

УДК 629.7.02:539.4

В.И.Куренков, Ю.Л.Тарасов

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ИНТЕНСИВНОСТИ  
НАПРЯЖЕНИЙ И СКОРОСТИ РОСТА УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН

В настоящее время многочисленные исследования в области долговечности конструкций направлены на изучение второй стадии явления усталости – стадии распространения трещины. Особый интерес представляют исследования влияния окружающей среды на рост усталостных трещин. Моделирование этих условий проводят в закрытых камерах с определенным составом окружающей среды. При таких испытаниях для контроля длины трещины применяют методы электросопротивления, электронных потенциалов, ультразвуковой и т.д. Эти методы хорошо представлены в [1]. Однако некоторые из них требуют сложного оборудования, недостаточно стабильны, а такой метод, как визуальный вносит большую долю субъективизма.

В настоящей работе обсуждается метод, основанный на изменении податливости системы с ростом трещины. На основе этого метода разработана методика определения коэффициента интенсивности напряжений и скорости роста усталостных трещин.

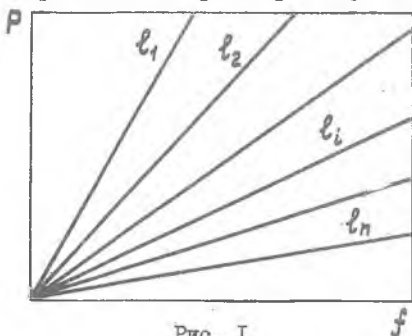


Рис. 1

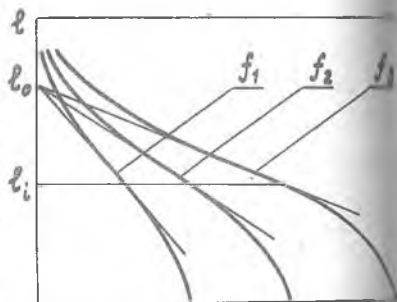


Рис. 2

Допустим, что для исследуемого образца имеются зависимости нагрузка - смещение точки приложения силы в направлении ее действия для ряда значений длины трещины  $l_1, l_2, \dots, l_i, \dots$ , как показано на рис. 1. Здесь  $P$  - прикладываемое к образцу усилие,  $f$  - смещение точки приложения силы в направлении ее действия. В дальнейшем для краткости будем называть эту величину прогибом. Эксперименты показывают, что при нагрузках, приводящих к усталостным разрушениям, зависимость  $P-f$  имеет линейный харак-

Представим их в координатах "длина трещины - нагрузка" при постоянном прогибе. В общем случае эти зависимости имеют вид, показанный на рис. 2. Найдем уравнения касательных к этой серии кривых. Для этого продифференцируем функцию податливости

$$L(l) = \frac{f}{P} \quad (1)$$

по неявную, получим угловой коэффициент касательных

$$\frac{dL}{dP} = -\frac{L^2}{f} \frac{1}{\frac{dL}{dl}}$$

Тогда уравнение касательных примет вид

$$l = l_0 - \frac{g}{f} P, \quad (2)$$

$$g = \frac{L^2}{\frac{dL}{dl}} \quad (3)$$

При фиксированной длине трещины уравнение (2) является уравнением пучка прямых (для разных величин прогиба) с центром в начале с координатами ( $P=0, l=l_0$ ).

Значение  $l_0$  можно найти, зная параметры одной точки кривой

$$l_0 = l_1 + \frac{P_1}{f_1} \left( \frac{L^2}{dL/dl} \right)_{l=l_1}$$

В общем случае зависимость длины трещины от нагрузки при фиксированных прогибах нелинейна. Но в некоторых частных случаях линейность может быть незначительной и кривые могут быть аппроксимированы уравнениями прямых, совпадающими с уравнениями касательных (2). В этом случае можно по известным значениям нагрузки и прогиба найти длину трещины. Этот метод определения длины трещины особенно удобен при усталостных испытаниях, когда

одну из величин  $f$  или  $P$  поддерживают постоянной.

Величины  $l_0$  и  $g$  пучка прямых могут быть определены, если известны параметры двух произвольных точек зависимости " $l-P$ " ( $l_1, P_1, f_1, l_2, P_2, f_2$ ). Из уравнения (2) имеем

$$g = (l_0 - l_1) \frac{f_1}{P_1}, \quad g = (l_0 - l_2) \frac{f_2}{P_2}.$$

Решая полученную систему уравнений относительно  $l_0$  и  $g$  и учитывая, что  $P_1/f_1 = C_1$  и  $P_2/f_2 = C_2$  — жесткости образца соответственно с трещиной  $l_1$  и  $l_2$ , находим

$$l_0 = \frac{l_1 C_2 - l_2 C_1}{C_2 - C_1}, \quad g = \frac{l_2 - l_1}{C_1 - C_2}. \quad (4)$$

Для проверки правомерности линейной аппроксимации зависимости  $l-P$  проводились статические эксперименты на образцах из АМГб-БМ с различными значениями длины трещины. Форма и размеры образцов приведены на рис. 3. Там же показана схема нагружения и замера прогиба. В процессе испытаний снимались для различных значений  $l$  характеристики " $P-f$ ", затем они перестраивались в зависимость " $l-P$ " при фиксированных прогибах. Результаты эксперимента приведены на рис. 4, где по оси ординат отложена относительная длина трещины  $l/B$  ( $B$  — ширина образца).

