



УЧЕТ ВЛИЯНИЯ АСИММЕТРИИ ЦИКЛА НА ЦИКЛИЧЕСКУЮ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ МАТЕРИАЛОВ И СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

В. С. КОВАЛЬЧУК, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

По результатам исследований сварных соединений высокопрочной стали установлено, что повышение значений коэффициента асимметрии от 0 до 0,5 приводит к увеличению скорости развития усталостных трещин в 3...4 раза на начальном участке среднеамплитудной области кинетических диаграмм усталостного разрушения и практически не влияет на ее конечном участке. На основе анализа этих и литературных данных, полученных на других сталях, предложена методика и аналитические выражения, позволяющие в широких пределах учитывать асимметрию цикла при определении циклической трещиностойкости по ограниченному количеству исходных параметров.

Ключевые слова: циклическая трещиностойкость, асимметрия цикла, сварные соединения, расчет

При переменном нагружении в отдельных элементах металлоконструкций на определенной (иногда весьма ранней) стадии эксплуатации образуются усталостные трещины. Обследования состояния мостов, судов, атомных и тепловых энергоустановок, а также других сооружений показали, что во многих из них имеются усталостные трещины, размеры которых превышают допустимые, регламентируемые нормами контроля при процессе изготовления. В сварных соединениях усталостные трещины обычно зарождаются и распространяются в области сопряжения шва с основным металлом (по линии сплавления), а также в металле шва и зоны термического влияния. В основном это связано с влиянием концентрации напряжений и деформаций, вызванных геометрическим несовершенством форм сварных соединений, остаточных сварочных напряжений и неоднородностью геометрии зоны сопряжения шва с основным металлом по длине сварного соединения.

Циклическая долговечность соединений на стадии развития усталостных трещин зависит от конкретных условий и во многих случаях соизмерима с долговечностью на стадии их зарождения. Поэтому определение живучести металлоконструкций с усталостными трещинами имеет важное практическое значение для нахождения предельных размеров трещин, при которых происходит потеря несущей способности элементов, назначения сроков регламентных работ и разработки мер остановки или замедления (торможения) развивающихся трещин, что своевременно предотвращает аварийные ситуации, а также катастрофические разрушения.

Применительно к простому циклическому нагружению для определения взаимосвязи параметров переменных напряжений и скорости развития усталостных трещин существует множество методик и аналитических выражений. Как правило, они основаны на установленной Парисом [1] степенной зависимости скорости dl/dN стабильного роста

трещин только от единственного параметра ΔK — размаха коэффициента интенсивности напряжений:

$$dl/dN = C(\Delta K)^m, \quad (1)$$

где dl — приращение длины трещины; dN — соответствующее приращение количества циклов напряжения; C и m — постоянные коэффициенты, определяемые экспериментально. При этом во многих случаях влияние асимметрии цикла на скорость усталостного разрушения конструкционных материалов не учитывается.

Для определения циклической трещиностойкости с учетом влияния асимметрии цикла наиболее часто используется зависимость Формана [2], полученная подстановкой в формулу Париса критического коэффициента интенсивности напряжений K_c при статическом нагружении:

$$dl/dN = C(\Delta K)^m / (1 - R)K_c - \Delta K.$$

В этом и других выражениях [3–5] параметры C и m являются характеристиками материала и не зависят от коэффициента асимметрии цикла R .

В отдельных работах на основе статистической обработки экспериментальных данных показано, что между параметрами C и m существует корреляционная связь. Однако сопоставление выражений, полученных различными исследователями [5], показало, что они имеют относительно узкие области существования и справедливы только для определенных значений коэффициента асимметрии цикла, указанных авторами.

Ранее установлено [6], что на начальной стадии возникновения усталостных трещин отсутствие учета влияния асимметрии цикла может привести к многократным ошибкам при определении циклической долговечности. Есть основание полагать, что асимметрия цикла оказывает аналогичное воздействие и на скорость развития усталостных трещин. Очевидно, что для оценки ресурса металлоконструкций необходим поиск новых закономерностей, позволяющих полнее учитывать влияние асимметрии цикла на сопоставление развитию усталостных трещин.

