

## Прогнозирование характеристик разрушения металлов по результатам высокочастотных испытаний\*

Т. Ю. Яковлева, Л. Е. Матохнюк

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

*На основе модели развития областей локальной пластической деформации в процессе накопления усталостных повреждений и роста усталостной трещины с учетом скорости циклического нагружения предложен метод прогнозирования характеристик циклической трещиностойкости металлических материалов при низкочастотном нагружении по результатам высокочастотных испытаний. Проведено сравнение результатов прогнозирования диаграмм усталостного разрушения с данными испытаний для сплавов VT22, VT18У, ВНС-25 и АМг6Н в диапазоне частот 20 Гц...10 кГц.*

**Ключевые слова:** усталостное разрушение, частота нагружения, пластическая деформация, коэффициент корреляции.

Основная цель интенсивно развивающихся в последнее время модельных представлений об усталости – изыскание возможности прогнозирования степени усталостного повреждения элементов конструкции или оборудования. Известно несколько десятков математических выражений, которые описывают кинетическую диаграмму усталостного разрушения. Однако для описания экспериментальных данных реально используются не более десяти уравнений, применяемых в зависимости от класса материала, условий испытаний, окружающей среды. Чаще всего – это различные модификации уравнения Париса (в некоторых случаях с учетом закрытия трещины) для описания скорости роста макротрещин [1–4], выражения, содержащие микроструктурные параметры (для коротких трещин [5, 6]), соотношения, полученные с позиций единого подхода к инкубационному и активному периодам усталостного разрушения [7, 8]. Современные исследования все более обоснованно указывают на эффективность единого подхода, используемого в настоящей работе.

Ранее [9] на основании рассмотрения процессов зарождения и развития усталостных трещин с позиций локального пластического деформирования материала предложено уравнение скорости роста усталостной трещины с учетом частоты нагружения и асимметрии циклов:

$$\frac{dl}{dN} = \frac{2(\Delta K - \Delta K_e - a_{\Delta K} \sqrt{f})^2}{\frac{\pi}{\Phi^2} (b_{\sigma r} + c_{\sigma r} \sqrt{f})^2}; \quad \Delta K_e = \frac{\sigma_e \sqrt{2\pi r}}{\Phi}; \quad a_{\Delta K} = \frac{a_{\sigma r} \sqrt{2\pi r}}{\Phi}, \quad (1)$$

где  $\Delta K = k\Delta K_{-1}$ ;  $k$  – коэффициент чувствительности материала к асимметрии циклов;  $\Delta K_{-1}$  – коэффициент интенсивности напряжений при сим-

\* По материалам доклада на международной научно-технической конференции “Динамика, прочность и ресурс машин и конструкций” (1–4 ноября 2005 г., Киев, Украина).

метричных циклах в условиях заданной скорости роста трещины;  $\Phi$  – функция координат точки в зоне локальной пластической деформации, одинаковая для всех частот нагружения;  $a_{\sigma r}$ ,  $b_{\sigma r}$  и  $c_{\sigma r}$  – параметры, зависящие от пластических и релаксационных свойств материала в этой зоне;  $r$  – расстояние от вершины трещины до рассматриваемой точки;  $\sigma_e = k\sigma_{e/-1}$ ;  $\sigma_{e/-1}$  – напряжения симметричных циклов, воздействие которых еще не вызывает усталостного разрушения при сколь угодно большом числе циклов нагружения;  $f$  – частота нагружения.

Уравнение (1) преобразуется к простому виду, имеющему структуру модифицированного уравнения Париса для скорости роста трещины

$$\frac{dl}{dN} = A_f (\Delta K - \Delta K_{ue})^2; \quad A_f = \frac{2}{\frac{\pi}{\Phi^2} (b_{\sigma r} + c_{\sigma r} \sqrt{f})^2}; \quad (2)$$

$$\Delta K_{ue} = \Delta K_e + a_{\Delta k} \sqrt{f},$$

с помощью которого можно аппроксимировать экспериментальные результаты определения скорости роста усталостных трещин [9].

Анализ уравнения (1) показал, что диаграммы усталостного разрушения при различных частотах нагружения могут быть построены без проведения испытаний на циклическую трещиностойкость. Правомерность этого проверена на технически чистом титане ВТ1-0 (рис. 1), для которого представлялось возможным определить оценочные значения входящих в (1) параметров по данным литературных источников:  $a_{\sigma r} \approx 1,17 \text{ МПа}/\sqrt{\text{Гц}}$ ;  $b_{\sigma r} \approx \approx 3317 \text{ МПа}\sqrt{\text{цикл}}$ ;  $c_{\sigma r} \approx 203 \text{ МПа}\sqrt{\text{цикл}/\text{Гц}}$ ;  $\sigma_{er} \approx 98 \text{ МПа}$ ;  $r \approx 7,2 \cdot 10^{-5} \text{ м}$ . Для заданных значений  $\Delta K$  рассчитывали теоретические значения  $dl/dN$  на стадии роста макротрещины, приняв  $\Phi = 1$  (условие плоской деформации).

