УДК 669.14:539.431

DOI: 10.35211/1990-5297-2021-10-257-45-49

*А. Н. Савкин, А. А. Седов, К. А. Бадиков, А. Н. Барышников***МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ РОСТА
УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН СТАЛИ****Волгоградский государственный технический университет**

e-mail: savkin@vstu.ru

В данной работе исследована кинетика роста усталостной трещины на компактных образцах на растяжение (С(Т)), изготовленных из стали, на среднем участке кинетической диаграммы усталостного разрушения (КДУР) при регулярном и нерегулярном нагружении с различной асимметрией и максимальным значением нагрузки. Кинетика роста трещины была получена авторами экспериментально на современном сервогидравлическом испытательном оборудовании. Предложены параметры, оценивающие характер нерегулярного нагружения и закрытие трещины, а именно меры нерегулярности и коэффициента закрытия трещины. При расчете эффективного значения размаха коэффициента интенсивности напряжений (КИН) в устье трещины предлагается учитывать кроме коэффициента закрытия трещины также меру нерегулярности нагружения. Проведено прогнозирование продолжительности роста усталостной трещины с учетом ее «закрытия» и характера нагружения. Полученные результаты показали хорошую сходимость расчетных и экспериментальных данных, что подтверждают высокие значения коэффициента корреляции.

Ключевые слова: усталостное испытание, кинетика роста трещины, прогнозирование роста трещин, регулярное и нерегулярное нагружение.

*A. N. Savkin, A. A. Sedov, K. A. Badikov, A. N. Baryshnikov***MODELING AND CALCULATION OF FATIGUE CRACK GROWTH LIFE IN STEELS****Volgograd State Technical University**

In this work, we studied the kinetics of fatigue crack growth on compact steel tensile specimens (C (T)-type), in the middle section of crack growth diagram under regular and irregular loading with different asymmetries and maximum load. The crack growth kinetics was obtained by the authors experimentally on modern servo-hydraulic testing machine. Irregular loading was carried out using samples of standard loading spectra characteristic of various technical objects experiencing variable loading during operation. The values of the crack growth rate were obtained. Parameters that evaluate the character of irregular loading and crack closure, namely, irregularity factor and crack closure ratio were suggested. When calculating the effective value of the magnitude of the stress intensity factor (SIF) at the crack mouth, it is proposed to consider in addition to the closure coefficient and cracks also measure irregular loading. The fatigue crack growth life was predicted taking into account its “closure” and the nature of loading according to the approach proposed by the authors and the cyclic calculation method (cycle-by-cycle), all the data obtained are tabulated and distributed according to the type of loading. The results obtained showed good convergence of the calculated and experimental data, which confirms the high values of the correlation.

Keywords: fatigue test, assessment of crack growth kinetics, prediction of crack growth, regular and irregular loading.

Введение

Переменные нагрузки приводят к деградации прочностных характеристик – накоплению усталостных повреждений, возникновению в металле усталостных трещин и в ряде случаев к его разрушению. Если материал изделия испытывает регулярное циклическое нагружение с постоянными во времени параметрами циклической нагрузки, то продолжительность роста трещины можно оценивать на основании построения кривых выносливости [1], а при исследовании кинетики развития трещин по кинетической диаграмме усталостного разрушения (КДУР) [2,3].

Однако если нагружение носит нерегулярный характер, полученный на основе случайных выборок эксплуатационной нагруженности [4] или изучения динамической модели изделия [5], процесс оценки ресурса усложняется. В настоящей работе, на примере четырех сталей, проведен анализ кинетики роста усталостных трещин при регулярном (Constant Amplitude Loading CAL) и нерегулярном нагружении (Variable Amplitude Loading VAL) с учетом воздействия на процесс роста трещины разной величины асимметрии, амплитуды и характера переменного нагружения. Предложены модели прогнозирования продолжительности роста трещины на среднем участке КДУР [6,7].

Материалы и методы исследования

Испытания на трещиностойкость проводились на сервогидравлической машине BISS Nano-25kN на компактных образцах типа С(Т). До проведения основного испытания на образцах выполнялось предварительное растрескивание при регулярном нагружении до длины трещины $a = 13$ мм с параметрами нагрузки не превышающими 60 % от основного нагружения во избежание перегрузочных воздействий. Завершение испытания соответствовало окончанию участка стабильного роста трещины, что для данного типа образцов находилось в диапазоне 32–35 мм. Образцы были изготовлены из стали 09Г2, представленные в нормализованном состоянии. Использовались образцы толщиной 5 мм, длина и ширина образцов была одинаковой и составляла – 62.5×60 мм.

