



## РАСЧЕТНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РОСТА УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН В НЕСУЩИХ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ ПРИ СЛУЧАЙНОМ СПЕКТРЕ ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

Академик НАН Украины **В. И. МАХНЕНКО**, **И. Ю. РОМАНОВА**, канд. техн. наук  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрена методика расчетного прогнозирования роста усталостных трещин в усилении одностороннего стыкового шва продольной балки грузового вагона-платформы при заданном спектре случайного циклического нагружения. Показано, что последовательность приложения элементов спектра нагружения существенно влияет на долговечность конструкции. Применение в расчетах метода Монте-Карло позволяет получить вероятностные характеристики отказа, связанные со случайным приложением циклической нагрузки.

*Ключевые слова:* сварные конструкции, грузовой вагон-платформа, усталостная трещина, циклическое нагружение, метод Монте-Карло, вероятность отказа, коэффициент динамичности, расчетное прогнозирование долговечности

Многие современные ответственные конструкции (сооружения) длительного срока эксплуатации подвергаются переменной нагрузке во времени, имеющей случайный характер. При этом достаточно хорошо изучены элементы этих спектров, т. е. размахи нагрузок и их частотность. Однако последовательность приложения размахов таких нагрузок во времени вызывает определенные затруднения при расчетном прогнозировании развития усталостных трещин из-за его существенной нелинейности относительно геометрических размеров трещины. В этом случае обычно используют наиболее консервативный подход, при котором элементы спектра нагружения выстраивают последовательно, начиная с наибольшего размаха нагрузок и заканчивая наименьшим [1]. Степень консервативности такого подхода при соответствующих спектрах нагружения может существенно превышать разумные пределы, т. е. приводить к существенному расхождению между расчетными и экспериментальными результатами. В этой связи при выборе последовательности выстраивания элементов спектра нагружения заслуживает внимания использование методов теории случайных событий [2] и др. Этому вопросу и посвящена настоящая работа.

Рассматривается поверхностная (полуэллиптическая) трещина (рис. 1), когда ее характерные геометрические размеры  $c$  и  $a$  за один цикл  $\Delta N = 1$  изменения нагрузки возрастают в соответствии с уравнением [1]

$$\frac{dl}{dN} = C_0 \Delta K_1^m(l), \text{ если } \Delta K_1^l > \Delta K_{th}(R); (l = a, c);$$

$$\frac{dl}{dN} = 0, \text{ если } \Delta K_1^l < \Delta K_{th}(R), \quad (1)$$

где  $\Delta K_1^l$  — размах изменения коэффициента интенсивности напряжений  $K_1(l)$  соответственно в вершинах трещины, имеющей размеры  $c$  и  $a$  (рис. 1);

$$\Delta K_1^l = K_1^{\max}(l) - K_1^{\min}(l); \quad (2)$$

$$R = K_1^{\min} / K_1^{\max}; \quad (3)$$

$C_0$  и  $m$  — экспериментальные характеристики материала в зоне трещины [1];  $\Delta K_{th}(R)$  — пороговое значение  $K_1(l)$ , полученное экспериментально [1].

Значения  $K_1^{\max}(l)$  и  $K_1^{\min}(l)$  определяют по известным из работы [1] и другим зависимостям с учетом размеров трещин  $l$  и заданных элементов спектра нагрузки  $P_j$  (рис. 2), а также нерелаксированных остаточных напряжений  $\sigma_{res}$  в зоне трещины.

