

УДК 620.178.3:539.431

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ УРАВНЕНИЯ СКОРОСТИ РОСТА ТРЕЩИНЫ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

© А. Н. Савкин<sup>1</sup>, А. В. Андроник<sup>1</sup>, Р. Корадди<sup>2</sup>

Статья поступила 17 октября 2014 г.

Предложена методика определения коэффициентов Пэриса. Описан подход, позволяющий получить промежуточные значения скоростей роста трещины на диаграмме усталостного разрушения в результате каждого испытания. Показано влияние эффекта закрытия трещины на скорость ее роста, получены значения размаха эффективного коэффициента интенсивности напряжений (КИН). Предложены пути развития методики, например, для описания области устойчивого роста трещины, ведущего к разрушению.

**Ключевые слова:** кривая Пэриса; диаграмма усталостного разрушения; аппроксимация кривой; оценка закрытия трещины.

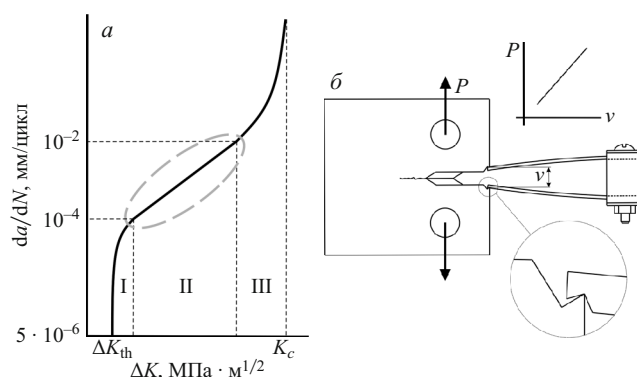
Режим Пэриса характеризуется логарифмическим линейным отношением между размахом коэффициента интенсивности напряжений  $\Delta K$  и скоростью роста трещины  $da/dN$ , причем  $da/dN = 10^{-4} - 10^{-2}$  мм/цикл (рис. 1, а) [1, 2]. С учетом эффекта закрытия трещины уравнение Пэриса, описывающее этот диапазон скоростей, имеет следующий вид [2]:

$$\frac{da}{dN} = c \Delta K_{eff}^m, \quad (1)$$

где  $c$ ,  $m$  — искомые коэффициенты;  $\Delta K_{eff}$  — размах эффективного (с учетом эффекта закрытия трещины) КИН.

В настоящее время отсутствует единая методика определения коэффициентов  $c$  и  $m$ . Наиболее конструктивно определение участка диаграммы усталостного разрушения в результате каждого испытания, что позволяет экономить образцы и время [3]. В данной

работе приведена методика определения коэффициентов Пэриса. Предлагаемая методика испытаний базируется на постоянстве размаха нагрузки  $\Delta P$  и позволяет оценить влияние эффекта закрытия трещины путем сравнения результатов с различной асимметрией цикла  $R$ .



**Рис. 1.** Режим Пэриса на диаграмме усталостного разрушения (а) и схема крепления датчика раскрытия трещины к компактному образцу (б)

<sup>1</sup> Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Россия; e-mail: tfrpk@vstu.ru

<sup>2</sup> ViSS-ITW, г. Бангалор, Индия.

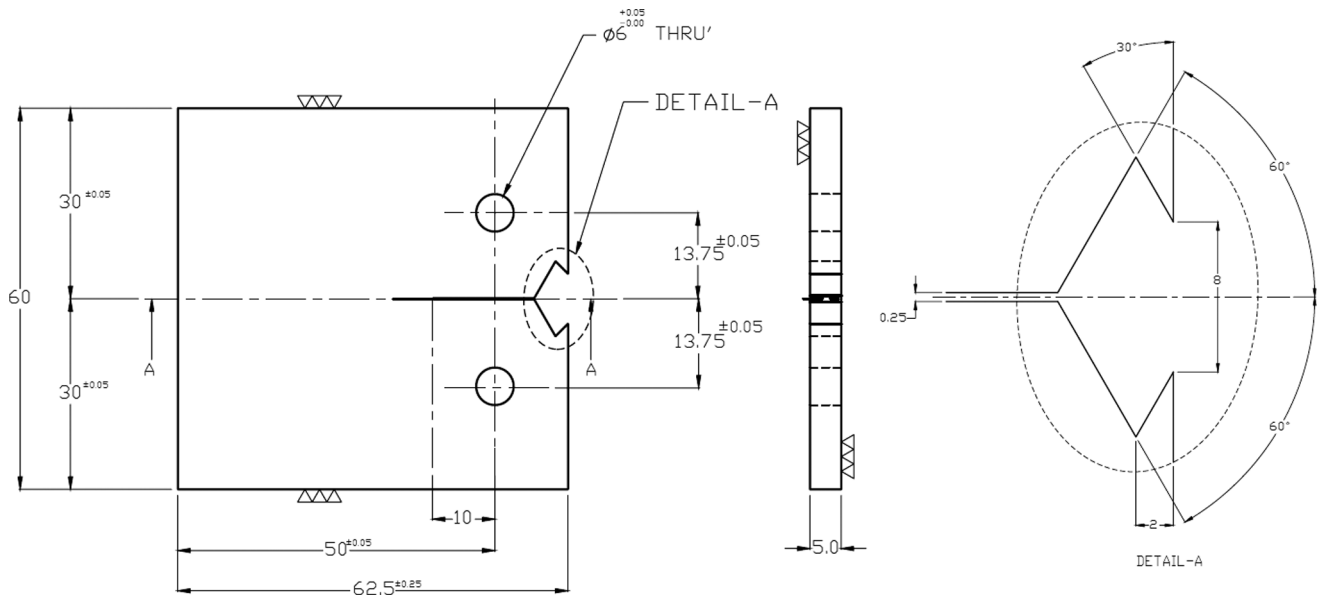


Рис. 2. Схема компактного образца

Представлена подробная процедура определения  $da/dN$  и  $\Delta K$ , начиная с обработки сигнала датчика раскрытия трещины (рис. 1, б).