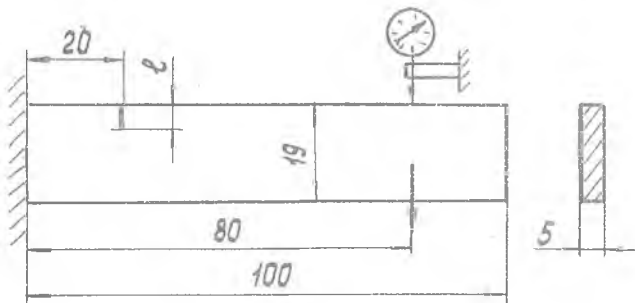


Рис. 3

Точки соответствуют экспериментальным данным, а сплошные линии — линейной аппроксимации.

Из рисунка видно, что предположение о линейном характере зависимости " $l-P$ " справедливо в диапазоне относительных длин трещин от 0,25 до 0,7.

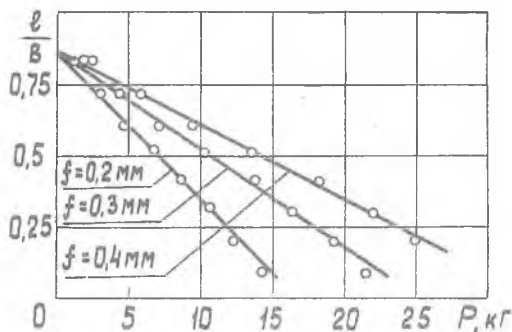


Рис. 4

Известно, что коэффициент интенсивности напряжений при деформации плоской деформации экспериментально находится с использованием следующей формулы [2]:

$$K = P \sqrt{\frac{E}{2(1-\mu^2)t} \frac{dL}{d\ell}}, \quad (5)$$

где  $E$  — модуль упругости материала,  $\mu$  — коэффициент Пуассона,  $t$  — толщина образца.

Величину  $dL/d\ell$  можно определить с помощью графического дифференцирования по методике, изложенной в [2]. Однако такая операция может внести большую ошибку. В случае же линейной аппроксимации уравнение (5) приводится к виду

$$K = f \sqrt{\frac{E}{2(1-\mu^2)t} \frac{1}{g}}, \quad (6)$$

где параметр  $g$  не зависит от величины усилия и прогиба и определяется с помощью выражения (4). Из зависимости (6) следует, что для поддержания коэффициента интенсивности напряжения постоянным во время роста усталостной трещины необходимо поддерживать постоянной амплитуду прогиба.

Для проверки полученных данных производилось сравнение коэффициентов интенсивности напряжений, рассчитанных по формуле (6), с экспериментальными значениями, полученными нами по методике, изложенной в [2]. Кроме того, были определены значения

коэффициента интенсивности напряжений по формулам работы [3]. Все расчеты производились для образцов, показанных на рис. 3. Результаты представлены в таблице I.

Таблица I

Сравнение коэффициентов интенсивности напряжений, полученных разными способами

f мм	l мм	Коэффициенты интенсивности напряжений K $\frac{кг}{мм^2}$		
		по формуле (6)	по методике [2]	по работе [3]
0,2	6	12,4	12,3	10,63
	8		12,2	12,0
	10		12,94	12,13
	12		12,78	11,7
0,3	6	18,6	18,33	16,0
	8		18,16	17,7
	10		19,22	18,3
	12		19,03	17,3
0,4	6	24,8	24,36	21,2
	8		24,13	23,65
	10		25,68	24,26
	12		24,97	23,1

Из таблицы видно, что расхождения между подсчитанными коэффициентами интенсивности напряжений небольшие. Это указывает на возможность применения рекомендуемой нами формулы (6).

Следует отметить, что для получения значений коэффициентом интенсивности напряжений по методике, изложенной в [2], и формулам работы [3] необходимо знать длину трещины. В нашем же случае она входит в неявном виде и нет необходимости определять ее. Поэтому в случае, когда контроль длины трещины вызывает затруднения, удобно пользоваться предлагаемой методикой.

