

Определение порогового коэффициента интенсивности напряжений акустико-эмиссионным методом

Приведены результаты исследований связи скорости роста усталостной трещины с параметрами акустической эмиссии. Предложена аналитическая модель связи скорости роста усталостной трещины с суммарным счетом акустической эмиссии за цикл. На основе сформулированной модели и полученных экспериментальных результатов разработан метод определения пороговых значений размаха коэффициента интенсивности напряжений.

В современных конструкционных материалах при снижении коэффициента интенсивности напряжений ниже некоторого значения K_{th} рост усталостной трещины прекращается. Величина K_{th} , получившая название порогового коэффициента интенсивности напряжений, является важной характеристикой трещиностойкости, определение которой, однако, связано с проведением весьма длительных испытаний [1, 2], в течение нескольких десятков миллионов циклов. Вместе с тем известно, что при малых скоростях роста трещины далеко не каждый цикл регулярной нагрузки вызывает ее продвижение: имеется много свидетельств скачкообразного роста трещины, причем чем ниже нагрузка, тем более редки акты продвижения. С этим обстоятельством связаны понятия макроскопической и микроскопической скорости роста усталостной трещины.

Под макроскопической скоростью понимают отношение видимого прироста длины Δl трещины к суммарному числу циклов Δn , в течение которого этот рост имел место:

$$v = \frac{\Delta l}{\Delta n}. \quad (1)$$

Микроскопическая скорость роста трещины v_i — это величина продвижения трещины в конкретном цикле i .

Очевидно, что если процесс продвижения происходит достаточно интенсивно, то трещина подрастает в каждом цикле и тогда макроскопическая скорость будет совпадать со средней микроскопической:

$$v = \bar{v} = \frac{1}{\Delta n} \sum_{i=1}^{\Delta n} v_i. \quad (2)$$

В случае же прироста трещины только в Δn_1 цикле из общего числа Δn циклов между макроскопической и средней микроскопической скоростями существует различие, а именно

$$v = \frac{\Delta n_1}{\Delta n} \bar{v}. \quad (3)$$

Пусть v_0 — значение макроскопической скорости роста усталостной трещины, соответствующее пороговому коэффициенту интенсивности напряжений. Традиционная методика испытаний предусматривает [1, 3] ступенчатые испытания со снижением или повышением коэффициента интенсивности напряжений и вычислением на каждой ступени макроскопической скорости до тех пор, пока она не станет равной v_0 .

Если учесть, что значение v_0 имеет порядок 10^{-7} мм/цикл, то для получения надежно фиксируемых приростов трещины около миллиметра или даже его десятых долей продолжительность испытаний должна составлять примерно 10^7 цикл.

Представим, что при испытаниях можно фиксировать продвижение трещины в каждом цикле нагружения. Это позволит резко сократить число циклов нагружения на каждой ступени. Действительно, в рассматриваемой ситуации отпадает необходимость вырачивать трещину до указанной выше длины. Достаточно зафиксировать ее скачки в нескольких десятках или сотнях (в зависимости от статистических свойств микроскопической скорости) значимых циклов, вычислить среднюю микроскопическую скорость \bar{v} , а по формуле (3) — макроскопическую скорость v на данной ступени и, в зависимости от близости ее к v_0 , принять решение о переходе на следующую ступень или о прекращении испытаний, если $v = v_0$. Легко видеть, что такой подход позволяет намного сократить длительность испытаний.

Как отмечено ранее [4], метод акустической эмиссии (АЭ) принципиально дает возможность определить продвижение трещины в каждом отдельном взятом цикле и указать число значимых циклов Δn_1 из общего числа Δn .

В цитируемой работе на основании специальных экспериментов по скоростной фиксации сигналов АЭ в каждом цикле роста усталостной трещины было показано, что зависимость между счетом АЭ в цикле и соответствующим фактическим продвижением трещины инвариантна по отношению к макроскопической скорости роста трещины. Установлено также, что определяемая таким образом микроскорость роста трещины удовлетворительно согласуется с законом Париса.

Ниже изложены результаты использования указанного свойства метода АЭ для определения порогового значения коэффициента интенсивности напряжений.

Основное предположение при решении поставленной задачи с помощью метода АЭ заключается в том, что суммарный счет АЭ в одном цикле $N_{ц}$ однозначно связан с той частью освобождающейся при продвижении трещины в этом цикле потенциальной энергии U , которая превращается в кинетическую энергию A_k движения среды, вызывающего реакцию преобразователя сигналов АЭ. Наличие же связи между кинетической энергией, излучаемой при продвижении трещины, и скоростью роста трещины можно установить на основе следующего анализа.

Пусть поверхность трещины получила в некотором цикле нагружения прирост δS . Этот прирост приводит к освобождению потенциальной энергии

$$\delta U = \frac{1 - \mu^2}{E} K^2 \delta S, \quad (4)$$

где E и μ — упругие постоянные материала; K — коэффициент интенсивности напряжений (для определенности полагаем, что трещина развивается по механизму нормального разрыва).

