

РОСТ ПОВЕРХНОСТНЫХ ТРЕЩИН ПРИ РЕГУЛЯРНОМ И СЛУЧАЙНОМ ПРОЦЕССАХ НАГРУЖЕНИЯ

ВИКТОРОВ В. В., ЗЛОЧЕВСКИЙ А. Б., МАХУТОВ Н. А.,
МЕЛЬНИЧУК П. П.

Приведены результаты испытаний крупногабаритных пластин с поверхностной трещиной при различных режимах гармонического и случайного нагружения. Установлена взаимосвязь между характеристиками циклической трещиностойкости материала и статистическими характеристиками процесса нагружения.

1. Вычисление кинетики роста трещины, основанное на предположении о степенной зависимости между интенсивностью приращения трещины за цикл нагрузки da/dN и размахом коэффициента интенсивности напряжений ΔK , осуществляется с помощью эмпирических выражений различного типа:

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^m; \quad \frac{da}{dN} = C \frac{\Delta K^m}{(1-\rho) K_c - \Delta K} \quad (1)$$

где ρ — коэффициент асимметрии цикла нагрузки. В этих уравнениях амплитуда нагрузки принимается постоянной, а параметры циклической трещиностойкости материала обычно получают на образцах с «большой» сквозной трещиной.

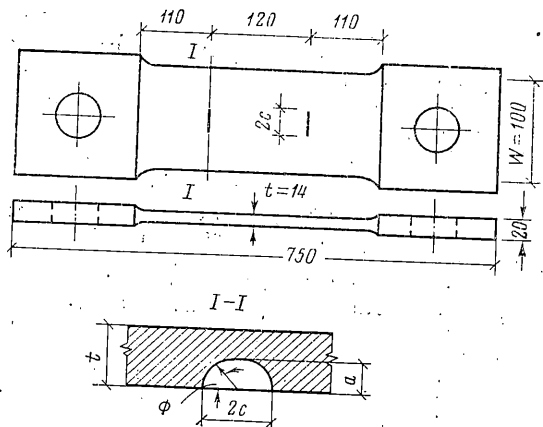
Вместе с тем наиболее вероятный вид начального дефекта — подповерхностная или небольшая поверхностная трещина глубиной $a \leq 0,1 t$ (где t — толщина листа), а эксплуатационные воздействия на сооружение имеют, как правило, случайный характер.

Для вычисления скорости роста трещины при нерегулярном нагружении случайный процесс заменяется блочным. Блоки формируются из 7–9 ступеней, причем шкала времени T заменяется шкалой числа циклов N . Уровень нагрузки и число циклов каждой ступени назначается в соответствии с плотностью распределения экстремумов случайного процесса. Испытания проводят при усредненной (эффективной) частоте эксплуатационной нагрузки; частотный спектр моделируемого процесса никак не учитывается. Чередование ступеней в блоке принимается произвольным: либо в убывающей, либо в возрастающей последовательности. При этом вычисление приращения трещины на каждой ступени блока осуществляется с использованием принципа линейного суммирования, т. е. без учета взаимодействия амплитуд разных уровней. Вместе с тем известно, что изменение последовательности ступеней в блоках оказывает существенное влияние на скорость развития усталостной трещины [1], а растягивающие выбросы процесса (перегрузки) значительно снижают скорость роста трещины [2]. Поэтому критерием достоверности моделирования кинетики роста трещины в эксплуатационных условиях могут служить только результаты испытаний при случайном нагружении, моделирующем основные статистические характеристики эксплуатационного процесса.

В этой связи задачи настоящего исследования включали: изучение кинетики роста поверхностной трещины при заданных режимах регулярного, блочного и случайного нагружения; сравнение характеристик циклической трещиностойкости исследуемой стали, полученных в направлении малой и большой полуоси поверхностной трещины и на образцах со сквозной трещиной; изучение влияния на скорость роста усталостной трещины взаимодействия амплитуд при блочном нагружении и редких выбросов (перегрузок) при случайном режиме нагружения.