Требования к программе испытаний следующие: 1) преобладающие скорости роста соответствуют режиму Пэриса; 2) эффект закрытия трещины учитывается; 3) характер нагружения стационарный; 4) испытания просты и обладают хорошей повторяемостью.

Использовали алюминиевый С(Т) образец толщиной 5 мм (рис. 2); направление проката перпендикулярно направлению роста трещины (LT). Толщина образца меньше стандартной, что уменьшает область плоского деформированного состояния. Использование нестандартной геометрии вызвало необходимость определения коэффициентов формулы длины трещины:  $C_0 = 0,9098$ ,  $C_1 = -0,6286$ ,  $C_2 = -40,979$ ,  $C_3 = 99,828$ ,  $C_4 = 693,45$ ,  $C_5 = -2533,8$  [4].

Испытывали образец из сплава 2024-T3 по следующей программе: три испытания при  $P_{\max} = 2$  кН и частоте нагружения  $F = 5$  Гц с частотой записи данных  $F_{DAQ} = 2500$  Гц; при этом значения коэффициента асимметрии цикла  $R$  составляли 0,1, 0,3 и 0,5. Испытаниям предшествовала одна программа предварительного растрескивания ( $P_{\max} = 2$  кН,  $R = 0,1$ ,  $F = 10$  Гц) до достижения длины трещины  $a_0 = 12$  мм. При длине трещины  $a_0 = 12$  мм размах КИН  $\Delta K_{\min}(R = 0,1) = 7,71$  МПа  $\cdot$  м<sup>1/2</sup>,  $\Delta K_{\min}(R = 0,3) = 6$  МПа  $\cdot$  м<sup>1/2</sup> и  $\Delta K_{\min}(R = 0,5) = 4,29$  МПа  $\cdot$  м<sup>1/2</sup>. Испытание начинали выше предполагаемого порогового размаха КИН  $\Delta K_{th} \approx 3$  МПа  $\cdot$  м<sup>1/2</sup> [5], а завершали по достижении критической длины трещины  $a_f = 32,5 - 33$  мм.

Испытания проводили на испытательной машине BiSS Nano 25 кН [6] в лаборатории BiSS Labs (Бангалор, Индия). Нагружение и запись сигнала раскрытия трещины осуществляли с помощью программного обеспечения BiSS TestBuilder, а для обработки сигнала

и вычислений использовали программы, совместно разработанные сотрудниками ВолгГТУ и BiSS-ITW.

*Получение кривой  $a = f(N)$ .* Датчик раскрытия трещины показывает расстояние между концами его измерительных ножек  $v$ , которые закреплены на образце и в течение нагружения определяют смещение  $u$ . Отношение изменения раскрытия  $\Delta v$  к изменению нагрузки  $\Delta P$  в течение полуцикла нагружения определяет податливость  $\Delta v / \Delta P$ . Смещение [7]

$$u = \left( \sqrt{\frac{E \Delta v W}{\Delta P}} + 1 \right)^{-1}, \quad (2)$$

где  $\Delta v$  — учитываемое изменение раскрытия в течение полуцикла;  $W$  — толщина образца. Длину трещины определяли по формуле [7]

$$a = W(C_0 + C_1 u + C_2 u^2 + C_3 u^3 + C_4 u^4 + C_5 u^5), \quad (3)$$

где  $C_0$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $C_4$  и  $C_5$  — коэффициенты податливости.

При расчете податливости рассматривали нисходящий полуцикл, поскольку при восходящем полуцикле происходит рост трещины, что вносит разброс в сигнал [8]. Кроме того, ввели пределы интересующего интервала, такие как  $P_{upper} = 0,95 P_{\max}$  и  $P_{lower} = 0,45 P_{\max}$  (рис. 3, а). Эти пределы исключали данные выше  $P_{upper}$ , обладающие повышенным разбросом вследствие смены направления нагружения, а также ниже  $P_{lower}$ , которые могут быть подвержены воздействию явления закрытия трещины, проявляющегося ниже  $P_{op}$ . Рассматриваемые значения раскрытия соответствовали диапазону  $P_{lower} - P_{upper}$ . Таким образом, рассматривали изменение нагружения

$$\Delta P = P_{upper} - P_{lower} = 0,5 P_{\max}. \quad (4)$$

Датчик раскрытия трещины с базой 2 мм способен измерять раскрытие при частотах 10–20 Гц. Частота записи данных высока, что позволяет получить сотни значений смещения  $v_i$  и нагрузки  $P_i$  после каждого цикла.