Экспериментальные исследования проводились с помощью специализированного программного обеспечения. Для измерения длины трещины использовался метод податливости, заключающийся в использовании датчика раскрытия трещины BISS Bi-06-201, измеряющего

расстояние между кромками образца. Испытания проводились на воздухе при нормальных условиях окружающей среды, частота основного вида нагружения – 10 Гц.

Моделирование кинетики и продолжительности роста трещины при регулярном и нерегулярном нагружениях

Исследования на трещиностойкость при регулярном нагружении заключались в проведении испытаний с асимметрией нагрузки R от 0 до 0.75 и величине максимального нагружения от 3.5 до 7 кН. Для испытаний при нерегулярном нагружении формировались спектры квазислучайного характера на основании стандартных спектров нагружения, характерных для переменного нагружения различных технических объектов и конструктивных элементов. Спектры SEASUS, SAEBRACKET, SAETRANS – укороченные спектры нагружения передней подвески, тормозного механизма и трансмиссии легкового автомобиля. Программы исследований по оценке кинетики и продолжительности роста усталостных трещины показаны в таблице.

Программа исследований и результаты расчета трещины для 09Г2

Нагружение	$P_{\max}$, кН	R	V	Q	N_3 , млн. цикл.	N_{VAL} , млн. цикл.	$N_{Ц}$, млн. цикл.	Позиция на рис. 1
CAL	3.5	0.1	1	1	0.243	–	0.245	–
	5	0	1	1	0.080	–	0.063	1
	5	0.1	1	1	0.062	–	0.073	2
	5	0.3	1	1	0.118	–	0.112	3
	5	0.5	1	1	0.310	–	0.235	4
	5	0.7	1	1	1.090	–	0.911	5
	5	0.75	1	1	1.701	–	1.553	6
	7	0.1	1	1	0.206	–	0.250	–
SAETRANS	3.5	0.1	0.398	26	5.300	4.390	7.258	7
	5	0	0.398	26	1.770	1.660	1.733	8
	7	0.1	0.398	26	0.553	0.561	0.627	9
SAEBRACKET	3.5	0.1	0.401	26	3.404	4.319	6.068	10
	5	0	0.401	26	1.277	1.633	1.450	11
	7	0.1	0.401	26	0.488	0.522	0.525	12
SAESUS	3.5	0.1	0.277	51	14.317	8.474	6.289	13
	5	0	0.277	51	5.325	3.204	5.281	14
	7	0.1	0.277	51	1.957	1.083	1.907	15
Спектр А	7	0.1	0.410	25	0.641	0.583	0.573	16
Спектр С	7	0.1	0.298	45	1.523	0.977	1.512	17

Различие нерегулярного нагружения от регулярного оценивается с помощью меры нерегулярности V .

$$V = \left[\frac{1}{v_b} \left[\sum_{i=1}^{v_b} v_{ai} \left(\frac{\Delta P_{ai}}{P_{\max}} \right)^n \right] \right]^{\frac{1}{n}} \quad (1)$$

где v_b, v_a – продолжительность используемой выборки и блока переменного нагружения с нагрузкой ΔP_{ai} ; $\Delta P_{ai} / P_{\max}$ – нормированная i -ая амплитуда нагружения. Для используемых спектров нагружения принималось $v_{ai}=1$. Для регулярного нагружения значение полноты V принималось равной единице.

Для регулярных и нерегулярных нагруже-

$$U = 0.5686 + 0.1571 \cdot R + 0.5314 \cdot R^2 - 0.4271 \cdot R^3 - 2.5839 \cdot R^4 + 6.1548 \cdot R^5 - 3.1301 \cdot R^6 \quad (3)$$

В нашем расчете эффективный размах коэффициента интенсивности напряжений в устье трещины при регулярном нагружении принимается как:

$$\Delta K_{\text{эфф}} = \Delta K \cdot U \cdot V \quad (4)$$

Здесь учитывается влияние «закрытия» трещин и асимметрии цикла нагружения на скорость роста трещины через коэффициент асимметрии R , а характер переменного нагружения, через коэффициент нерегулярности V .