Освободившаяся энергия частично идет на пластическое деформирование материала, связанное с продвижением пластической зоны. Эта доля энергии пропорциональна объему пластически деформированных слоев, непосредственно примыкающих к вновь образовавшейся поверхности:

$$\delta A_p = \bar{\sigma}_i \bar{\varepsilon}_i \cdot 2h \delta S, \quad (5)$$

где $\bar{\sigma}_i$ и $\bar{\varepsilon}_i$ — средние интенсивности напряжений и деформаций в указанных слоях; $2h$ — толщина слоев.

Если принять степенную зависимость диаграммы растяжения вида $\sigma_i = \sigma_0 \left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_0} \right)^m$, где m — показатель упрочнения, σ_0 — предел текучести, а $\varepsilon_0 = \frac{\sigma_0}{E}$, то распределение интенсивности деформаций в пластической зоне в зависимости от расстояния от вершины трещины r можно приближенно аппроксимировать выражением [5]

$$\varepsilon_{i(r)} = \varepsilon_0 \left(\frac{r_p}{r} \right)^{\frac{1}{1+m}}, \quad (6)$$

где r_p — размер пластической зоны, везде далее он соответствует циклическому нагружению; σ_0 и m — параметры обобщенной диаграммы деформирования после ее стабилизации в процессе циклического деформирования.

В результате средние значения интенсивности напряжений и деформаций в пластической зоне будут

$$\bar{\sigma}_i = \frac{1}{r_p} \int_0^{r_p} \sigma_i(r) dr = (1+m) \sigma_0; \quad (7)$$

$$\bar{\varepsilon}_i = \frac{1}{r_p} \int_0^{r_p} \varepsilon_i(r) dr = \frac{1+m}{m} \varepsilon_0. \quad (8)$$

Поскольку $h \sim r_p$, то, используя (5), (7), (8), для пластины толщиной t получаем:

$$\delta A_p = \beta \frac{(1+m)^2}{m} \frac{\sigma_0^2}{E} r_p t \delta l,$$

где β — константа.

Для приближенной оценки в соответствии с [5] примем

$$r_p = \frac{K^2}{2\pi(1+m)\sigma_0^2}. \quad (9)$$

Тогда

$$\delta A_p = \frac{\beta}{2\pi E} \frac{1+m}{m} t K^2 \delta l. \quad (10)$$

Если (4) и (10) ввести в уравнение сохранения энергии

$$\delta U = \delta A_k + \delta A_p$$

с последующим переходом к непрерывным функциям от количества циклов n , то можно получить выражение для кинетической энергии за цикл:

$$\frac{dA_k}{dn} = \beta_0 t K^2 v, \quad (11)$$

где

$$v = \frac{dl}{dn}; \quad \beta_0 = \frac{2\pi m(1-\mu^2) - \beta(1+m)}{2\pi m E}.$$

Приняв степенную зависимость

$$N_{ц} \sim \left(\frac{dA_k}{dn} \right)^C, \quad (12)$$

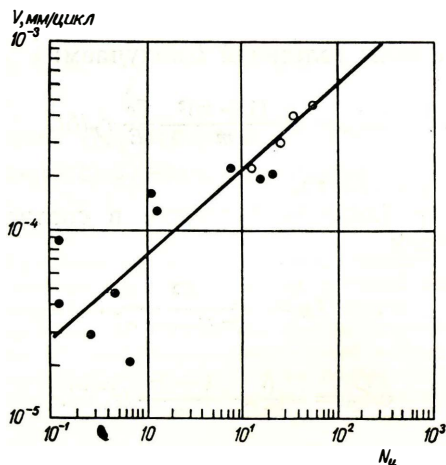
где C — показатель степени, после исключения из (11) коэффициента интенсивности напряжений K по закону Париса и элементарных преобразований имеем

$$v = \frac{B}{i^C} N_{ц}^{\frac{\alpha}{\alpha+2C}} \quad (13)$$

(B — константа, зависящая от упругих постоянных, показателя упрочнения и констант закона Париса; α — показатель закона Париса).

Контрольные экспериментальные исследования проведены на стандартном компактном образце из сплава ВТ6 на испытательной машине ГРМ-1 с частотой нагружения 8,33 Гц и коэффициентом асимметрии $R=0,74$ (последний выбран с целью исключения влияния шумов от трения в захватах). Если изменить конструкцию образца или принять специальные меры для исключения влияния сигналов от трения в захватах, то предлагаемый метод можно использовать во всем диапазоне положительных значений коэффициента асимметрии. Максимальная нагрузка в цикле равнялась 84 кН.