Численное интегрирование уравнений (1)–(3) при заданных начальных размерах трещины  $l_0 =$

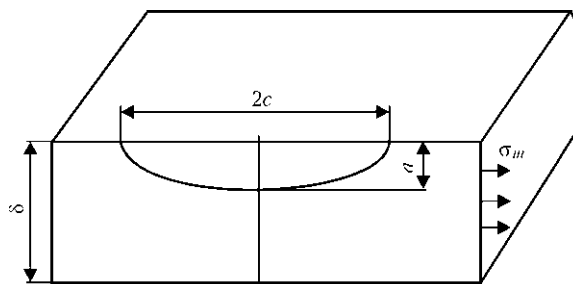


Рис. 1. Схема поверхностной (полуэллиптической) трещины в элементе конструкции толщиной  $\delta$ , нагруженной мембранными напряжениями  $\sigma_m$

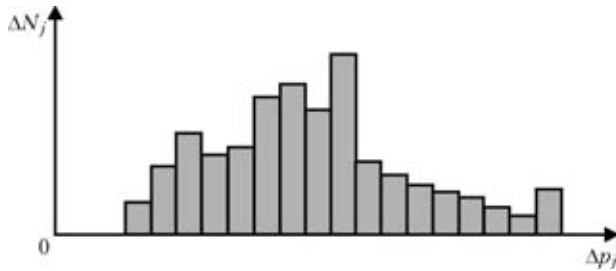


Рис. 2. Схема спектра циклического нагружения  $\Delta N_j$  при заданном размахе нагрузки  $\Delta p_j$

=  $a_0$ ,  $c_0$  позволяет определить  $l(N)$  в зависимости от  $N$  до критических размеров  $l_{кр}$  трещины, при которых наступает период ее спонтанного роста, определяемый условием:

$$Y = -K_r + f(L_r) < 0, \quad (4)$$

где  $K_r = \frac{K_I^{max}(l)}{K_{IC}}$ ;  $L_r = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_T} \leq L_r^{max} = \frac{\sigma_T + \sigma_B}{2\sigma_T}$ ;  $K_{IC}$  —

вязкость разрушения материала в зоне трещины;  $\sigma_T$  — предел текучести;  $\sigma_B$  — временное сопротивление материала в зоне соединения трещины;  $\sigma_{ref} = \sigma_{ref}(l)$  — напряжения в зоне трещины при нагрузке  $P_j^{max}(N)$ , ответственные за механизм пластической неустойчивости [1].

При  $L_r > L_r^{max}$  в (4) принимается  $f(L_r) = 0$ , что соответствует разрушению по механизму пластической неустойчивости.

Зависимость  $f(L_r)$  при  $L_r \leq L_r^{max}$  обычно аппроксимируется уравнением [1]

$$f(L_r) = (1 - 0,14L_r^2) [0,3 + 0,7 \exp(-0,65L_r^6)]. \quad (5)$$

Уравнения (1)–(5) описывают долговечность роста усталостной трещины ( $a_0 \times 2c_0$ ) при детерминированной последовательности приложения элементов спектра циклической нагрузки (рис. 2). Для учета случайного характера приложения такой нагрузки в работе предлагается использовать метод Монте-Карло [3], в соответствии с которым на каждом шаге прослеживания элемент спектра  $j$  выбирается с помощью датчика случайных чисел  $0 \leq \Phi \leq 1$  и таблицы соответствия между  $j$  и  $\Phi$ . Получаемые в результате критические значения  $l_{кр} = a_{кр}$ ,  $c_{кр}$  и  $N_{кр}$  являются случайными величинами. Повторяя процесс прослеживания  $Z$  раз, получаем выборку значений  $N_{кр}$ , для которой находим среднее значение долговечности  $N_{кр}(Z)$ . При достаточной презентабельности выборки ( $N_{кр}(Z) \approx \text{const}$  при увеличении  $Z$ ) рассчитываются вероятностные кривые отказа  $P_{от}(N_{кр})$ .