Для определения податливости целесообразно применить аппроксимацию МНК линейной функцией. Пусть  $x_i = P_i$  и  $y_i = v_i$ , тогда в линейной формулировке  $y = kx + b$ , причем податливость

$$k = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2}, \quad (5)$$

где  $n$  — число точек.

Учитывая соотношение  $k = \Delta v / \Delta P$ , определяли смещение  $u$  по формуле (2), а далее — длину трещины  $a$  по формуле (3). Находили длины трещины  $a_i$  на каждом цикле. Полученных значений много и они имеют разброс, поэтому необходимо аппроксимировать зависимости  $N = f(a)$  и  $a = f(N)$ . Метод наименьших квадратов шестого порядка позволил определить уравнения, соответствующие набору точек  $\{a_i; N_i\}$ :

$$N_i = d_0 + d_1 a_i + d_2 a_i^2 + d_3 a_i^3 + d_4 a_i^4 + d_5 a_i^5 + d_6 a_i^6, \quad (6)$$

$$a_i = g_0 + g_1 N_i + g_2 N_i^2 + g_3 N_i^3 + g_4 N_i^4 + g_5 N_i^5 + g_6 N_i^6. \quad (7)$$

Коэффициенты уравнений (6) и (7) приведены в таблице.

Набор точек  $\{a_i; N_i\}$  является дискретной функцией, ее рассеивание относительно функции математического ожидания  $a = f(N)$  можно описать среднеквадратическим отклонением [9]

$$\sigma(a) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (a_i - a_{appi})^2}, \quad (8)$$

где  $a_i$  — экспериментально определенная длина трещины на  $i$ -м цикле;  $a_{appi}$  — длина трещины согласно

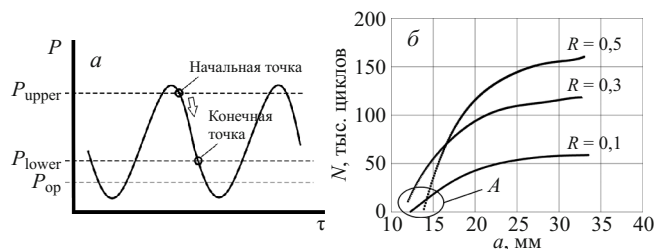


Рис. 3. Иллюстрация к расчету податливости по нисходящему полциклу (а) и кривые  $N = f(a)$  испытаний с различным коэффициентом асимметрии  $R$  (б)

аппроксимирующей функции на  $i$ -м цикле;  $n$  — число циклов. Величины среднеквадратического отклонения и арифметического среднего также представлены в таблице.

Кривая  $N = f(a)$  и условия нагружения являются исходными данными для получения кривой  $da/dN = f(\Delta K)$ . Для ее построения использовали простой метод интервала, включающий следующий алгоритм расчета:

1. Определение конечной точки  $a_{end}$  текущего интервала  $[a_0; a_{end}]$  по формуле

$$a_{end} = a_0 + \Delta a_{int}, \quad (9)$$

где  $a_{end}$  — конечная длина трещины интервала;  $a_0$  — начальная длина трещины интервала;  $\Delta a_{int}$  — длина интервала.

Рассмотрение интервалов начинается с наименьшей длины трещины и движется в восходящем направлении по кривой  $N = f(a)$  в сторону больших длин.

2. Определение величин  $N_0$  и  $N_{end}$ , соответствующих  $a_0$  и  $a_{end}$  по формуле (9).

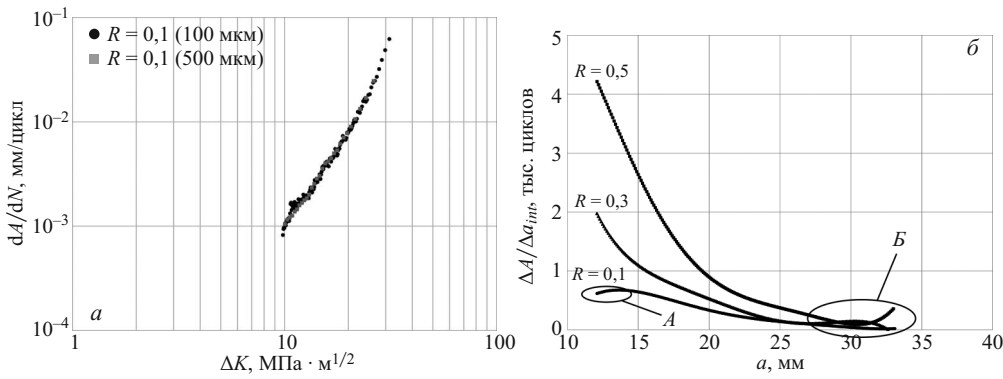
3. Нахождение величин  $a_0$  и  $a_{end}$ , соответствующих  $N_0$  и  $N_{end}$  в оригинальном наборе точек  $\{N_i; a_i\}$ .

4. Расчет податливости  $(\Delta v / \Delta P)_j$  на интервале  $[N_0; N_{end}]$  как среднего арифметического податливостей, входящих в рассматриваемый интервал, с использованием оригинального набора точек  $\{N_i; a_i\}$ .

5. Определение смещения  $u_j$  и длины трещины  $a_j$  по формулам (2) и (3).