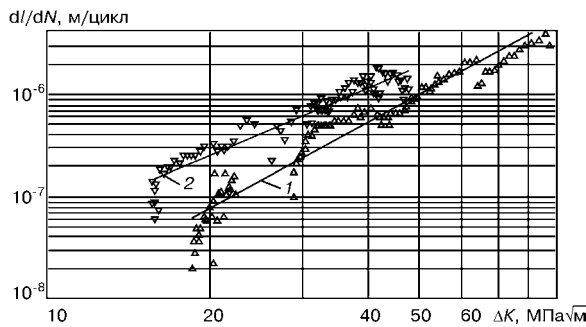


Рис. 1. Диаграммы усталостного разрушения высокопрочной стали при отнулевом (1) и асимметричном (2) циклах одночастотного осевого растяжения

Для оценки влияния асимметрии цикла на циклическую трещиностойкость при одночастотном нагружении проведены экспериментальные исследования плоских крупномасштабных образцов из высокопрочной стали ($\sigma_T = 1000$ МПа) сечением 220×18 мм. С целью иницирования усталостного разрушения в образцах выполнены начальные надрезы в виде центральной сквозной трещины. Определение скорости развития усталостных трещин проводили при осевом одночастотном мягком циклическом растяжении (коэффициент асимметрии цикла $R = 0$ и $0,5$). Для расширения диапазона исследований при каждом из указанных значений R проводили испытания четырех образцов с различными исходными уровнями напряжений. Образцы вырезали вдоль проката, поверхность пластин обрабатывали чистовым фрезерованием, а рабочую часть дополнительно шлифовали. Испытания образцов проводили на сервогидравлической машине PC1 фирмы «Шенк» (Германия), дополнительно оборудованной электронно-оптической системой, обеспечивающей бесконтактное измерение линейных размеров трещин на поверхности образцов в интервале от $0,1$ до 200 мм с точностью $0,01$ мм.

Кривые скорости усталостного разрушения $dl/dN - \Delta K$, построенные в логарифмических координатах, показаны на рис. 1. Они аппроксимируются выражениями

$$dl/dN = 1,61 \cdot 10^{-11} (\Delta K)^{2,82} \quad \text{при } R = 0;$$

$$dl/dN = 3,55 \cdot 10^{-10} (\Delta K)^{2,19} \quad \text{при } R = 0,5.$$

Графики изменения параметров C и m в зависимости от коэффициента асимметрии цикла R , построенные по экспериментальным и литературным данным [4, 7], приведены на рис. 2.

Таблица 1. Данные для определения циклической трещиностойкости сталей при различной асимметрии цикла

Марка стали	m_0	C_0	α_1	β_1	α_2	β_2
			$R \leq 0$		$R \geq 0$	
Ст3	3,71	$5,30 \cdot 10^{-13}$	-0,25	0,86	2,23	-2,81
15ХСНД	3,50	$8,10 \cdot 10^{-13}$	0,18	0,74	-0,43	1,27
15Х2НМФА	3,16	$8,40 \cdot 10^{-13}$	0,12	0,38	-0,54	1,50
14Х2ГРМ	3,07	$2,40 \cdot 10^{-12}$	0,44	-0,21	-1,00	1,99
Высокопрочная	2,82	$1,61 \cdot 10^{-11}$	-	-	-1,26	2,69

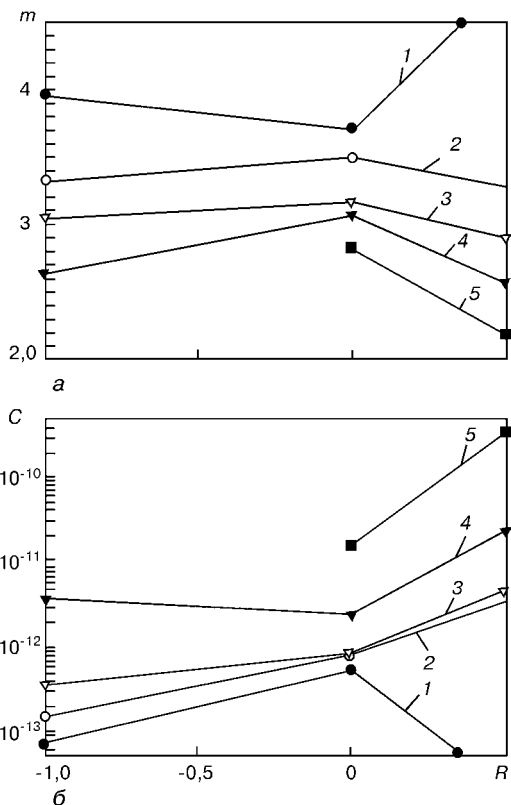


Рис. 2. Зависимости параметров m (а) и C (б) от коэффициента асимметрии цикла R : 1 – сталь Ст3 [4]; 2 – 15ХСНД [4]; 3 – 15Х2НМФА [7]; 4 – 14Х2ГРМ [4]; 5 – высокопрочная ($\sigma_T = 1000$ МПа)

В действительности функции $m = f(R)$ в линейных координатах $R-m$ и функции $C = f(R)$ в полулогарифмических координатах $R-\lg C$ имеют более сложный вид, чем показано на рис. 2. Однако их можно с достаточной для инженерной практики точностью аппроксимировать ломаной линией, состоящей из двух отрезков прямых, которые пересекаются в общей точке, отвечающей $R = 0$.