2. Исследования проводились на плоских образцах с поверхностными надрезами. Форма и размеры образца показаны на фиг. 1. Все образцы вырезаны вдоль направления проката из одного 20-мм листа ст. 09Г2С ($\sigma_T = 350$ МПа, $\sigma_B = 560$ МПа, $\psi = 64,9\%$). Для получения поверхностных трещин исходные надрезы глубиной $a_0 = 3,5$ –4 мм и шириной $2c_0 = 18$ –20 мм выполняли тонкой (0,13 мм) дисковой фрезой диаметром 26 мм. У вершин надрезов перпендикулярно направлению роста трещины наносили риски с шагом 1 мм. В процессе циклического нагружения по рискам с помощью измерительной лупы (с ценой деления 0,1 мм) фиксировали приращение трещины на поверхности пластины. Для регистрации границы фронта трещины в толще листа периодически испытательную машину останавливали для введения в надрез быстросохнущей красящей жидкости.

Измерение деформированного состояния перед вершиной трещины и оценку размера пластической зоны $r_{T(c)}$ в направлении ее большей полуоси (c) выполняли с помощью прямоугольных розеток тензорезисторов (с базой 0,5 мм), скомпонованных в виде бесперывных печочек [3]. Размер пластической зоны $r_{T(a)}$ в направлении продолжения малой полуоси (a) определяли методом микротвердости на шлифах, вырезанных перпендикулярно плоскости трещины [4]. С этой целью данные измерения распределения микротвердости за фронтом трещины сопоставляли с тарировочной зависимостью «микротвердость — интенсивность деформации», полученной при растяжении образцов исследуемой стали.



Фиг. 1

Для изучения влияния на циклическую трещиностойкость деформационного упрочнения стали заготовки для изготовления образцов перед расточкой проушины и нанесением надрезов растягивали до уровня деформаций $\epsilon \approx 1,6\%$.

Испытание образцов случайным воздействием осуществляли на электрогидравлических машинах фирмы MFL в ИМАШ АН СССР и «Инстрон» в ИПМ АН СССР. Разработанная программа нагружения RANDOM¹) обеспечила моделирование с помощью компьютера нормального псевдослучайного стационарного процесса $P(T)$ и передачу управляющего сигнала для отработки испытательной установки. Программа позволяет задавать следующие числовые характеристики процесса: математическое ожидание $M_{P(T)}$, стандарт $S_{P(T)}$, скорость нагружения и параметры α и β нормированной корреляционной функции процесса, аппроксимированной выражением

$$k(\tau) = \exp[-\alpha|\tau| (\cos \beta\tau + (\alpha/\beta) \sin \beta|\tau|)] \quad (2)$$

Параллельно со случайным режимом усталостные испытания образцов проводили и синусоидальным нагружением на пульсаторе ЦДМ-100 (при частоте $\omega = 5,7$ 1/с). Из-за отсутствия критериев эквивалентности между случайным и регулярным нагружением по интенсивности вызываемых ими усталостных повреждений в испытываемом объекте соответствие параметров сравниваемых процессов (гармонического и случайного) проводили по формальному признаку — по равенству их статистических характеристик. Поскольку дисперсия регулярного процесса равна половине квадрата амплитуды, то эквивалентная амплитуда соответствующего гармонического нагружения $P^* = 2^{1/2} S_{P(T)}$, средний уровень $\langle P \rangle = M_{P(T)}$ и частота $\omega = \langle \omega_m \rangle$, где $\langle \omega_m \rangle$ — средняя (эффективная) частота положительных пересечений среднего уровня случайного процесса (в 1/с).

Образцы испытывали при четырех режимах стационарного нагружения²), характеристики которых приведены в табл. 1, где $\langle \omega_e \rangle$ — средняя частота положительных экстремумов; n — номер режима; $S_{\Delta\sigma}$ — стандарт размахов полных циклов, пересекающих средний уровень процесса (в МПа); $R_H = \langle \omega_m \rangle / \langle \omega_e \rangle$ — коэффициент нерегулярности, характеризующий степень широкополосности процесса ($R_H = 1/\beta$ в обозначениях [5]). Значение этого коэффициента изменяется в пределах $0 \leq R_H \leq 1$, причем для регулярного процесса $R_H = 1$.

Характер функции F_{\max} режима 1 ($R_H = 0,86$) соответствует релеевскому распределению, а режима 2 ($R_H = 0,69$) — нормальному распределению. Согласно [5], такие режимы следует квалифицировать, соответственно, как узкополосный и сравнительно широкополосный. Режим 4 — наиболее широкополосный; параметры корреляционной функции этого процесса ($\alpha = 0,42$ и $\beta = 0,36$) приняты такими же, как у корреляционной функции ветровой нагрузки.