Первый подход по оценке продолжительности роста усталостных трещин предполагает использование поциклового метода расчета с учетом характера нагружения по (1) и закрытия трещины по (3). Суммирование приращений длин трещин на каждом цикле или в результате каждого повторения блока истории нагружения позволяет определить продолжительность роста трещины:

$$N_{\text{ц}} = \frac{a_k - a_0}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \left(\frac{da}{dN} \right)_{ij}}, \quad (5)$$

где a_k – критическая длина трещины, которая соответствует окончанию участка стабильного роста трещины; a_0 – начальная длина трещины; n – число циклов истории нагружения; m – число повторений блока истории нагружения; $(da/dN)_{ij}$ – скорость роста трещины и приращение на i цикле j повторения блока истории нагружения.

Другой подход для оценки продолжительности роста трещины при переменном нагружении N_{VAL} основан на предложении рассматривать кинетику роста трещины на основании

ний процесс продвижения усталостных трещин на среднем участке кривой Пэриса можно было представить степенной зависимостью [8]:

$$da / dN = C \Delta K^n \quad (2)$$

В настоящем исследовании для 09Г2 $C=5 \cdot 10^{-14}$ при одинаковом $n = 3.5$ в da/dN (мм/цикл) и ΔK (МПа $\sqrt{\text{мм}}$).

Для учета явления «закрытия» трещины, который возникает при асимметриях цикла R менее 0.6-0.7 и снижает скорость роста трещины за счет уменьшения размаха ΔK , вводится параметр U , описывающий закрытие трещины в стали с асимметрией $0.1 \leq R \leq 0.7$ и определяемый по формуле [9, 10]:

ее роста при регулярном нагружении N_{CAL} и учета характера переменного нагружения через меру нерегулярности V при одинаковых силовых параметрах $P_{\max}$ и R без учета взаимодействия амплитуд в спектре нагружений.

$$N_{\text{VAL}} = N_{\text{CAL}} \cdot Q \quad (6)$$

$$Q = 10^{(1+A \lg n) \cdot (1-V)},$$

где A – нормирующий параметр равный от 2 до 2.5, Q – коэффициент увеличения продолжительности роста усталостной трещины при спектральном нагружении по сравнению с регулярным циклическом нагружении с теми же силовыми параметрами $P_{\max}$ и R .

Коррекция продолжительности роста трещины вносится коэффициентом Q , где переменными являются n , V , A . Коэффициент V зависит от характера нерегулярного нагружения и может быть определен по формуле (1), n – коэффициент наклона кривой среднего участка КДУР в координатах $(da/dN - \Delta K)$ при регулярном нагружении, полученный экспериментальным путем. Коэффициент A является нормированным коэффициентом, который подбирается на основании оптимизации опытных и расчетных величин.

Обсуждение результатов исследования

На рис. 1 показаны результаты испытаний при регулярном и нерегулярном нагружениях, а также совмещение кривых КДУР с представлением их через эффективный коэффициент интенсивности напряжений $\Delta K_{\text{эфф}}$, номера позиций соответствуют номерам в таблице. Испытания стали 09Г2 при регулярном нагружении при постоянном значении $P_{\max} = 5$ кН и раз-

личных величин асимметрии блока нагружения $R = 0-0.75$ показали, что все кривые КДУР имеют тенденцию к параллельности в логарифмических координатах ($\lg(da/dN) - \lg(\Delta K)$). Но с увеличением асимметрии блока нагружения R они снижаются в сторону меньших ско-

ростей роста трещины и размаха коэффициента интенсивности напряжений ΔK , а, следовательно, к увеличению продолжительности ее роста. Это связано с уменьшением размаха интенсивности напряжений ΔK , но и изменением ее «закрытия».

Рис. 1. Кривые роста усталостных трещин (а), экспериментальные (б) и эффективные КДУР (в) испытаний стали 09Г2

Было проведено перестроение кривых КДУР с учетом эффективного коэффициента интенсивности напряжений $K_{эфф}$ (4), описывающего влияние закрытие трещины U (3) и характера спектрального нагружения V (1). Принятый подход показал правильность принятых допущений. Кривые КДУР для исследуе-

мой стали при регулярном и нерегулярном нагружении различными спектрами и силовыми параметрами стремятся сгруппироваться на одни эквивалентные кривые (рис. 2). Была проведена попытка совместной группировки одну кривую КДУР на основании введенного значения $\Delta K_{эфф}$.