С использованием линейной аппроксимации длины трещины от нагрузки упрощается определение скорости роста усталостной трещины. Средняя скорость роста трещины подсчитывается по формуле

$$\frac{d\ell}{dN} = \frac{\ell_2 - \ell_1}{N_2 - N_1}, \quad (7)$$

где  $\ell_1$  и  $\ell_2$  - значения длины трещины, соответствующие количеству циклов нагружения  $N_1$  и  $N_2$ . Подставляя вместо  $\ell_1$  и  $\ell_2$  выражение (2), получаем

$$\frac{d\ell}{dN} = \frac{g}{f} \frac{P_1 - P_2}{N_2 - N_1}. \quad (8)$$

Для симметричного цикла следует брать максимальные значения усилий и соответствующие им прогибы.

Таким образом, для определения скорости роста усталостной трещины необходимо в процессе испытаний периодически замерять значения силы и соответствующее им количество циклов нагружения.

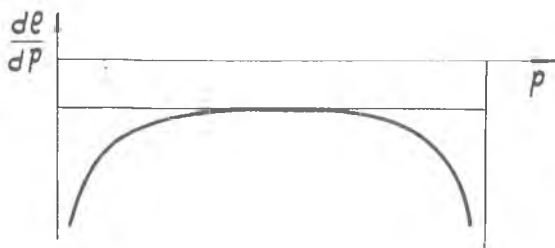


Рис. 5

В общем случае, как указывалось выше, зависимость длины трещины от нагрузки нелинейна. Примерный ее характер для фиксированных  $f$  показан на рис. 2, а производные  $d\ell/dP$  изменяются по закону, представленному на рис. 5. Подобные кривые можно с достаточной степенью точности аппроксимировать функциями вида

$$\frac{d\ell}{dP} = a + b \ln \sin \left( \frac{\pi}{P^*} P \right). \quad (9)$$

Если учесть, что  $a = g_{\max}/f$  и  $P^* = C_0 \cdot f$ , где  $C_0$  - жесткость образца без трещины, то можно прийти к следующей формуле для определения коэффициента интенсивности напряжений:

$$K = f \sqrt{\frac{E}{2(1-\mu^2)t} \frac{1}{g_{\max} - b \cdot f \ln \sin \left( \frac{\pi}{C_0 f} \cdot P \right)}}. \quad (10)$$

Параметры  $g_{\max}$  и  $\delta$  подбираются по экспериментальным точкам. Из выражения (10) видно, что значение  $K$  зависит от величины прогиба  $f$  и приложенного усилия  $P$ . Следует отметить, что при  $\delta=0$  уравнение (10) вырождается в выражение (6).

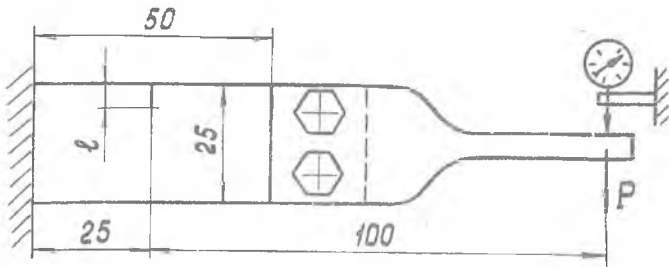


Рис. 6

Экспериментальная проверка данной методики определения проводилась на образцах из листового сплава АМГ6-БМ толщиной 5 мм с удлинителем. Форма и размеры образцов и схема нагружения приведены на рис. 6. На рис. 7 показано сравнение коэффициентов интенсивности напряжений, рассчитанных по формуле (10) (сплошные линии), по экспериментальному методу [2] (треугольники) и по методу, изложенному в [3] (кружочки) для различных прогибов.

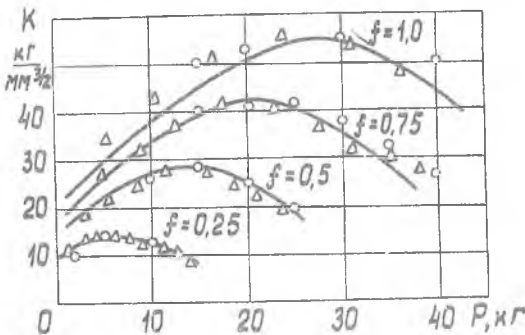


Рис. 7

Из рисунка видно, что формула (10) удовлетворительно описывает экспериментальные данные. Следует отметить, что наиболее

близкие результаты получаются при малых величинах прогибов. Точность ухудшается при больших прогибах. Это объясняется отклонением от линейного закона зависимости " $P-f$ ", что связано с появлением пластических зон в вершине трещины.

Таким образом, получена расчетно-экспериментальная методика определения коэффициента интенсивности напряжений, в которой длина трещины в явном виде не учитывается, и, следовательно, она может быть применима там, где имеются трудности с измерением длины трещины.

### Л и т е р а т у р а

1. Школьник Л.М. Скорость роста трещины и живучесть металлов. М., "Металлургия", 1973.
2. Хеккель К. Техническое применение механики разрушения. Пер. с нем. М., "Металлургия", 1974.
3. Махутов Н.А. Сопротивление элементов конструкций хрупкому разрушению. М., "Машиностроение", 1973.