Функция плотности распределения экстремумов всех четырех моделируемых режимов случайного нагружения имела ограничения «сверху» и «снизу» — $\sigma_H, \max(\min) = \pm 2,8 S_{\sigma_H}$. Заданные границы усечения случайного процесса позволили устранить неопределенность результатов конкретных испытаний, поскольку из-за ограниченного срока проведения эксперимента нельзя судить о появлении в этот период редких выбросов за уровни $\pm(4-6)S_{\sigma_H}$.

¹ См.: Злочевский А. Б., Злочевский Д. А., Викторов В. В., Вавакин А. С., Степанов Л. П., Исигов Н. Е. Методические особенности исследования поверхностных трещин при стационарном случайном нагружении. М., 1985.— 14 с. Деп. в ВИНТИ 2.08.85; № 5794—85.

² В таблице нагрузок $P(T)$ заменены номинальными напряжениями $\sigma_H(T)$ в сечениях рабочей части образцов; размерность напряжений — МПа.

Таблица 1

n	M_{σ_H}	S_{σ_H}	α	β	$\langle \omega_m \rangle$	$\langle \omega_e \rangle$	$S_{\Delta\sigma}$	R_H	$\langle \sigma_H \rangle$	σ^*_a	σ_H, \max	$\rho = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$
1	102	33	0,1	0,7	0,95	1,1	95,3	0,86	106	46,2	152,2	0,36
2	101	32	1,0	0,7	2,15	3,15	88,1	0,69	106	46,2	152,2	0,36
3	141	45	1,0	0,7	1,25	1,81	107,6	0,69	142,8	63,3	206,1	0,38
4	141	33	0,42	0,36	0,93	1,86	95,5	0,58	—	—	—	—

Таблица 2

μ	A			B		
1	0,7	0,79	0,88	0,7	0,79	0,83
2	$4S_{\sigma_H}$	$5S_{\sigma_H}$	$6S_{\sigma_H}$	—	—	—
3	1,16	1,32	1,48	1,56	1,78	2,0
4	1,56	1,78	2,0	—	—	—

Таблица 3

$n_1 = 1$	2	3	4	5	6	7	8
0,35	0,38	0,41	0,44	0,47	0,50	0,53	0,56
0,28	0,25	0,22	0,19	0,16	0,13	0,10	0,07
6,066	7,077	6,571	4,718	3,033	1,635	0,842	0,337
18	21	19,5	14	9	5	2,5	1

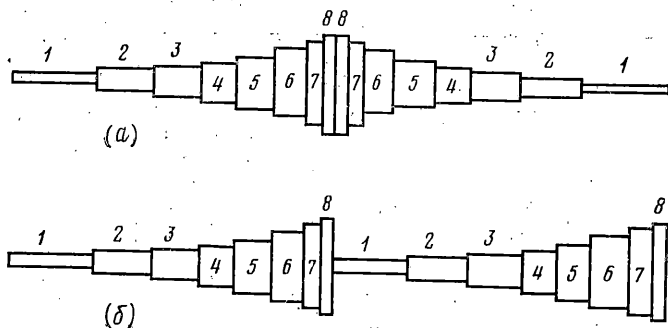
Влияние таких выбросов на скорость роста трещины исследовалось при специально создаваемых перегрузках (выбросах), уровни которых приведены в табл. 2. Здесь μ — вид базового стационарного процесса: A — случайный, B — гармонический; 1 — уровни выбросов (с положительной производной) $\sigma(B_i)/\sigma_T$; 2 — превышение выбросом среднего уровня процесса; 3 — относительный уровень выброса $\sigma(B_i)/\sigma_H, \max$; 4 — относительный уровень выброса $\sigma(B_i)/(\langle \sigma \rangle + \sigma_a)$.

Циклическое нагружение (случайное или гармоническое) после воздействия выброса осуществлялось по 2-му режиму нагружения (табл. 1). Относительная глубина поверхностных трещин при приложении перегрузки составляла $a/t = 0,35 - 0,4$.