Значения коэффициентов уравнений (6) и (7) и некоторых статистических показателей дискретной функции  $\{a_i; N_i\}$

$R$	$d_0$	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$d_5$	$d_6$
0,1	$4,6882 \cdot 10^5$	$-1,5598 \cdot 10^5$	$1,9103 \cdot 10^4$	$-1,1388 \cdot 10^3$	36,516	$-6,0769 \cdot 10^{-1}$	$4,1309 \cdot 10^{-3}$
0,3	$-1,8177 \cdot 10^6$	$4,7634 \cdot 10^5$	$-5,2816 \cdot 10^4$	$3,2069 \cdot 10^3$	$-1,0943 \cdot 10^2$	1,9658	$-1,4452 \cdot 10^{-2}$
0,5	$-2,1198 \cdot 10^5$	$-1,6332 \cdot 10^5$	$3,6113 \cdot 10^4$	$-2,82 \cdot 10^3$	$1,0826 \cdot 10^2$	-2,0697	$1,5786 \cdot 10^{-2}$
	$g_0$	$g_1$	$g_2$	$g_3$	$g_4$	$g_5$	$g_6$
0,1	12,498	$-2,8499 \cdot 10^{-5}$	$3,3949 \cdot 10^{-8}$	$-2,6266 \cdot 10^{-12}$	$9,5801 \cdot 10^{-17}$	$-1,6315 \cdot 10^{-21}$	$1,0642 \cdot 10^{-26}$
0,3	11,769	$-4,8628 \cdot 10^{-5}$	$8,3676 \cdot 10^{-9}$	$-3,0572 \cdot 10^{-13}$	$5,6789 \cdot 10^{-18}$	$-5,0072 \cdot 10^{-23}$	$1,6922 \cdot 10^{-28}$
0,5	13,948	$-1,8041 \cdot 10^{-5}$	$3,9163 \cdot 10^{-9}$	$-1,1541 \cdot 10^{-13}$	$1,6047 \cdot 10^{-18}$	$-1,0288 \cdot 10^{-23}$	$2,5119 \cdot 10^{-29}$
$R$	Среднеквадратическое отклонение $\sigma(a)$ , мм		Среднее арифметическое $\bar{a}$ , мм		Количество точек $n$		
0,1	0,157		17,8		$5,7795 \cdot 10^4$		
0,3	0,195		16,6		$1,16898 \cdot 10^5$		
0,5	0,103		18,3		$1,58273 \cdot 10^5$		



**Рис. 4.** Диаграммы усталостного разрушения при  $R = 0,1$ , полученные методом интервалов с размерами  $\Delta a_{int}$ , равными 100 и 500 мкм (а), а также зависимости  $\Delta N/\Delta a_{int} - a_j$  при  $a_{int} = 100$  мкм (б)

6. Определение номера цикла  $N_j$ , соответствующего длине трещины  $a_j$ , как середины интервала  $[N_0; N_{end}]$ :

$$N_j = \frac{N_0 + N_{end}}{2}. \quad (10)$$

7. Нахождение скорости роста трещины

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_j = \frac{a_j - a_{j-1}}{N_j - N_{j-1}}. \quad (11)$$

8. Расчет размаха КИН, соответствующего  $(da/dN)_j$ , по формуле [7]

$$\Delta K = \Delta \frac{P}{B\sqrt{W}} \frac{2+\alpha}{(1-\alpha)^{3/2}} \times (0,886 + 4,64\alpha - 13,32\alpha^2 + 14,72\alpha^3 - 5,6\alpha^4), \quad (12)$$

где  $\alpha = a/W$ .

9. Переход к следующему интервалу с прибавлением  $\Delta a_{int}$  к  $a_0$  и  $a_{end}$ .

Варьирование длины интервала показало, что для обработки результатов испытаний образца из сплава 2024-T3 подходит  $\Delta a_{int} = 100$  мкм. В этом случае количество точек  $\{a_i; N_i\}$  достаточно, чтобы получить плавную зависимость  $da/dN = f(\Delta K)$ . На рис. 4, а для сравнения представлены зависимости  $(da/dN)_j - \Delta K_j$  при  $R = 0,1$  с  $\Delta a_{int}$ , равной 100 и 500 мкм. Несмотря на то что полученные точки хорошо ложатся на одну кривую, при  $\Delta a_{int} = 100$  мкм число точек  $j = 150$ , а при  $\Delta a_{int} = 500$  мкм — всего лишь  $j = 28$ . Большое число точек желательно, так как при построении кривой  $da/dN = f(\Delta K)$  результат метода оказывает влияние на величину коэффициентов. Кроме того, при увеличении размера  $\Delta a_{int}$  точки начинают охватывать меньший диапазон скоростей роста.

Метод более точен при меньших длинах трещин. На рис. 4, б приведена зависимость  $(\Delta N/\Delta a_{int})_j - a_j$ , показывающая количество точек  $\Delta N$ , приходящееся на расчетный интервал  $\Delta a_{int} = 100$  мкм при определенной длине трещины  $a$ . Очевидно падение  $\Delta N$  с ростом  $a$ , поэтому для больших длин целесообразно использовать иной метод. Участки А и Б демонстрируют откло-

нения, обусловленные неточностью аппроксимации и величиной расчетного интервала  $\Delta a_{int}$ . Область кривой на участке А мала и соответствует малой скорости роста, поэтому неточность можно не принимать во внимание. Область кривой на участке Б больше и типична для всех кривых, однако для высоких скоростей роста лучше применить иной метод.