Величины коэффициента корреляции  $\eta$  и стандартной ошибки  $S$ , которые характеризуют степень соотношения между расчетными и экспериментальными данными, определяли по формулам [10]

$$\eta = \sqrt{\frac{S_t - S_r}{S_t}}; \quad S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_{points}} (y_i - f(x_i))^2}{n_{points} - n_{param}}}. \quad (3)$$

Здесь

$$S_t = \sum_{i=1}^{n_{points}} (\bar{y} - y_i)^2; \quad S_r = \sum_{i=1}^{n_{points}} (y_i - f(x_i))^2; \quad \bar{y} = \frac{1}{n_{points}} \sum_{i=1}^{n_{points}} y_i, \quad (4)$$

где  $f(x_i)$  – значение  $dl/dN$ , рассчитанное по уравнению (2), для заданного  $\Delta K = x_i$ ;  $y_i$  – соответствующее экспериментальное значение  $dl/dN$ ;  $n_{points}$  –

число пар экспериментальных и теоретических точек на кривой;  $n_{param}$  – число параметров в уравнении. Для уравнения (2) имеем  $n_{param} = 2$ .

Испытания на циклическую трещиностойкость соответствовали условиям усталостных испытаний, которые описаны ранее [11]. В табл. 1 приведены значения  $A_{f/p} = 2/\pi(C_f)^2$ , рассчитанные по коэффициенту  $C_f$  в уравнении для кривой усталости, который используется для аппроксимации результатов усталостных испытаний [9],

$$\sigma_a = \sigma_{ue} + \frac{C_f}{\sqrt{N_{Fr}}}; \quad \sigma_{ue} = \sigma_e + a_\sigma \sqrt{f}; \quad C_f = b_\sigma + c_\sigma \sqrt{f} \quad (5)$$

при равенстве параметров  $a_{\sigma r} = a_\sigma$ ;  $b_{\sigma r} = b_\sigma$ ;  $c_{\sigma r} = c_\sigma$ .

Т а б л и ц а 1

Значения коэффициентов уравнений для расчетных кривых усталости и кинетических диаграмм усталостного разрушения технически чистого титана ВТ1-0 и характеристики степени их согласования с экспериментальными данными

$A_f$	$\Delta K_{ue}$	$f$ , Гц	$S$	$\eta$	$A_{f/p}$
$1,7714 \cdot 10^{-8}$	2,44	140	$4,41 \cdot 10^{-7}$	0,9855237	$2,1 \cdot 10^{-8}$
$9,1445 \cdot 10^{-9}$	2,88	600	$2,40 \cdot 10^{-7}$	0,9916540	$1,0 \cdot 10^{-8}$
$3,0237 \cdot 10^{-9}$	3,53	3000	$1,62 \cdot 10^{-8}$	0,9900640	$3,0 \cdot 10^{-9}$
$1,0540 \cdot 10^{-9}$	4,15	10000	$3,10 \cdot 10^{-9}$	0,8539657	$1,1 \cdot 10^{-9}$

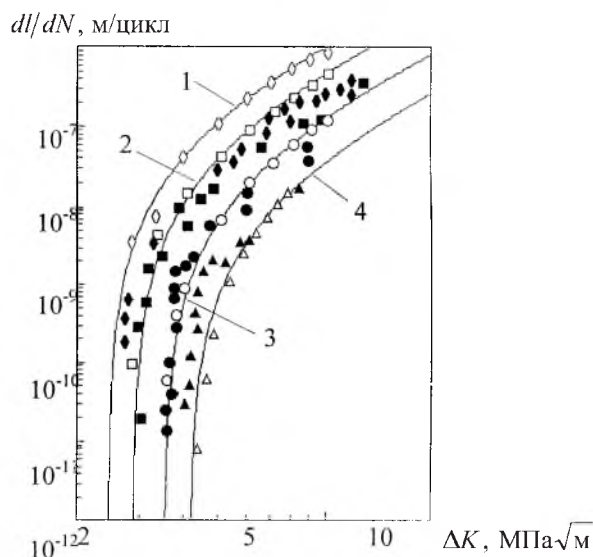


Рис. 1. Расчетные значения  $dl/dN$  (светлые точки) и построенные по ним в соответствии с уравнением (2) кинетические диаграммы усталостного разрушения, а также результаты испытаний на циклическую трещиностойкость [11] (темные точки) технически чистого титана ВТ1-0 при различной частоте нагружения: 1 –  $f = 140$  Гц; 2 –  $f = 600$  Гц; 3 –  $f = 3$  кГц; 4 –  $f = 10$  кГц.