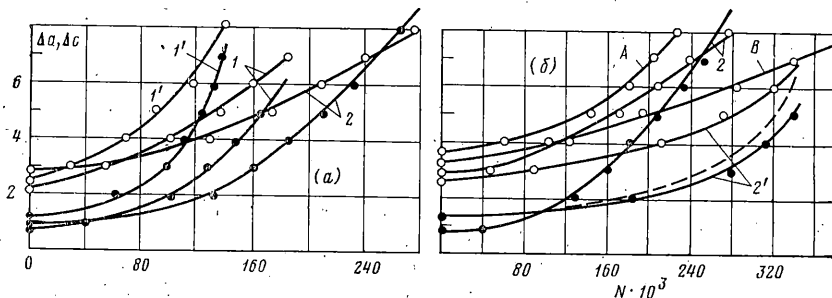
Помимо испытаний при случайном и регулярном нагружении образцы подвергали также блочному нагружению. Блоки формировали из восьми ступеней в соответствии с функцией плотности распределения экстремумов случайного процесса второго режима (табл. 1). Состав типового блока и порядок следования ступеней n_1 при двух режимах блочного нагружения (фиг. 2) приведен в табл. 3. Первая и вторая строки соответствуют σ_{\max}/σ_T и σ_{\min}/σ_T ; третья строка — $N \cdot 10^3$ циклов; четвертая — относительное число циклов.

3. На фиг. 3 приведены некоторые из полученных зависимостей приращения фронта поверхностной трещины Δa (светлые точки) и Δc (темные точки) от числа циклов нагружения N . На фиг. 3, а показана кинетика роста трещины при двух

³ Для случайных процессов принято $N = \langle \omega_m \rangle \cdot T$, где T — время нагружения в с.



Фиг. 2



Фиг. 3

режимах случайного процесса — узкополосного (1) и широкополосного (2), а также при эквивалентном по статистическим характеристикам гармоническом нагружении (кривые 1'). При одинаковых значениях среднего уровня $M_{\sigma H} \approx 100$ МПа и стандарта $S_{\sigma H} \approx 32$ МПа средняя скорость роста трещины при узкополосном процессе нагружения ($R_H = 0,86$) в 1,6 раза выше, чем при широкополосном ($R_H = 0,69$). Статистически эквивалентное гармоническое нагружение вызывает еще более интенсивный рост трещины. На фиг. 3, б для сравнения приведены графики роста трещины при двух режимах блочного нагружения (фиг. 2) и при широкополосном случайном режиме 2, по функции плотности распределения экстремумов которого были скомпонованы блоки. Приведенные данные свидетельствуют о том, что в зависимости от последовательности ступеней в идентичных по составу блоках скорость роста трещины может быть и выше и ниже, чем при воздействии исходного случайного процесса. В том случае, когда имеет место плавное повышение, а затем плавное снижение уровня ступеней (режим а), скорость роста трещины при блочном нагружении выше, чем при случайном.

При блочном нагружении по режиму б переходы от максимального к минимальному уровню — так называемые перегрузки — вызывают эффект замедления роста трещины. Этот эффект в значительной степени зависит от размера образовавшейся при перегрузке пластической зоны. Так, приложение перед воздействием случайного нагружения (по режиму 2) однократной перегрузки, но высокого уровня ($\sigma(B_j) = 0,8 \sigma_T$) вызывает более существенное торможение роста трещины, чем при блочном режиме б. Характерно, что после перегрузки (кривые 2 на фиг. 3, б) не только замедлилось развитие трещины, но и изменилось соотношение между интенсивностью ее роста в направлении полюсов а и с. Штриховой кривой на фиг. 3, б показана кинетика замедленного роста трещины $\Delta c - \Delta N$, рассчитанная по методике [6] при относительном уровне перегрузки $\sigma(B_j) / \sigma_{H, \max} = 1,32$.

Числовые данные, характеризующие рост трещины при всех исследованных режимах случайного нагружения, приведены в табл. 4: μ_1 — верхняя и нижняя границы значений; $T_{(\Delta a)}$, $T_{(\Delta c)}$ — время нагружения (в мин) и $N_{(\Delta a)}^*$, $N_{(\Delta c)}^*$ — число циклов (в тыс.), соответствующее приращению трещины на $\Delta a = \Delta c = 4$ мм; $\langle v_a \rangle$ и $\langle v_c \rangle$ — средняя скорость роста трещины в направлении полюсов а и с (в мм/цикл · 10⁻⁵).