Рассмотрим конкретный пример применения изложенного подхода. На рис. 3 показана схема одностороннего стыкового шва усиления про-

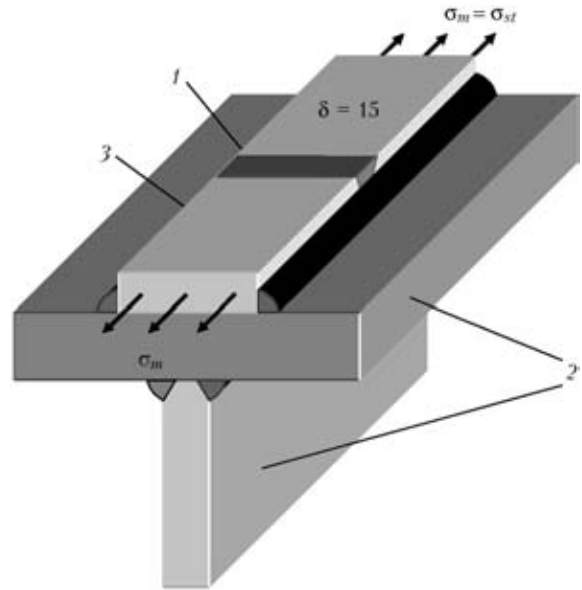


Рис. 3. Схема продольной связи рамы вагона-платформы с усилением в виде накладной полосы с односторонним стыковым швом: 1 — односторонний стыковый шов; 2 — продольная связь рамы; 3 — усиливающая накладка

дольной балки грузового вагона-платформы, выполненного из стали 09Г2С.

Постулируется, что возможны отдельные непровлавления в корне стыкового шва в виде поверхностных трещин размером  $a_0 \times 2c_0$ . Поперек стыкового шва действуют относительно оси рамы вагона продольные напряжения, связанные с вертикальной нагрузкой (изгибом рамы)  $\sigma_{st}$ . Согласно [4], в зависимости от скорости движения вагона-платформы можно определить амплитуду динамических (циклических) напряжений, используя расчетный коэффициент динамичности  $K_d$  ( $j = 1 \dots 10$ )

**Расчетные значения  $K_d$  в зависимости от  $w_j$  и нормированное в [4] количество циклов нагружения  $\Delta N_j$  в общей долговечности  $N_\delta = 1 \cdot 10^7$  цикл**

$j$	$w_j$ , м/с	$K_d$	$p_j$	$\Delta N_j \cdot 10^{-5}$ , цикл
1	6,25	0,0625	0,03	3
2	13,75	0,1375	0,07	7
3	16,25	0,1800	0,09	9
4	18,75	0,2400	0,12	12
5	21,25	0,3000	0,16	16
6	23,75	0,3600	0,19	19
7	26,25	0,4200	0,16	16
8	28,75	0,4800	0,10	10
9	31,25	0,5400	0,06	6
10	33,75	0,6000	0,02	2

Примечание.  $\Delta N_j = p_j N_\delta$ .

