯ УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ С УЧЕТОМ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЕЕ БЕРЕГОВ

© 2011 г.

В.М. Тихомиров

Сибирский госуниверситет путей сообщения, Новосибирск

twm@stu.ru

Поступила в редакцию 15.06.2011

Предложена модель, описывающая динамику напряженно-деформированного состояния малой области в окрестности вершины трещины в процессе знакопеременного цикла нагружения. В соответствии с этим модифицирована известная зависимость скорости роста усталостного дефекта от параметров циклической нагрузки (формула Пэриса), где введено понятие суммарного коэффициента интенсивности напряжений (КИН), обусловленного как растяжением, так и сжатием. Получены зависимости КИН при сжатии от длины трещины и остаточного раскрытия трещины, формирующегося на полуцикле сжатия. Проведено сравнение экспериментальных данных о скорости роста усталостной трещины, полученных при испытании образцов знакопеременной нагрузкой, с результатами расчета по соотношениям предлагаемой модели.

Ключевые слова: развитие усталостной трещины, контакт берегов, начальное раскрытие трещины, коэффициент интенсивности напряжений при сжатии.

Процесс усталостного разрушения металлов разделяют на два основных этапа. Первый – период накопления рассеянных микродефектов и зарождения макротрещины, второй – рост сформированной трещины, размер которой велик по сравнению с размером зерна. На первом этапе трещина развивается с постоянным контактом берегов. При этом вся зона в окрестности трещины находится в состоянии пластического деформирования. На втором этапе взаимодействием берегов пренебрегают, моделируя рост усталостного дефекта как трещину нормального отрыва без учета структуры металла. Считается, что при разгрузке берега трещины полностью смыкаются и, таким образом, полуцикл сжатия не влияет на продвижение трещины. Однако, из анализа экспериментальных данных [1] следует, что скорость роста трещин существенно зависит от величины сжимающей нагрузки. Отмечено также зарождение и развитие усталостных дефектов непосредственно в поле циклического сжатия [2].

Для анализа напряжений и деформаций в окрестности вершины трещины была использована модель плоского напряженного состояния с идеальной пластичностью материала и без учета поперечных связей в зоне пластического течения (стержневая модель). На рис. 1 приведено сравнение диаграмм, полученных на протяжении одного пульсирующего ($OABCA$) и симметричного ($OABDEA$) циклах внешней нагрузки. Здесь: ϵ , σ – деформация и напряжение в вершине трещи-

ны; E , σ_y – модуль упругости и предел текучести материала. Сплошной линией показана фаза нагружения, пунктирной – разгрузки.

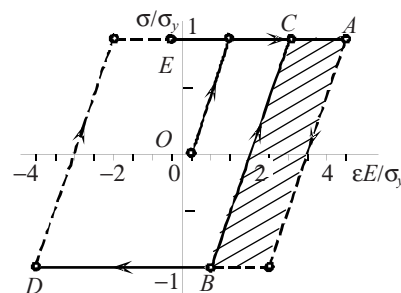


Рис. 1

При заданных параметрах модели было получено, что амплитуда пластической деформации при пульсирующем цикле нагружения (ширина заштрихованной области) в четыре раза меньше, чем при симметричном. Так как скорость роста трещины непосредственно зависит от пластической деформации за один цикл нагружения, то для ее описания при знакопеременном цикле можно использовать зависимость, подобную формуле Пэриса. Для этого введем понятие коэффициента интенсивности напряжений (КИН) при сжатии, величина которого опосредованно связана с усталостными повреждениями, накопленными на полуцикле сжатия. В соответствии с этим будем иметь

$$\frac{dl}{dN} = A(K_t + K_c)^n, \quad (1)$$

здесь l – длина трещины; N – число циклов нагружения; K_t , K_c – значения КИН при максимальном растяжении и сжатии, соответственно.

Значение K_t определяется известными методами механики разрушения с учетом характера нагружения и геометрии рассматриваемого элемента конструкции.