Влияние на скорость роста трещины спектрального состава процесса нагружения можно проследить сравнивая режимы 1, 2 и 4. Изменение коэффициента пере-

гулярности от $R_H=0,86$ до $R_H=0,58$ (табл. 1) привело к снижению средней скорости роста трещины примерно в 2,4 раза. Повышение в 1,4 раза среднего уровня нагрузки $M_{сн}$ при одинаковой широкополосности процессов (режимы 2 и 3) вызвало увеличение скорости роста трещины в 2,3–2,5 раза. Результаты испытания образцов, изготовленных из предварительно деформированных заготовок (строка 3 в табл. 4) и нагруженных по режиму 3, показали, что деформирование металла растяжением до уровня $\epsilon=1,6\%$ оказало незначительное влияние на его циклическую трещиностойкость.

4. Изменение границы фронта поверхностной трещины в период ее развития изучали на изломах образцов по контуру окрашивающих меток. По мере роста трещины от исходного надреза ее форма трансформируется, однако приближенно может быть принята полуэллиптической с полуосями a и c . При $a/c < 0,6$ и $a/t < 0,45$, трещина быстрее растет в направлении толщины пластины ($\phi = \pi/2$). Отношение a/c достигает максимума ($\sim 0,7$) при $a/t \approx 0,65-0,75$, а затем уменьшается и при приближении фронта трещины к задней поверхности пластины $a/c \approx 0,64$. Следует отметить, что область применения зависимости, приведенной на фиг. 4, ограничена только случаем приложения циклического растяжения. Если в сечении действует также циклический изгиб, то кинетика формы трещины будет другой.

Для построения диаграмм циклической трещиностойкости стали при исследованных режимах нагружения значения коэффициента интенсивности напряжений вдоль фронта трещины определялись по формуле

$$K_1 = \sigma_H (\pi a / Q)^{1/2} \cdot F(a/t, a/c, \phi), \quad (3)$$

$$Q = 1 + 1,464 (a/c)^{1,65}$$

Поправочную функцию F определяли для $\phi = \pi/2$ и $\phi = 0$ с помощью эмпирических зависимостей, полученных Ньюменом и Райо [7] при аппроксимации большого числа вариантов значений коэффициента интенсивности напряжений, вычисленных с помощью трехмерных конечных элементов для различных сочетаний значений a/t и a/c .

Для геометрических параметров поверхностных трещин, рассмотренных в табл. 4 ($\langle a \rangle / t = 0,6$ и $a/c = 0,7$), значения поправочной функции F в наиболее глубокой точке и на поверхности практически равны: $F(\phi = \pi/2) = 1,28$ и $F(\phi = 0) = 1,26$. Однако скорость роста трещины в направлении полуосей a и c не одинакова: согласно табл. 4, $\langle v_{(a)} \rangle / \langle v_{(c)} \rangle \approx 0,9$. Следовательно, при определении коэффициента интенсивности напряжений выражение (3), полученное на основе анализа упругих напряжений, нуждается в коррекции. Такая коррекция обычно выполняется с учетом размера пластической зоны у вершины трещины.

Результаты измерения протяженности пластической зоны $r_T(a)$ (кривая 1) и $r_T(c)$ (кривая 2) в направлении $\phi = \pi/2$ и $\phi = 0$ в зависимости от уровня коэффициента интенсивности напряжений, вычисленного по формуле (3), приведены на фиг. 5. Там же построены кривые, полученные с использованием выражений Ирвина $r_T = (1/\pi) (K_1/\sigma_T)^2$ (кривая 3) и Дагдейла⁴⁾ $r_T = (\pi/8) (K_1/\sigma_T)^2$ (кривая 4). На фиг. 5 r_T — в мм, K_1 — в МПа·м^{1/2}.

Как видно из фигуры, эти кривые даже по характеру отличаются от экспериментальных, однако при малых размерах пластической зоны $r_T < 1,5$ мм выражение Ирвина дает значения r_T , близкие к экспериментальным.

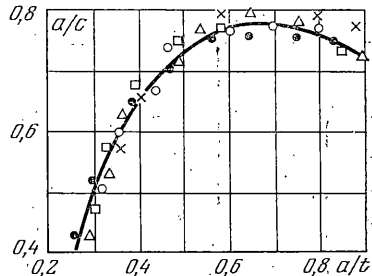
Согласно приведенным опытным данным, при всех уровнях нагрузки размеры пластической зоны $r_T(c)$ на поверхности больше, чем в наиболее глубокой точке фронта трещины $r_T(a)$ и с увеличением значений коэффициента интенсивности напряжений $r_T(c)$ возрастает интенсивнее, чем $r_T(a)$.