По методу интервала формируют набор точек, основываясь на первом встреченном значении длины трещины  $a_{end}$ , которое удовлетворит критерию

$$a_{end} \geq a_0 + \Delta a_{int}. \quad (13)$$

Поэтому этот метод дает завышенные значения длины трещины. На рис. 5, а показано, что кривая  $a = f(N)$ , проведенная через точки  $a_0$  и  $a_{end}$ , пролегает выше аппроксимирующей кривой  $a = f(N)$ .

Как отмечено выше,  $\Delta N/\Delta a_{int}$  уменьшается с ростом длины трещины  $a$  (см. рис. 4, б), поэтому число точек  $\{a_i; N_i\}$ , входящих в рассматриваемый интервал, падает, что приводит к неточностям в области больших длин трещин. Метод интервала работает до тех пор, пока не появляются отклонения (см. рис. 4, б, участок Б).

5. На рис. 3, б представлена зависимость  $N = f(a)$  для образца из сплава 2024-T3. Участок А демонстрирует разницу начальных длин трещин.

Помимо метода интервала, можно также использовать метод точек со следующим алгоритмом расчета.

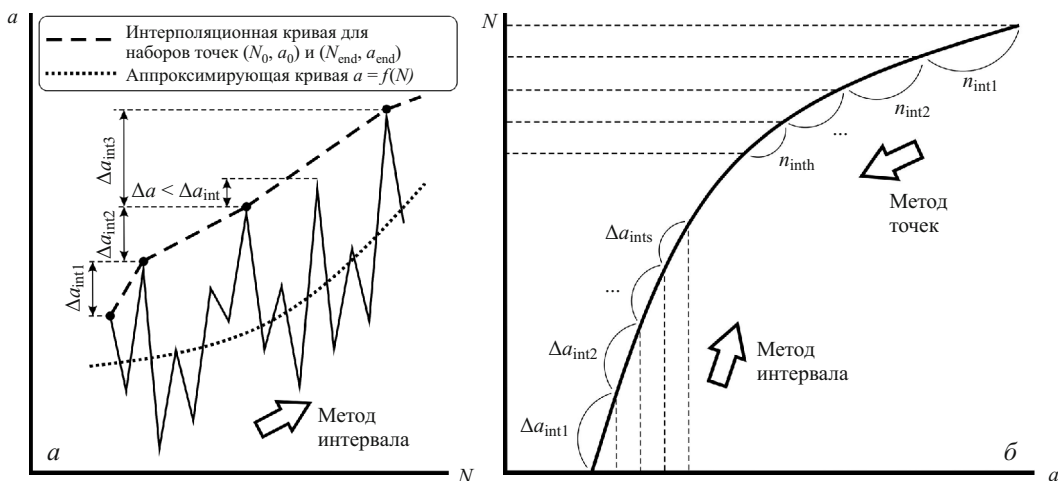
1. Оригинальный набор точек  $\{N_i; a_i\}$  разбивают на интервалы по  $n_{int}$  точек начиная с конца.

2. Определяют податливость  $(\Delta v/\Delta P)_j$  на интервале  $[N_0; N_{end}]$  как среднее арифметическое податливостей, входящих в рассматриваемый интервал, с использованием оригинального набора точек  $\{N_i; a_i\}$ .

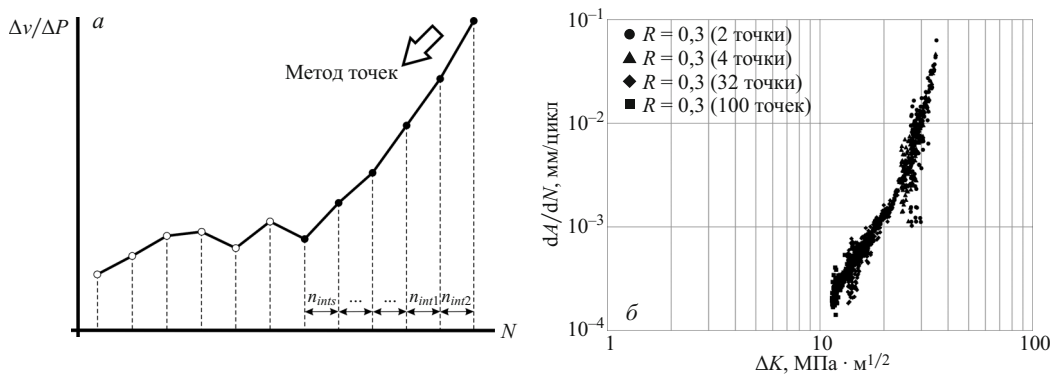
3. Определяют смещение  $u_j$  и длину трещины  $a_j$  по формулам (2) и (3).

4. Находят номер цикла  $N_j$ , соответствующий длине трещины  $a_j$ , как середину интервала  $[N_0; N_{end}]$  по формуле (10).