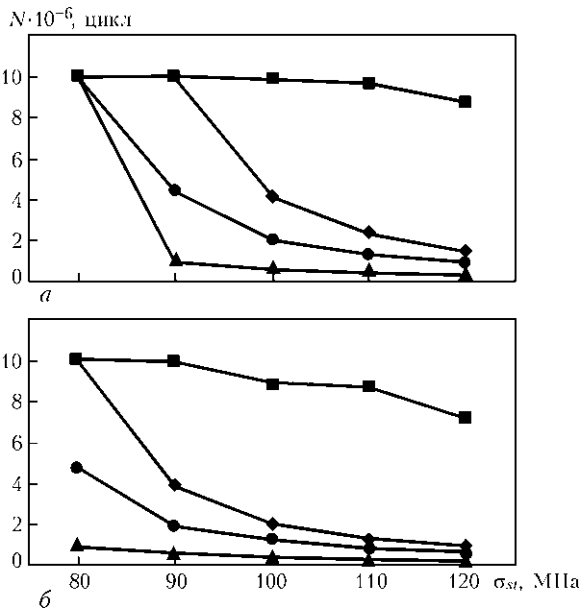


Рис. 4. Результаты расчетов долговечности для постулируемой трещины размером  $a_0 \times 2c_0 = 1 \times 6$  мм (а) и более глубокой исходной трещины размером  $a_0 \times 2c_0 = 2 \times 6$  мм (б) при различных значениях нагрузки  $\sigma_{st}$ , полученных с помощью детерминированного расчета и методом Монте-Карло ( $P_{от} = 0,05$ ):  $\blacklozenge$  — пропорциональное приложение нагрузки;  $\blacksquare$ ,  $\blacktriangle$  — последовательные приложения циклической нагрузки соответственно с  $j = 1$  и  $10$ ;  $\bullet$  — по методу Монте-Карло

$$\sigma_a = 0,5K_d \sigma_{st} \quad (6)$$

В таблице приведены значения  $K_d$  [4], полученные в зависимости от скорости движения вагона-платформы  $w_j$ , а также доли  $p_j$  в общем количестве циклов нагружения при его движении с данной скоростью, что позволяет для базовой долговечности  $N_0$  определить количество циклов нагружения  $\Delta N_j$  при размахе мембранных напряжений в зоне стыка  $\Delta \sigma_j = 2K_d \sigma_{st}$ .

В расчетах использовали зависимости (1)–(6) по [1] при

$$m = 3; C_0 = 5 \cdot 10^{-13} \left[ \frac{\text{ММ}}{(\text{МПа}\sqrt{\text{ММ}})^m} \right]; K_1^{\max} = \sigma_{\max} \frac{\sqrt{\pi l}}{Q} F_p; Q = [1 + 1,464(a/c)^{1,65}]^{0,5}; \quad (7)$$

$$F_l = [M_1 + M_2(a/\delta)^2 + M_3(a/\delta)^4] q_p;$$

$$q_a = 1; q_c = 1,1 + 0,35(a/\delta)^2; M_1 = 1,13 - 0,09(a/\delta);$$

$$M_2 = -0,54 + \frac{0,89}{0,2 + (a/c)}; \quad (8)$$

$$M_3 = 0,5 + \frac{1}{0,65 + (a/c)} + 14(1 - a/c)^{24} \text{ при } a/c < 1,0.$$

Значения  $K_1^{\min}$  рассчитываются по (7), но вместо  $\sigma_{\max}$  подставляется  $\sigma_{\min}$ .

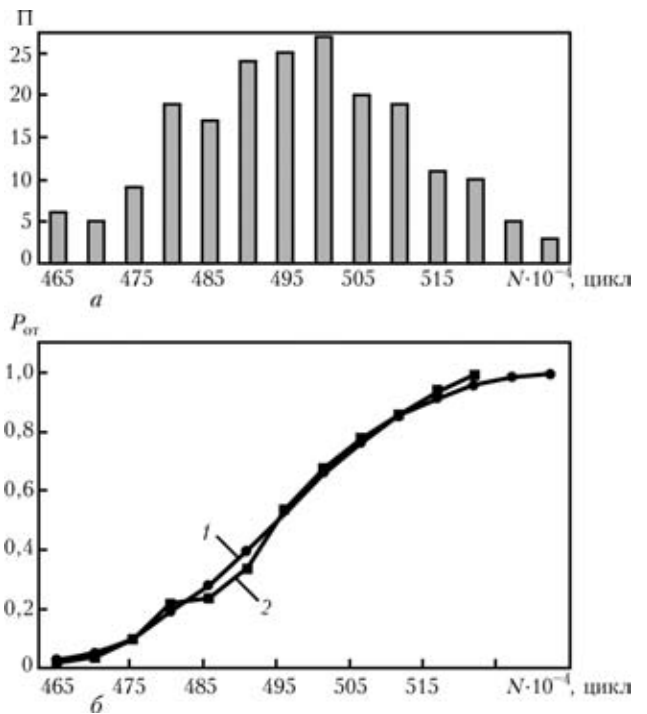


Рис. 5. Частотность  $\Pi(N)$  (а) и вероятность отказа  $P_{от}(N)$  (б) в зависимости от долговечности  $N$ , полученные для трещинообразного дефекта ( $a_0 = 2$  мм,  $c_0 = 3$  мм) при  $\sigma_{st} = 80$  МПа: а — 200 случайных вариантов; б — 200 (1) и 50 (2) случайных вариантов