5. Полученные зависимости были использованы для вычисления поправочных функций $\psi(a)$ и $\psi(c)$, учитывающих влияние на значение коэффициента интенсивности напряжений пластической зоны вблизи фронта трещины. Основываясь на известном представлении об эффективном размере трещины $a^* = a + r_T(a)$, ординаты графиков этих функций определяли как соотношение

$$\psi(a) = K_{1(a)}^* / K_{1(a)} = (F^*/F) (1 + r_T(a)/a)^{1/2} \quad (4)$$

где F^* — значение поправочной функции F при $a = a^*$ и $c = c^*$.

С использованием графиков поправочных функций $\psi(a)$ (кривая 1) и $\psi(c)$ (кривая 2), приведенных на фиг. 6, вычисляли максимальные значения коэффициента интенсивности напряжений при перегрузках и при построении (в соответствии с уравнением (1)) диаграмм циклической трещиностойкости исследованной ст. 09Г2С.



Фиг. 4

⁴ Бродяк Д. Основы механики разрушения. М.: Высш. школа, 1980. 368 с.

Таблица 4

n	μ_1	a_0	c_0	$T (\Delta a)$	$T (\Delta c)$	$N^* (\Delta a)$	$N^* (\Delta c)$	$\langle v_a \rangle$	$\langle v_c \rangle$	$\frac{\langle v_a \rangle}{\langle v_c \rangle}$
1	<i>B</i>	4,6	10,2	1225	1140	154,3	143,6	2,72	3,02	0,90
	<i>H</i>	4,2	10,0	1180	1050	147,2	132,3	2,59	2,78	0,93
2	<i>B</i>	4,1	10,2	2230	2280	287,7	294,1	1,40	1,61	0,87
	<i>H</i>	3,9	10,0	2200	1920	283,8	247,7	1,39	1,46	0,95
3'	<i>B</i>	4,1	10,1	1695	1335	127,1	100,1	3,21	4,28	0,76
	<i>H</i>	3,8	9,5	1660	1245	124,5	93,4	3,15	3,99	0,79
3	<i>B</i>	4,0	10,0	1520	1480	109,0	101,0	3,96	4,14	0,96
	<i>H</i>	3,8	9,5	1460	1340	98,5	96,6	3,67	3,96	0,92
4	<i>B</i>	4,2	10,1	6610	5830	370,1	325,3	1,16	1,31	0,88
	<i>H</i>	3,9	9,6	6160	5460	343,7	305,7	1,08	1,23	0,88

Таблица 5

n	1	1	2	3	3	4	5
m	3,38	3,63	3,48	3,40	3,35	3,39	3,5
C	1,58	1,07	0,63	1,18	1,16	0,59	1,12
D	0,6—4,0	0,7—6,0	0,4—2,0	0,8—8,0	0,8—9,0	0,4—2,5	10—100

Поскольку при построении зависимостей ($\lg v - \lg \Delta K_1$) для соответствующих режимов нагружения испытанных образцов оказалось, что экспериментальные точки, полученные при распространении трещины в направлении и малой и большой полуосей, располагаются в пределах одной полосы разброса, это позволило аппроксимировать такие зависимости общей прямой. Каждая из диаграмм, приведенных на фиг. 7, аппроксимирует результаты измерения кинетики роста не менее четырех трещин (в направлении $\phi = \pi/2$ и $\phi = 0$) и соответствует 50%-ному значению полосы разброса опытных точек, стандарт $\lg \Delta K$ составляет 0,11—0,013.

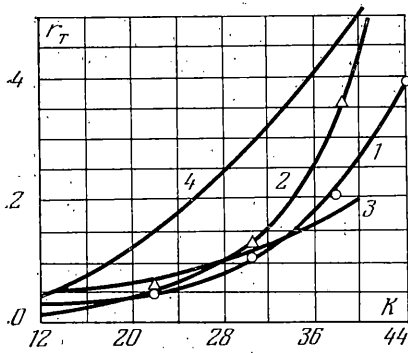
Для режимов случайного нагружения стандарт размахов коэффициента интенсивности напряжений $S_{\Delta K}$ вычисляли по $S_{\Delta \sigma_{сн}}$, а число циклов N — по частоте (ω_m) пересечений (с положительной производной) среднего уровня процесса.