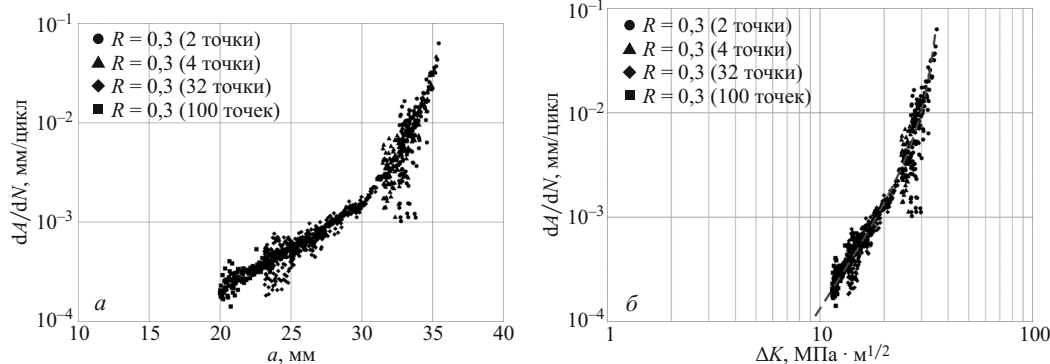
5. Рассчитывают скорость роста трещины  $(da/dN)_j$ , используя данные текущего и предыдущего интервалов, по формуле (11).



**Рис. 5.** Кривая  $a=f(N)$  по методу интервалов в сравнении с аппроксимирующей кривой (а), а также подходы к выбору интервалов в методах интервала и точек (б)



**Рис. 6.** Изменение податливости с уменьшением числа циклов (а), а также взаимосвязь границы применимости метода точек  $a_{\min}$  и количества точек  $n_{\text{int}}$  в интервале (б)



**Рис. 7.** Кривая  $da/dN=f(a)$  для различных наборов точек испытания при  $R=0,3$  (а) и кривая  $da/dN=f(\Delta K)$ , полученная с помощью адаптивного метода точек с изменением количества точек интервала  $n_{\text{int}}$  для аппроксимации области устойчивого роста трещины (б)

6. Определяют размах КИН, соответствующий  $(da/dN)_j$ , по формуле (12).

7. Переходят к следующему интервалу.

Согласно методу точек начинают подбор интервалов с конечной длины трещины и далее двигаются в нисходящем направлении по кривой дискретной функции  $N=f(a)$  в сторону меньшей длины трещины (рис. 5, б).

Зачастую метод точек не позволяет рассмотреть всю кривую  $N=f(a)$ ; двигаясь в нисходящем направлении по кривой  $\Delta v/\Delta P=f(N)$ , можно обнаружить рост  $\Delta v/\Delta P$  при снижении  $N$  при малой длине трещины (рис. 6, а). Это интерпретируется так, что в определенный момент уменьшается длина трещины  $a$  при

увеличении числа циклов  $N$ , что абсурдно. Поэтому последний интервал  $n_{\text{ints}}$  на рис. 6, а не достигает начала кривой.

Сравнение кривых  $da/dN=f(a)$  при  $R=0,3$  методом точек продемонстрировало взаимосвязь границы применимости метода точек  $a_{\min}$  и количества точек  $n_{\text{int}}$  (рис. 6, б). При  $n_{\text{int}}=2$  граница применимости  $a_{\min}=32,6$  мм, при  $n_{\text{int}}=4$  —  $a_{\min}=31,5$  мм, при  $n_{\text{int}}=32$  —  $a_{\min}=23,2$  мм, при  $n_{\text{int}}=100$  —  $a_{\min}=20$  мм. Кроме того, с увеличением количества точек  $n_{\text{int}}$  снижается охват больших длин.

На рис. 7, а представлена кривая  $da/dN=f(K)$  на основе  $da/dN=f(a)$  для различных наборов точек. Если каждому методу присвоить свой интервал на

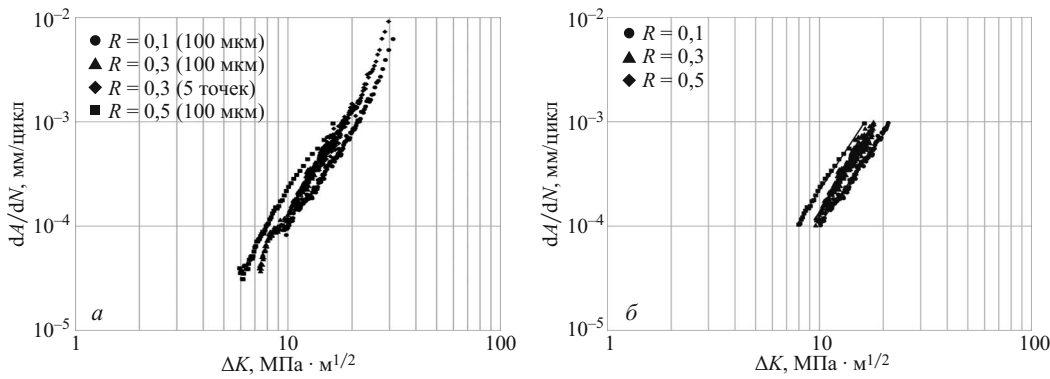


Рис. 8. Итоговые кривые  $da/dN = f(\Delta K)$ , полученные в результате испытаний с различным  $R$  (а) и области кривых  $da/dN = f(\Delta K)$ , принадлежащие диапазону скоростей  $da/dN = 10^{-4} - 10^{-3}$  мм/цикл (б)