Данные этих графиков пригодны для непосредственного учета влияния асимметрии цикла при определении циклической трещиностойкости соответствующих сталей на среднеамплитудном участке кинетических диаграмм усталостного разрушения (КДУР) или для представления их двумя аналитическими выражениями:

относительно m_R

$$\begin{aligned} m_R &= m_0 + \alpha_1 R \quad \text{при } R \leq 0; \\ m_R &= m_0 + \alpha_2 R \quad \text{при } R \geq 0 \end{aligned} \quad (2)$$

и относительно C_R

$$\begin{aligned} C_R &= 10^{\beta_1 R} C_0 \quad \text{при } R \leq 0; \\ C_R &= 10^{\beta_2 R} C_0 \quad \text{при } R \geq 0, \end{aligned} \quad (3)$$

где m_R , m_0 и C_R , C_0 – параметры соответственно при искомой и отнулевой асимметрии цикла; α_1 , α_2 и β_1 , β_2 – коэффициенты пропорциональности соответственно при $R \leq 0$ и $R \geq 0$.

С учетом (2) и (3) зависимость (1) можно представить в виде



Таблица 2. Результаты сопоставления параметров m и C при различной асимметрии цикла

Марка стали	$\gamma_{-1} = m_{-1}/\lg C_{-1}$	$\gamma_0 = m_0/\lg C_0$	$\gamma_{0.5} = m_{0.5}/\lg C_{0.5}$	$\gamma_R = m_R/\lg C_R$
Ст3	-0,301	-0,302	-0,339	-0,314
15ХСНД	-0,259	-0,289	-0,287	-0,278
15Х2НМФА	-0,244	-0,262	-0,255	-0,254
14Х2ГРМ	-0,230	-0,264	-0,242	-0,246
Высокопрочная	-	-0,261	-0,232	-0,247

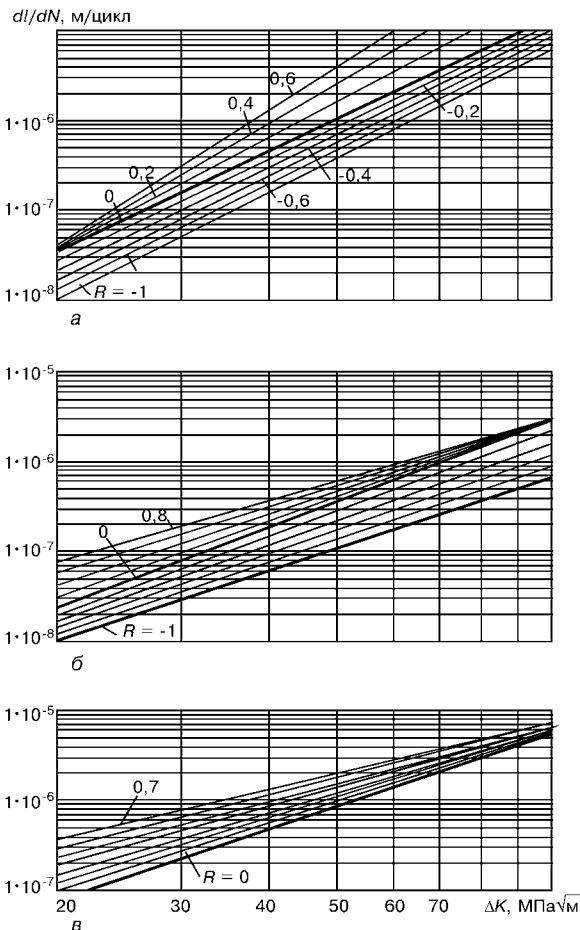


Рис. 3. Расчетные зависимости скорости усталостного разрушения сталей при различных значениях коэффициента асимметрии цикла R : a — сталь Ст3 [4]; b — 14Х2ГРМ [4]; v — высокопрочная

$$\begin{aligned} dI/dN &= 10^{\beta_1 R} C_0 (\Delta K)^{m_0 + \alpha_1 R} \quad \text{при } R \leq 0; \\ dI/dN &= 10^{\beta_2 R} C_0 (\Delta K)^{m_0 + \alpha_2 R} \quad \text{при } R \geq 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Численные значения коэффициентов пропорциональности для упомянутых выше сталей при $R \leq 0$ и $R \geq 0$ приведены в табл. 1.