Параметры аппроксимации диаграмм 1, приведенных на фиг. 7, даны в табл. 5. Здесь C — мм/цикл/(МПа·м^{1/2})^m·10⁻⁹, D — диапазон линейной аппроксимации диаграммы в мм/цикл·10⁻⁵, n — номер режима нагружения.

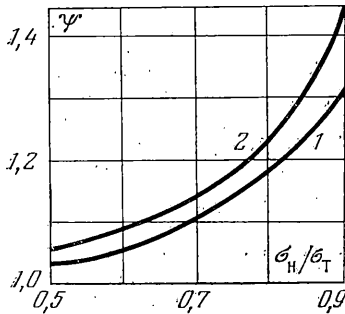
Диаграмма 1 построена по результатам испытаний образцов гармонической нагрузкой, статистические характеристики которой ($M_{сн}$ и $S_{сн}$) такие же, как у режимов случайного нагружения 1 и 2. Как отмечалось, скорость роста трещины при статистически эквивалентном гармоническом нагружении существенно (в 2,7—3,2 раза) выше, чем при случайном широкополосном (режим 2) и в 1,3—1,4 раза выше, чем при узкополосном режиме нагружения (1).

Для сравнения на фиг. 7 построена диаграмма 5, полученная в [8] при испытании внецентренным растяжением образцов из ст. 09Г2С, но с «большой» сквозной трещиной ($l=50-100$ мм). Параметры случайного нагружения указанных образцов со сквозной трещиной соответствуют режиму 1 настоящего исследования. Однако при испытании образцов с поверхностной трещиной ($a=6-12$ мм) стандарт размаха коэффициента интенсивности напряжений был в пределах: $S_{\Delta K}=12-25$ МПа·м^{1/2}, в то время как для образцов со сквозной трещиной: $S_{\Delta K}=24-50$ МПа·м^{1/2}; при этом диапазон скорости роста трещины в сравниваемых типах образцов отличается более, чем в 10 раз. Вместе с тем, несмотря на то, что сопоставление экспериментальных данных в таких испытаниях затруднено, полученные в результате значения параметров аппроксимации диаграмм циклической трещиноустойчивости исследованной стали оказались достаточно близкими — см. режим 1 и 5 в табл. 5.

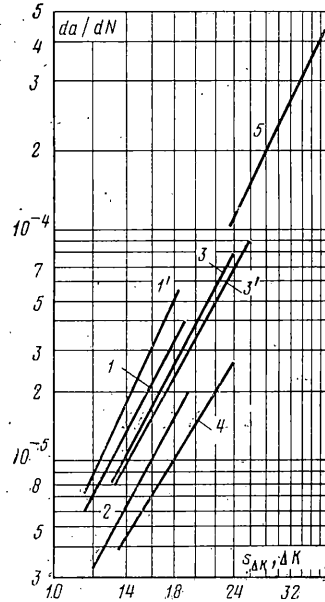
Результаты выполненного исследования позволили установить, что компоновка блочного нагружения в соответствии с функцией плотности распределения экстремумов моделируемого случайного процесса, но без учета взаимодействия амплитуд раз-



Фиг. 5



Фиг. 6



Фиг. 7

ных ступеней блока не обеспечивает идентичной скорости роста трещины при блочном и исходном случайном нагружении.

При случайных стационарных режимах нагружения скорость роста трещины существенно зависит от S_{AK} , M_K и R_N : возрастает при увеличении S_{AK} и M_K и уменьшается при увеличении степени нерегулярности (широкополосности) процесса. При замене реального стационарного случайного нагружения усеченным процессом (с границами усечения функции распределения экстремумов $\pm 3 S_{OH}$) влияние редких выбросов на скорость роста трещины можно компенсировать воздействием перегрузок заданного уровня (в пределах 4–6 S_{OH}), период которых определяется по формуле С. Райса [5].