Значение  $\Delta K_{th}$  в (1) для углеродистых и низколегированных сталей в зоне сварных соединений по [4] определяется зависимостями

$$\Delta K_{th} = 190 - 144R, \text{ но менее } 62 \text{ МПа}\cdot\text{мм}^{1/2}; \quad (9)$$

$$\sigma_{ref} = \sigma_{\max} \frac{\delta}{\sigma - a}; \sigma_r = 330 \text{ МПа}; L_r^{\max} = 1,33; \delta = 15 \text{ мм}; K_{IC} = 2210 \text{ МПа}\cdot\text{мм}^{1/2}. \quad (10)$$

На рис. 4, а приведены результаты детерминированного расчета долговечности роста постулируемой трещины ( $a_0 = 1$  мм,  $c_0 = 3$  мм) до критических размеров, определяемых условиями (4), (5), при последовательном приложении циклической нагрузки (таблица) от  $j = 1$  до 10 и от 10 до 1 и пропорциональном присутствии в шаге прослеживания  $\Delta N_{ш} = 1000$  цикл всех  $j$ -х элементов спектра, т. е. в количестве  $\Delta N_{ш}^j = 1000(\Delta N_j/N_j)$ , а также результаты расчета по методу Монте-Карло при вероятности отказа  $P_{от} = 0,05$ . Аналогичные данные, полученные для более глубокой исходной трещины ( $a_0 \times 2c_0 = 2 \times 6$  мм), представлены на рис. 4, б. Из них видно, что наиболее консервативные результаты по долговечности отказа соответствуют детерминированному расчету последовательно от наибольшей нагрузки. Расчет по методу Монте-Карло при  $P_{от} = 0,05$  менее консервативен. Расчеты при последовательности от меньшей нагрузки к наибольшей сопряжены с риском завышения долго-