Рис. 2. Обобщенные эффективные КДУР для исследуемой стали (а); расчет продолжительности роста трещины поцикловым методом (б) и по формуле (7) (в) по сравнению с экспериментом

На рис. 2, а показано совмещение эффективных КДУР, полученных при регулярном и нерегулярном нагружении через их представление с эффективным коэффициентом интенсивности напряжений $\Delta K_{эфф}$ по формуле (4). Такой подход однозначно может описывать влияние различных силовых параметров и ха-

рактер нерегулярного нагружения на интенсивность напряжений в устье растущей усталостной трещины. На рис. 2, б представлены сравнительные результаты расчета нерегулярного и регулярного нагружений поцикловым методом $N_{ц}$ по формуле (5) и экспериментальных результатов $N_{э}$. На рис. 2в показана взаимо-

связь продолжительности роста трещины нерегулярного нагружения N_{VAL} по формуле (6) от экспериментальной N_{Σ} , где «круглые» маркеры – нерегулярное нагружение, в виде «ромбов» – регулярное.

Выводы

Таким образом, можно сделать выводы:

1. Авторами показано, что использование представленного эффективного коэффициента интенсивности напряжений, учитывающего «закрытие» трещины и нерегулярность переменного нагружения позволяет свести полученные кривые КДУР для стали 09Г2 к эквивалентной кривой, характерной для регулярного нагружения с $R = 0$.

2. Представлен поцикловой подход, применительно к рассмотренной стали, по оценке продолжительности роста усталостной трещины при регулярном и нерегулярном нагружении с различными параметрами силового воздействия. Данный подход учитывает «закрытие» усталостной трещины и характер нагружения.

3. Предложен подход по оценке продолжительности роста усталостных трещин в стали с разной асимметрией при нерегулярном нагружении на основе регулярного с учетом предложенной меры нерегулярности V .

4. Проведен сравнительный анализ расчета продолжительности роста трещины по предложенным подходам с полученными экспериментальными данными. Преимуществом данных подходов является простота и отсутствие необходимости в определении дополнительных коэффициентов для представленных сталей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Savkin A.N., Andronik A.V., Gorunov A.I., Sedov A.A., Sukhanov M.A. Advanced materials of automobile bodies in volume production / European Transport – Trasporti Europei (Italy). 2014. Iss. 56, No. 10. С. 1-27.
2. Панасюк, В. В. Механика квазихрупкого разрушения материалов / В. В. Панасюк. – Киев: Наукова думка. 1991. – С. 416.
3. Schive J. Fatigue of structures and materials. Second edition with CD-ROM. Springer. 2008, Pp. 621.
4. Heuber P., Bruder T., Klätschke H. Standardized load – time histories – a contribution to durability issues under spectrum loading. Mat-wiss. u Werkstofftech. 2005, 36, No.11, s.669-677.
5. Горобцов А.С., Карцов С.К., Плетнев А.Е., Поляков Ю.А. Компьютерные методы построения и исследования математических моделей динамики конструкций автомобилей: монография. М.: Машиностроение. 2011. – 463 с.
6. Sunder R. Unraveling the Science of Variable Amplitude Fatigue / Journal of ASTM International. - 2012. - Vol. 9, №1, – 32 p.
7. Sunder R., Andronik A., Biakov A., Eremín A., Panín S., Savkin A. Combined action of crack closure and residual stress under periodic overloads: A fractographic analysis / International journal of fatigue. 2016. Vol. 82. Part 3. С. 667-675.
8. Paris P.C., Erdogan F. A Critical Analysis of Crack Propagation Laws. Journal of Basic Engineering; Transaction, American Society of Mechanical Engineers, Series D. 1963, Vol. 85. p. 528-534.
9. Савкин, А. Н. Оценка влияния характера нагружения и силовых параметров случайного внешнего воздействия на рост усталостной трещины в низколегированной стали / А. Н. Савкин, А. В. Андроник, К. А. Бадиков, А. А. Седов // Деформация и разрушение материалов, 2017. – № 7. – С. 40–45.
10. Емельянов, О. В. Определение характеристик сопротивления стали развитию трещин при циклическом изменении нагрузки / О. В. Емельянов, И. А. Ляцкий // Строительные материалы и изделия : межвуз. сб. науч. тр. – Магнитогорск, МГТУ, 2002.