Из рис. 1 видно, что результаты расчета удовлетворительно совпадают с экспериментальными данными испытаний на циклическую трещиностойкость. В то же время для частот нагружения 140 и 600 Гц теоретические диаграммы частично лежат несколько левее экспериментальных точек. Наличие такой систематической ошибки для некоторых частот нагружения кроме погрешности, вызванной использованием в расчетах величин микрохарактеристик из литературных источников, может быть обусловлено использованием среднего значения скорости процессов пластической деформации  $v_0$  при расчетах параметров  $a_{cr}$ ,  $b_{cr}$  и  $c_{cr}$  [9]. Если теоретически рассчитанная величина  $v_0$  больше реальной для данной частоты нагружения, то для одних и тех же значений  $\Delta K$  теоретическая скорость роста трещины будет превышать экспериментальную [9]. Кроме того, с ростом скорости деформации значение  $v_0$  увеличивается [12]. Следовательно, в этом случае на более высоких частотах нагружения будет наблюдаться лучшее, чем на низких, соответствие между теоретическими и экспериментальными величинами  $dl/dN$ . В целом же данные рис. 1 и приведенные в табл. 1 значения  $\eta$  и  $S$  свидетельствуют о том, что величина отклонения теоретических кривых от экспериментальных точек находится в диапазоне допустимого разброса экспериментальных данных.

Поскольку определение входящих в уравнение (1) параметров физическими методами исследования представляет трудности, характеристики циклической трещиностойкости металлических материалов целесообразно прогнозировать по результатам испытаний на одной из частот в исследуемом диапазоне. Для этого экспериментальные данные при частоте нагружения, например, 10 кГц аппроксимируют уравнением (2), затем, зная значения  $A_f$  и  $\Delta K_{ie}$  и задавая координаты точек на диаграмме усталостного разрушения, вычисляют коэффициенты, входящие в уравнение (1). Тогда для построения диаграмм усталостного разрушения на необходимой низкой частоте нагружения достаточно в уравнении (1) задать только значение частоты  $f$ .

На рис. 2 показаны прогнозируемые диаграммы для низких частот и экспериментальные точки для условий симметричного растяжения–сжатия при комнатной температуре (сплошные линии) по высокочастотным кинетическим диаграммам усталостного разрушения (штриховые линии). В табл. 2 приведены коэффициенты уравнения (1), определенные по экспериментальным данным для частот нагружения 10 кГц (сплавы ВТ22, ВТ18У, ВНС-25) и 3 кГц (сплав АМг6Н), и рассчитанные по ним параметры уравнения (2) для прогнозируемых частот нагружения каждого материала. Сопоставление расчетных кинетических диаграмм усталостного разрушения с экспериментальными данными проводили для скорости роста трещины  $5 \cdot 10^{-11}$  м/цикл, которая была достигнута для всех частот нагружения. Результаты сопоставления прогноза с экспериментом представлены в табл. 2, где  $\Delta K_{th}^p$  – значение порогового коэффициента интенсивности напряжений, полученное по прогнозируемой кинетической диаграмме;  $\Delta K_{th}^3$  – то же по экспериментальной.

Различие между расчетными диаграммами и полученными экспериментально в среднем не превышает 5%, что находится в пределах разброса экспериментальных результатов и свидетельствует о правомерности предложенного метода.

Т а б л и ц а 2

Значения параметров уравнений кинетических диаграмм усталостного разрушения (1) и сопоставление расчетных значений  $\Delta K_{th}$  с экспериментальными для  $dl/dN = 5 \cdot 10^{-11}$  м/с