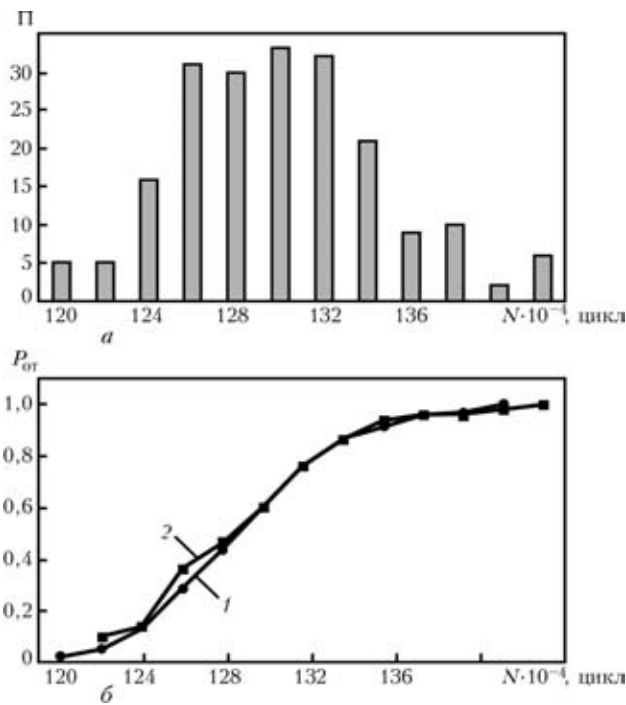


Рис. 6. То же, что на рис. 5, но при  $\sigma_{st} = 100$  МПа

вечности. То же, но в меньшей степени имеет место при пропорциональном присутствии всех элементов спектра нагрузки на каждом шаге прослеживания. Метод Монте-Карло наиболее полно учитывает случайность в приложении элементов спектра нагрузок, позволяя получить вероятностные характеристики отказа, связанные со случайным приложением циклической нагрузки (рис. 5–7). Благодаря этим данным достаточно четко выявляется область эффективно варьируемых значений долговечностей. При изменении вероятности отказа в пределах 0,05...0,95 эта область для начальной трещины ( $a_0 = 2$  мм,  $2c_0 = 6$  мм) при  $\sigma_{st} = 80$  МПа составляет от  $N = 4,7 \cdot 10^6$  до  $5,2 \cdot 10^6$  цикл; при  $\sigma_{st} = 100$  МПа — от  $N = 1,22 \cdot 10^6$  до  $1,38 \cdot 10^6$  цикл, а при  $\sigma_{st} = 120$  МПа — от  $N = 0,620 \cdot 10^6$  до  $0,725 \cdot 10^6$  цикл.

Таким образом, при заданном спектре случайного циклического нагружения детерминирован-

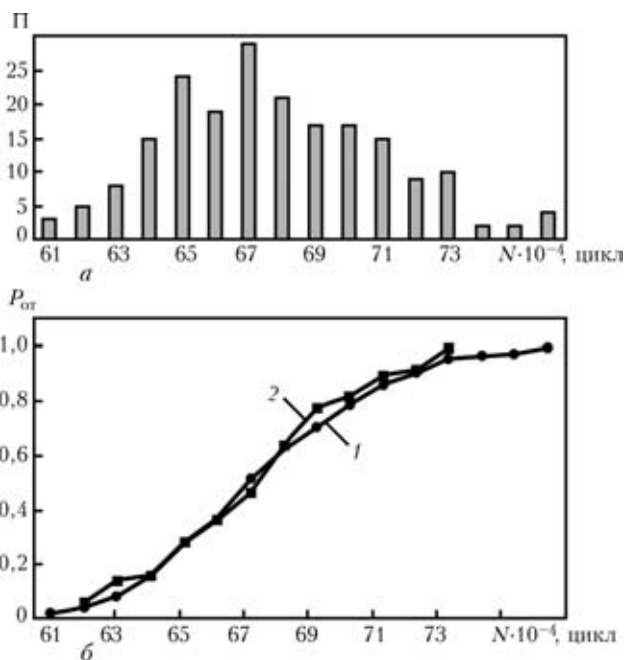


Рис. 7. То же, что на рис. 5, но при  $\sigma_{st} = 120$  МПа

ный подход к расчетному прогнозированию долговечности роста усталостной трещины до критического состояния дает результаты, которые существенно отличаются от последовательности приложения элементов спектра нагружения. Использование метода Монте-Карло позволяет обоснованно решать проблему случайности нагрузки в рамках существующих детерминированных расчетных схем роста усталостных трещин и критериев достижения критических размеров.

1. *Recommendations for fatigue design of welded joints and components.* — S. l., [1996]. — 154 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XIII-1539-96/XV-845-96).
2. *ISO SD 16708. Petroleum and natural gas industrial. Pipeline transportation system. Reliability.* — Based limit state methods. — Введ. в окт. 2000.
3. *Соболь И. М. Численные методы Монте-Карло.* — М.: Наука, 1973. — 311 с.
4. *Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных).* — М.: ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. — 300 с.

The paper deals with the procedure of theoretical prediction of fatigue crack growth in the reinforcement of a one-sided butt weld on a longitudinal beam of a freight flat-car at a specified spectrum of random cyclic loading. It is shown that the sequence of application of the loading spectrum elements markedly affects the structure fatigue life. Application of Monte-Carlo method in calculations allows obtaining probabilistic characteristics of failure related to random application of cyclic load.

Поступила в редакцию 10.02.2009