Установлено, что при заданных режимах нагружения и одинаковом диапазоне значений коэффициента интенсивности напряжений (вычисленного с учетом размера пластической зоны) характеристики циклической трещиностойкости исследованной стали практически не зависят от направления полюсей поверхностной трещины и совпадают с характеристиками, полученными при испытании образцов со сквозной трещиной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wei R. P., Shih T. T. Delay in fatigue crack growth.— Internat. J. Fract., 1974, v. 10, No. 1, p. 77–85.
2. Wheeler O. E. Spectrum loading and crack growth.— Trans. ASME. J. Bas. Engng, 1972, v. 94, No. 1, p. 181–186.
3. Злочевский А. В., Мельничук П. П. Методика экспериментального определения коэффициента интенсивности напряжений для поверхностных трещин.— Заводск. лаборатория, 1984, № 4, с. 59–63.
4. Бондарович Л. А., Злочевский А. В., Патсаев В. Н., Чебаевский Б. П. Распределение интенсивности напряжений по толщине пластины вдоль фронта трещины.— Заводск. лаборатория, 1978, № 1, с. 91–95.
5. Болотин В. В. Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. М.: Стройиздат, 1982. 351 с.
6. Злочевский А. В., Бондарович Л. А., Шувалов А. Н. Влияние интенсивной перегрузки на кинетику роста усталостной трещины.— Физ.-хим. механ. материалов, 1979, № 6, с. 43–47.

7. Newman J. C., Raju I. S. An empirical stress-intensity factor equation for the surface crack.— Engng Fract. Mech., 1981, v. 15, No. 1-2, p. 185-192.
8. Злочевский А. В., Левин О. А., Мазугов Н. А. Определение циклической трещиностойкости при случайном режиме нагружения.— Заводск. лаборатория, 1984, № 12, с. 55-59.

Москва

Поступила в редакцию
14.IX.1984

УДК 539.375

ПРОБИТИЕ ХРУПКОРАЗРУШАЮЩЕЙСЯ ПРЕГРАДЫ ЖЕСТКИМ КОНУСОМ

ВОЕЙКОВ И. В., САГОМОНЯН А. Я.

Рассматривается вертикальное ударное пробитие хрупкообразующейся плиты толщины L жестким бойком с конической головной частью высоты h и конечным углом раствора 2β . Предполагается, что процесс взаимодействия бойка и преграды сопровождается образованием ударной волны, на которой происходит разрушение материала преграды. За волной среда находится в размельченном уплотненном состоянии с постоянной плотностью ρ , ненамного превышающей начальную плотность преграды ρ_0 ($b = \rho_0/\rho = \text{const}$).

Примем, что за ударной волной среда находится в состоянии идеальной пластичности с условием пластичности Треска $\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_s$, где σ_s — предел текучести при простом растяжении. На характер движения среды налагается следующее ограничение: частицы среды в области между ударной волной и поверхностью проникающей конической головной части бойка двигаются по траекториям, совпадающим с нормальными к этой поверхности. Обоснование такого приближения дано в [1]. Отсюда следует, что движение частиц среды будет происходить по поверхностям конусов, нормальных к поверхности проникающей конической головной части бойка (фиг. 1). Такое движение удобно описать в ортогональной системе, состоящей из конусов, соосных с проникающим, с вершинами в точках H_0 , ортогональных им конусов с вершинами в точках h_0 и полярного угла φ . Значения параметров Ламе $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ принятой системы координат H_0, h_0, φ определяются равенствами

$$\theta_1 = \sin \beta, \quad \theta_2 = \cos \beta, \quad \theta_3 = 1/2 (H_0 - h_0) \sin 2\beta \quad (1)$$

Область возмущенного движения среды разделим на три характерные зоны. Внешней границей первой зоны является криволинейная часть геометрического места точек фронтов ударной волны, вторая зона примыкает к прямолинейному участку этой кривой, внешней границей третьей зоны является часть тыльной поверхности преграды, находящейся в возмущенном движении (фиг. 1).

Глубину проникания (расстояние от вершины конической головной части проникающего бойка до лицевой поверхности преграды) обозначим $H(t)$. В первой зоне закон сохранения массы среды, прошедшей через ударную волну, записывается в виде равенства [1]:

$$2\pi\rho_0\theta_1\theta_2 \int_{H^0}^{H_{yb}} \theta_3 dH_0 = 2\pi\rho\theta_1\theta_2 \int_H^{H_{yb}} \theta_3 dH_0 \quad (2)$$

где $H^0 = -h_0 \text{ctg}^2 \beta$ — координата точки свободной поверхности преграды, с которой началось движение по поверхности соответствующего конуса h_0 (фиг. 1). Из равенства (2) после вычисления интегралов получим

$$(\eta_{yb}/\eta_h)^2 = a [1 - bh_0^2/(\sin^4 \beta \eta_h^2)] \quad (3)$$