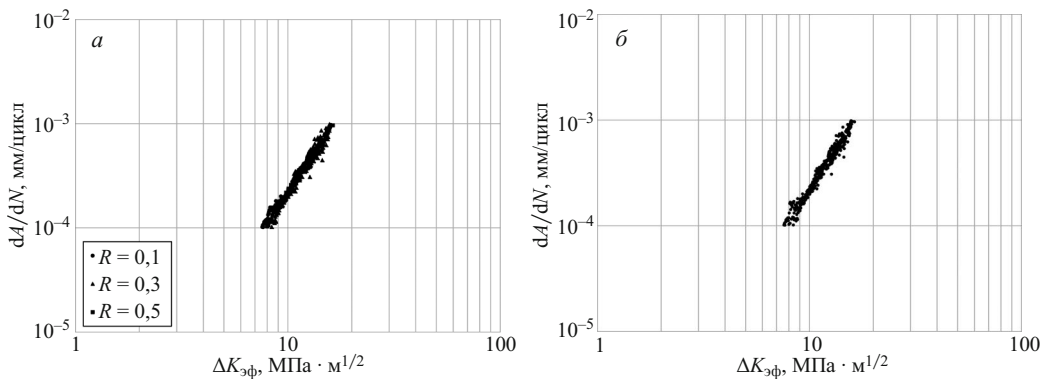


Рис. 9. Область диаграммы усталостного разрушения с учетом закрытия трещины для испытаний с различным  $R$  (а) и область обобщенной диаграммы усталостного разрушения, принадлежащая диапазону  $da/dN = 10^{-4} - 10^{-3}$  мм/цикл (б)

кривой  $da/dN = f(K)$ , ограниченный с одной стороны  $a_{\min}$ , а с другой — концом кривой или интервалом соседнего метода, и двигаться в нисходящем направлении в сторону меньших  $\Delta K$ , то можно получить набор точек  $da/dN = f(\Delta K)$  (рис. 7, б). Варьируя  $n_{\text{int}}$  в рамках адаптивной модификации метода точек, можно описать участок устойчивого разрушения (см. рис. 1). Конечная точка будет вязкостью разрушения  $K_c \approx 36$ , что согласуется с данными по сплаву 2024-T3. Аппроксимируя верхнюю часть кривой, получим коэффициент  $q$  уравнений скорости роста, например Формэна – Метту [10]:

$$\frac{da}{dN} = C \left( \frac{1-f}{1-R} \Delta K \right)^m \frac{\left( 1 - \frac{\Delta K_{th}}{\Delta K} \right)^p}{\left( 1 - \frac{K_{\max}}{K_c} \right)^q}, \quad (14)$$

где  $f$  — функция открытия трещины;  $p, q$  — коэффициенты околорогового участка и устойчивого разрушения;  $K_{\max}$  — максимальное КИН цикла.

Для рассмотрения режима Пэриса, лишённого воздействий соседних участков диаграммы усталостного разрушения, целесообразно перейти к исследованию  $da/dN = f(\Delta K)$  на диапазоне  $da/dN = 10^{-4} - 10^{-3}$  мм/цикл, распределив точки в зависимости от  $R$  и опустив не попадающие в этот диапазон. Отметим параллельность  $da/dN = f(\Delta K)$  при разных  $R$ , что свидетельствует о сходных значениях коэффициента Пэриса  $m$ , характеризующего наклон кривых.

На основании кривых, показанных на рис. 8, б, определяли коэффициенты уравнения Пэриса исходя из предположения, что  $\Delta K = \Delta K_{\text{эф}}$ , т.е. закрытие трещины игнорировали. На практике же  $R \approx 0,4 - 0,5$  — наименьшее значение  $R$ , при котором закрытие трещины не наблюдается. Поэтому испытание при  $R = 0,5$  мы полагаем эталонным.

Таким образом, удалось учесть закрытие трещины и перейти от кривых  $da/dN = f(\Delta K)$  к кривым  $da/dN = f(\Delta K_{\text{эф}})$ , которые легли вдоль одной линии (рис. 9, а). Далее точки трех кривых  $da/dN = f(\Delta K_{\text{эф}})$  использовали для создания обобщенного набора точек зависимости  $da/dN = f(\Delta K_{\text{эф}})$  (рис. 9, б). После этого с помощью аппроксимации МНК степенной функцией вида  $y = ax^b$  получили итоговые значения коэффициентов Пэриса:  $c = 2,07 \cdot 10^{-7}$ ;  $m = +3,028$ .

Количество точек  $\{(da/dN)_j; (\Delta K_{\text{эф}})_j\}$  отличается в каждом испытании, поэтому их статистический «вес» различен: если точек  $j$  в конкретном испытании больше, чем в других, тем менее корректно обобщение. Так, для испытания при  $R = 0,3$  число точек примерно в 1,5 раза больше, чем при  $R = 0,1$  и в 2,5 раза больше, чем при  $R = 0,5$ .

Представленная методика отработана на алюминиевом сплаве 2024-T3. Размеры интервала  $\Delta a_{\text{int}}$  и количество точек  $n_{\text{int}}$  отобраны путем сравнительного анализа различных значений этих параметров. Однако рекомендованные значения  $\Delta a_{\text{int}}$  и  $n_{\text{int}}$  могут быть применены и для прочих алюминиевых сплавов.