Материал	$f$ , Гц	Эксперимент				Прогноз		$\Delta K_{th}$ , МПа $\sqrt{м}$	$\delta$ , %	Коэффициент уравнения (1)	
		$\Delta K_e$ , МПа $\sqrt{м}$	$a_{\Delta K}$ , МПа $\sqrt{м}$	$b_{\sigma}$ , МПа $\sqrt{цикл}$	$c_{\sigma}$ , МПа $\sqrt{цикл/Гц}$	$A_f$ , $\sqrt{м}/(МПа \cdot с)$	$\Delta K_{ue}$ , МПа $\sqrt{м}$			$b_{\sigma}$ , МПа $\sqrt{цикл}$	$c_{\sigma}$ , МПа $\sqrt{цикл/Гц}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ВТ22	10000	7,0	0,0257	18821	185					19148	192
	3000					$7,64 \cdot 10^{-10}$	8,410	$\frac{8,67}{8,66}$	0,1		
	600					$1,17 \cdot 10^{-9}$	7,630	$\frac{7,84}{7,63}$	2,8		
	140					$1,45 \cdot 10^{-9}$	7,300	$\frac{7,30}{7,50}$	2,7		
ВТ18У	10000	5,6	0,0102	35112	354					35252	354
	3000					$9,76 \cdot 10^{-10}$	6,100	$\frac{6,32}{6,36}$	0,6		
	600					$1,50 \cdot 10^{-9}$	5,840	$\frac{6,02}{6,03}$	0,2		
	140					$1,88 \cdot 10^{-9}$	5,720	$\frac{5,88}{5,88}$	0,0		

продолжение табл. 2

Г. Ю. Яковлева, Л. Е. Матюхинок

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ВНС25	10000	6,5	0,0185	41003	415					41312	416
	3000					$1,58 \cdot 10^{-10}$	7,510	$\frac{8,07}{8,13}$	0,7		
	600					$2,44 \cdot 10^{-10}$	6,950	$\frac{7,40}{7,46}$	0,8		
	170					$2,00 \cdot 10^{-10}$	6,740	$\frac{7,15}{7,20}$	0,7		
	20					$3,48 \cdot 10^{-10}$	6,580	$\frac{7,11}{7,06}$	0,7		
АМг6Н	3000	0,7	0,0023	1243	131					11869	120
	400					$8,70 \cdot 10^{-10}$	0,745	$\frac{0,98}{1,03}$	4,9		
	20					$1,16 \cdot 10^{-9}$	0,710	$\frac{0,71}{0,94}$	24,5		

**Примечание.** Над чертой приведены расчетные данные  $\Delta K_{th}$ , под чертой – экспериментальные;  $\delta = (\Delta K_{th}^p - \Delta K_{th}^э) / \Delta K_{th}^э$ .