Для наблюдения за ростом трещины на полированную поверхность образца наносили сетку с шагом 1 мм. Развитие трещины контролировали при помощи микроскопа с ценой деления 0,01 мм. Соответствие скорости роста трещины



Связь скорости роста усталостной трещины с суммарным счетом акустической эмиссии в цикле.

внутри образца виду трещины проверяли посредством фрактографических исследований излома после завершения усталостных испытаний.

Преобразователь сигналов АЭ закрепляли на образце вблизи предполагаемой траектории роста трещины и через предусилитель соединяли с прибором АФ-20М [6]. Суммарный счет АЭ N фиксировался цифропечатающим устройством с интервалом печати 5 с.

При испытаниях в режиме регулярного нагружения инициировали усталостную трещину и выращивали ее в пределах, обеспечивающих надежное установление зависимости между суммарным счетом АЭ в цикле и скоростью роста трещины (микро- и макроскорости в данном режиме совпадают). На рисунке эта зависимость представлена в двойных логарифмических координатах. Сплошная линия построена согласно условию наилучшего описания результатов эксперимента (светлые точки) степенной зависимостью

$$v = 6,2 \cdot 10^{-4} (N_{\text{ц}})^{0,5} \quad (14)$$

Видно, что выражение (14) имеет структуру, соответствующую (13). Учитывая, что величина α для материала Д16Т и титанового сплава соответственно равна четырем и двум, приходим к заключению, что показатель степени C в выражении для скорости роста усталостных трещин в предыдущей [4] и в настоящей работах близок к единице. Согласно вышепринятой гипотезе (12) это позволяет сделать вывод о близости к линейной связи между кинетической энергией и суммарным счетом АЭ в цикле $N_{\text{ц}}$.

На втором этапе исследований нагрузку снижали до 30 кН при том же коэффициенте асимметрии и по истечении периода торможения трещины проводили испытания ступенями с уменьшающейся нагрузкой примерно на 5 кН, а на последних этапах разница в нагрузках между ступенями составляла 1,5 кН. На каждой сту-

пени нарабатывалось от 16 до 75 тыс. цикл. В течение этого периода фиксировалось от 5 до 18 значимых пятисекундных интервалов, для каждого из которых с использованием зависимости $v=f(N_{\text{ц}})$ (рисунок) определяли микроскопическую скорость роста, а по ней с помощью данных о наработке между соседними значащими интервалами по формуле (3) находили макроскопическую скорость роста трещины. Если ее среднее значение на этой ступени превышало 10^{-7} мм/цикл, то осуществляли переход на более низкую нагрузку. В итоге при нагрузке 9,81 кН и длине трещины 18 мм была достигнута макроскопическая скорость, равная 10^{-7} мм/цикл. Эти данные вводили в расчет ΔK_{th} по формуле для компактного образца [7]. Для исследуемого материала величина ΔK_{th} составила 2,17 МПа $\sqrt{\text{м}}$. Сопоставление полученных результатов с определенными традиционным путем для титановых сплавов свидетельствует о их хорошем соответствии.

Summary

A fatigue crack has been studied for dependence of its growth rate on parameters of acoustic emission, the results being presented. An analytical model is suggested to describe relation between the fatigue crack growth rate and total amount of acoustic emission for a cycle. The formulated model and obtained experimental results underlie development of the method for determination of threshold values of the stress intensity coefficient swing.

1. Методические указания. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик сопротивления развитию трещин (трещиностойкости) при циклическом нагружении.— М.: Изд-во стандартов, 1979.— 17 с.
2. Худак М. Л. Поведение малой трещины и прогнозирования ее усталостной долговечности // Теорет. основы инж. расчетов. Тр. Америк. об-ва инженеров-механиков.— 1981.— № 1.— С. 28—39.
3. Ши Т. Т., Дональд И. К. Пороговый коэффициент интенсивности напряжений и низкоскоростной рост усталостной трещины в роторной стали // Там же.— № 2.— С. 27—34.
4. Банов М. Д., Коняев Е. А., Павелко В. П. Применение метода акустической эмиссии для исследования усталостного повреждения тонколистового материала Д16АТ // Пробл. прочности.— 1981.— № 8.— С. 15—18.
5. Райс Дж. Математические методы в механике разрушения // Разрушение / Пер. с англ.— М.: Мир, 1975.— Т. 2.— 370 с.
6. Банов М. Д. Применение метода акустической эмиссии для диагностики состояния корпусов гидрофильтров // Дефектоскопия.— 1979.— № 2.— С. 110—112.
7. Брок Д. Основы механики разрушения / Пер. с англ.— М.: Высш. шк., 1980.— 368 с.
8. Матохнюк Л. Е., Ордынский В. С. Влияние частоты нагружения на закономерности и механизмы роста усталостных трещин в титановых сплавах. Сообщ. 1 // Пробл. прочности.— 1988.— № 1.— С. 17—21.

Риж. ин-т инженеров гражд. авиац.

Поступила 12.03.90