Расчет проводили в собственных программах и в среде Microsoft Excel. Программы будут представлены для общего пользования на сайте.

Методика является одним из этапов работы по получению диаграммы усталостного разрушения, которая должна лечь в основу нового подхода по оценке трещиностойкости, описывающего комбинированное действие эффекта закрытия трещины и остаточных напряжений [4]. Этот подход позволит оценивать долговечность конструкций под действием спектрального нагружения [11].

С помощью разработанной методики можно успешно описать диаграмму усталостного разрушения и определить коэффициенты Пэриса. Использование двух различных методов аппроксимации — метода точек и метода интервалов — позволяет варьировать точность определения. Методика может быть применена и для описания области устойчивого роста трещины.

Авторы статьи благодарят коллектив сотрудников BiSS Labs и лично генерального менеджера BiSS доктора Р. Сундера (г. Бангалор, Индия) за помощь в проведении научно-исследовательских работ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Sunder R.** Unraveling the Science of Variable Amplitude Fatigue / Journal of ASTM International. 2012. Vol. 9. N 1. P. 20 – 65.
2. **Shijve J.** Fatigue of Structures and Materials. — Delft: Springer, 2009. — 621 p.
3. **Bannantine J. A., Corner J. J., Handrock J. L.** Fundamentals of Metal Fatigue Analysis. — New Jersey: Prentice Hall, 1989. — 273 p.
4. **Bekal S.** Calculation of Fatigue Crack Growth on Variable Amplitude Loading: Master thesis. Manipal Institute of Technology. — Manipal, India. 2013. — 118 p.
5. **Sunder R.** Engineering Application of Threshold Stress Intensity. ASTM-ESIS Annual Symposium on Fracture Mechanics, Florida, USA, 13 – 15 Nov., 2013. P. 24 – 48.
6. Сервогидравлическая машина для испытания материалов BiSS Nano [Электронный ресурс]. URL: [http://biss.in/cms/index.php?option=com\\_content&view=article&id=69&Itemid=111](http://biss.in/cms/index.php?option=com_content&view=article&id=69&Itemid=111).
7. Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates ASTM E647-08, 2008. — 45 p.
8. **Трошенко В. Т., Лебедев А. А., Стрижало В. А.** Механическое поведение материалов при различных видах нагружения. — Киев: Логос, 2000. — 571 с.
9. **Горяинов В. Б., Павлов И. В., Цветкова Г. М.** Математическая статистика. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. — 424 с.
10. **Forman R. G., Mettu S. R.** Behavior of Surface and Corner Cracks Subjected to Tensile and Bending Loads in Ti-6Al-4V Alloy. Fracture Mechanics: 26th ASTM Symposium, Philadelphia, USA, ASTM STP 1131. 1992. Vol. 1. P. 519 – 546.
11. **Savkin A. N., Sedov A. A., Andronik A. V.** The steel damageability simulation under random loading by the power, energetical and strain fracture criterions / Periodica Polytechnica. Mechanical Engineering. 2014. Vol. 58. N 2. P. 119 – 126.

## REFERENCES

1. **Sunder R.** Unraveling the Science of Variable Amplitude Fatigue / Journal of ASTM International. 2012. Vol. 9. N 1. P. 20 – 65.
2. **Shijve J.** Fatigue of Structures and Materials. — Delft: Springer, 2009. — 621 p.
3. **Bannantine J. A., Corner J. J., Handrock J. L.** Fundamentals of Metal Fatigue Analysis. — New Jersey: Prentice Hall, 1989. — 273 p.
4. **Bekal S.** Calculation of Fatigue Crack Growth on Variable Amplitude Loading: Master thesis. Manipal Institute of Technology. — Manipal, India. 2013. — 118 p.
5. **Sunder R.** Engineering Application of Threshold Stress Intensity. ASTM-ESIS Annual Symposium on Fracture Mechanics, Florida, USA, 13 – 15 Nov., 2013. P. 24 – 48.
6. Servohydraulic machine for material testing BiSS Nano. URL: [http://biss.in/cms/index.php?option=com\\_content&view=article&id=69&Itemid=111](http://biss.in/cms/index.php?option=com_content&view=article&id=69&Itemid=111).
7. Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates ASTM E647 – 08, 2008. — 45 p.
8. **Troshenko V. T., Lebedev A. A., Strizhalo V. A.** Mekhanicheskoe povedenie materialov pri razlichnykh vidakh nagruzheniya [Mechanical behavior of materials under various loading modes]. — Kiev: Logos, 2000. — 571 p. [in Russian].
9. **Goryainov V. B., Pavlov I. V., Tsvetkova G. M.** Matematicheskaya statistika [Mathematical statistics]. — Moskva: Izd. MGTU im. N. É. Bauman, 2001. — 424 p. [in Russian].
10. **Forman R. G., Mettu S. R.** Behavior of Surface and Corner Cracks Subjected to Tensile and Bending Loads in Ti-6Al-4V Alloy. Fracture Mechanics: 26th ASTM Symposium, Philadelphia, USA, ASTM STP 1131. 1992. Vol. 1. P. 519 – 546.
11. **Savkin A. N., Sedov A. A., Andronik A. V.** The steel damageability simulation under random loading by the power, energetical and strain fracture criterions / Periodica Polytechnica. Mechanical Engineering. 2014. Vol. 58. N 2. P. 119 – 126.