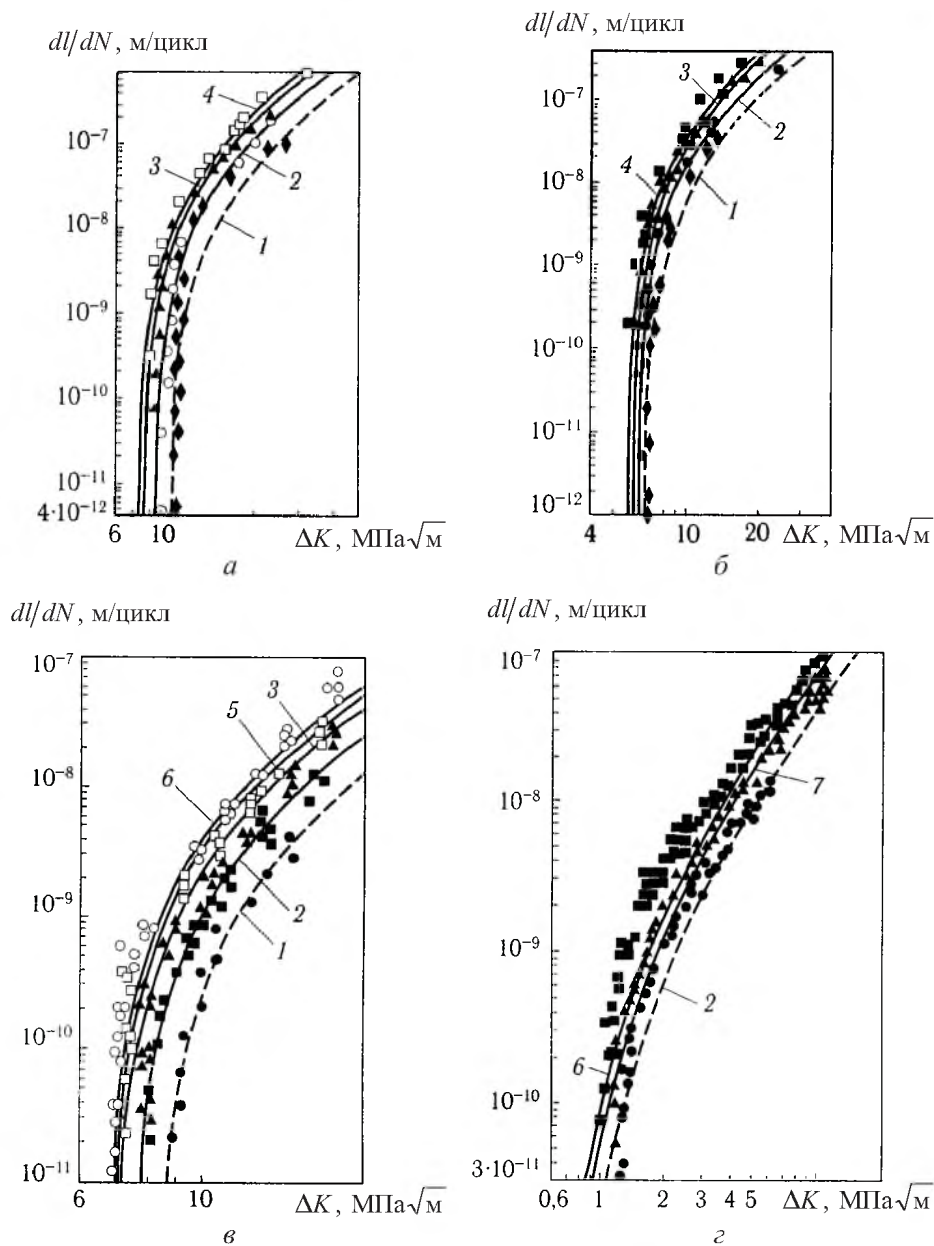


Рис. 2. Результаты испытаний на циклическую трещиностойкость и прогнозируемые кинетические диаграммы усталостного разрушения для сплавов ВТ22 (а), ВТ18У (б), ВНС-25 (в) и АМг6Н (г) при различной частоте нагружения: 1 –  $f = 10$  кГц; 2 –  $f = 3$  кГц; 3 –  $f = 600$  Гц; 4 –  $f = 140$  Гц; 5 –  $f = 170$  Гц; 6 –  $f = 20$  Гц; 7 –  $f = 400$  Гц.

## Резюме

На основі моделі розвитку областей локальної пластичної деформації в процесі накопичення пошкоджень від утомленості та росту тріщини від утомленості з урахуванням швидкості циклічного навантаження запропоновано метод прогнозування характеристик циклічної тріщиностійкості ме-



талічних матеріалів при низькочастотному навантаженні за результатами високочастотних досліджень. Проведено порівняння результатів прогнозування діаграм руйнування від утомленості з даними випробувань для сплавів ВТ22, ВТ18У, ВНС-25 і АМг6Н у діапазоні частот 20 Гц...10 кГц.

1. Paris P. and Erdogan F. A criterial analysis of crack propagation laws // J. Basic. Eng. – 1963. – P. 528 – 534.
2. Forman R. G., Kearney V. E., and Engle R. M. Numerical analysis of crack propagation in cycle loaded structures // Trans. ASME D. – 1967. – **89**. – P. 431 – 512.
3. Ярема С. Я., Микитишин С. И. Аналитическое описание диаграммы усталостного разрушения материалов // Физ.-хим. механика материалов. – 1975. – № 6. – С. 47 – 54.
4. Schijve J. Fatigue crack growth under variable-amplitude loading // Fatigue Fract. – 1996. – **19**. – P. 110 – 133.
5. Navarro A. and de los Rios E. R. A model for shot fatigue crack propagation with an interpretation of the shot – long crack transition // Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct. – 1987. – **10**. – P. 169 – 186.
6. Міллер К.-Дж., Акід Р. Застосування підходів мікроструктурної механіки руйнування до металів із різним станом поверхні // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1997. – № 1. – С. 9 – 32.
7. Yokobori T. An Interdisciplinary Approach to Fracture and Strength of Solids. – Groningen: Wolters-Nordhoff Scientific Publications LTD, 1970. – 260 p.
8. Остаи О. П., Панасюк В. В., Костик Є. М. Уніфікована модель зародження та росту втомних макротріщин. Ч. 1. Застосування силових параметрів механіки руйнування матеріалів на стадії зародження тріщини // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1998. – № 1. – С. 7 – 21.
9. Яковлева Т. Ю. Локальная пластическая деформация и усталость металлов. – Киев: Наук. думка, 2003. – 236 с.
10. Хальд А. Математическая статистика с техническими приложениями. – М.: Изд-во иностр. лит., 1956. – 664 с.
11. Матохнюк Л. Е. Ускоренные усталостные испытания высокочастотным нагружением. – Киев: Наук. думка, 1988. – 200 с.
12. Friedel J. Dislocations. – Oxford; London; Edinburgh; New York; Paris; Frankfurt: Pergamon Press, 1964. – 643 p.

Поступила 12. 12. 2005