При расчете величины K_c будем учитывать возможное контактное взаимодействие берегов трещины. Предположим, что в ненагруженном состоянии трещина имеет некоторое малое начальное раскрытие Δ . Тогда величину КИН при сжатии можно определить, используя асимптотические выражения для перемещений поверхности разреза:

– для краевой трещины длиной l получим

$$K_c = \frac{\Delta E}{4} \sqrt{\frac{\pi}{2l}}; \quad (2)$$

– для внутренней трещины длиной $2l$

$$K_c = \frac{\Delta E}{3} \sqrt{\frac{\pi}{2l}}. \quad (3)$$

Необходимо отметить, что при знакопостоянном цикле нагружения наблюдается эффект «закрывания» трещины [3], основной причиной которого является наличие остаточных пластических деформаций в окрестности берегов растущей трещины. Анализ остаточных деформаций в рамках принятой модели показывает, что при знакопеременном цикле возможно проявление аналогичного эффекта остаточного «раскрытия» трещины. Можно предположить, что значение Δ постоянно на всем протяжении жизни магистральной усталостной трещины, а при больших нагрузках сжатия зависит только от величины сжимающей нагрузки. При однородном внешнем нагружении примем, что

$$\Delta = a(\sigma_{\min})^2, \quad (4)$$

где a – постоянный коэффициент, который связан со структурой материала.

Для проверки предложенной модели роста усталостных трещин был проведен анализ экспериментальных данных [1], полученных при знакопеременном циклическом нагружении образцов из рельсовой стали марки М76.

На рис. 2 показано сравнение данных экспе-

римента (точки на графиках) и результатов расчета на основании соотношений (1)–(4). Здесь кривая 1 соответствует режиму нагружения с коэффициентом асимметрии $r = -2$, кривая 2 – $r = -3$. На рис. 3 представлены зависимости K_c (кривая 2), K_t (кривая 1) и их суммы (кривая 3) от длины трещины. Суммарное значение КИН $K_t + K_c$, больше значений K_t на протяжении всего периода развития усталостной трещины. Это свидетельствует о необходимости учета фазы сжатия при знакопеременном цикле нагружения и об адекватности предположений, принятых при моделировании развития усталостной трещин.

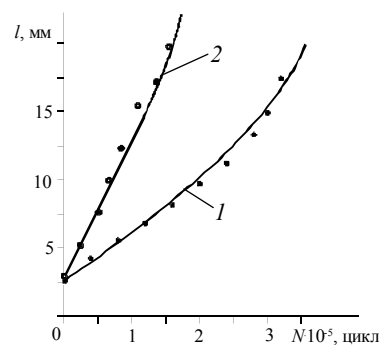


Рис. 2

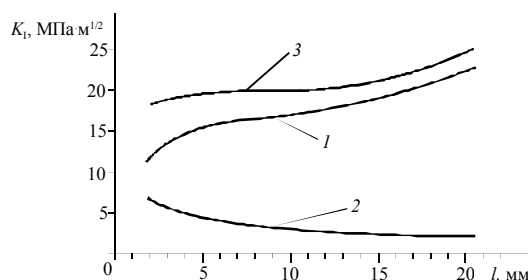


Рис. 3

Список литературы

1. Крысанов Л.Г., Тырин В.П., Шабанов А.П. Влияние сжимающих напряжений на развитие усталостных трещин в рельсах // Повышение надежности верхнего строения пути в современных условиях эксплуатации: Сб. науч. тр. М.: Интекст, 2000. С. 55–59.
2. Тихомиров В.М., Суровин П.Г. Развитие усталостных трещин смешанного типа в образцах из стали // ПМТФ. 2004. Т. 45, №1. С. 135–142.
3. Elber W. Fatigue crack closure under cyclic tension // Engineering Fracture Mechanics. 1970. No 2. P. 37–45.

**A MODEL OF FATIGUE CRACK GROWTH ACCOUNTING FOR THE CONTACT INTERACTION
OF ITS FACES***V.M. Tikhomirov*

A model is proposed which allows one to describe the stressed-strained state of a small volume at the tip of a growing crack under alternating loading. Relations between the growth rate of a fatigue defect and loading parameters and the expression for the stress intensity factor are derived for compression of a cracked solid taking into account the possible contact of the crack faces the conditions of residual opening of a growing fatigue crack. The experimental data obtained in tests of steel samples are compared with the results of calculation using the developed procedure.

Keywords: fatigue crack growth, contact of the faces, initial crack opening, stress intensity factor for compression.