Предлагаемый подход позволяет полнее учитывать влияние асимметрии цикла на циклическую трещиностойкость конструкционных материалов и сварных соединений при простых условиях нагружения.

При сопоставлении кривых рис. 2, a и рис. 2, b , построенных для конкретного материала, можно сделать вывод, что между параметрами m и C существует взаимосвязь. Из табл. 2 видно, что средние значения $\gamma_R = m_R/\lg C_R = -0,31 \dots -0,25$ для сталей низкой и высокой прочности практически инвариантны к асимметрии цикла.

С учетом изложенного выше выражение (4) принимает вид

$$dI/dN = 10^{\beta R} C_0 (\Delta K)^{\gamma \lg C_0 + \alpha R} \quad (5)$$

или

$$dI/dN = 10^{\beta R m_0 / \gamma} (\Delta K)^{m_0 + \alpha R}, \quad (6)$$

где коэффициенты α , β и γ имеют индексы и значения, соответствующие отрицательной или положительной области асимметрии цикла нагружения, приведенные в табл. 1 и 2. Если пренебречь несущественным влиянием коэффициента асимметрии цикла на коэффициент γ , то в выражениях (5) и (6) можно использовать средние значения γ_R .

Для визуализации характера изменения циклической трещиностойкости под влиянием асимметрии цикла нагружения на рис. 3 приведены полученные из выражения (4) расчетные зависимости усталостного разрушения трех марок сталей, отличающихся прочностью. Из рисунка видно, что в случае отрицательных значений R кривые располагаются почти эквидистантно, а в области его положительных значений они имеют вид веера. При этом с повышением ΔK интенсивность возрастания скорости развития усталостных трещин в сталях снижается. В КДУР, рассчитанных по данным, полученным в [4] для стали Ст3, веер направлен в противоположную сторону.

Выводы

1. Экспериментально установлено, что при одинаковых значениях размаха коэффициента интенсивности напряжений ΔK повышение значений коэффициента асимметрии цикла от 0 до 0,5 сопровождается увеличением скорости роста усталостного разрушения высокопрочной стали в 3...4 раза на начальном участке среднеамплитудной области КДУР. На конечном участке КДУР эта скорость остается практически неизменной.

2. Предложенная методика и аналитические выражения позволяют определять циклическую трещиностойкость материалов и соединений в широких пределах изменения значений коэффициента асимметрии цикла по ограниченному количеству исходных значений параметров m и C .

3. При отсутствии учета влияния асимметрии цикла в пределах $-1 < R < 0,7$ полученные значения скорости роста усталостных трещин на среднеамплитудном участке КДУР могут отличаться от реальных в $\pm (3 \dots 4)$ раза.

1. Парис П., Эрдоган Ф. Критический анализ законов распространения трещины // Техн. механика. Сер. Д. — 1963. — № 4. — С. 60–68.



2. *Форман Р., Керни В., Энгл Р.* Численные исследования распространения трещин в циклически нагружаемых конструкциях // Тр. Америк. о-ва инженеров-механиков. Сер. Д. — 1967. — 89, № 3. — С. 8–16.
3. *Трощенко В. Т., Покровский В. В., Прокопенко А. В.* // Трещиностойкость металлов при циклическом нагружении. — Киев: Наук. думка, 1987. — 256 с.
4. *Зависимость скорости развития усталостных трещин от асимметрии цикла* / В. И. Труфяков, В. В. Кныш, П. П. Михеев, А. З. Кузьменко // Автомат. сварка. — 1987. — № 3. — С. 5–7.
5. *Ромвари П., Тот Л., Надь Д.* Анализ закономерностей распространения усталостных трещин в металлах // Пробл. прочности. — 1980. — № 12. — С. 18–28.
6. *Ковальчук В. С.* Учет влияния асимметрии цикла на сопротивление усталости сварных соединений // Автомат. сварка. — 2002. — № 4. — С. 26–29.
7. *Влияние температуры и асимметрии нагружения на циклическую трещиностойкость стали 15Х2НМФА* / В. Т. Трощенко, П. В. Ясний, В. В. Покровский, А. А. Попов // Пробл. прочности. — 1981. — № 10. — С. 3–7.

It was established on the basis of kinetic diagrams of fatigue fracture of high-strength steel that increase in values of the asymmetry coefficient from 0 to 0.5 leads to increase in rate of propagation of fatigue cracks by a factor of 3-4 in the initial region of the mean-amplitude domain, and hardly has any effect in the final region. Method and analytical expressions are suggested, allowing the cycle asymmetry to be taken into account over wide ranges in determination of cyclic crack resistance by a limited number of initial parameters, based on analysis of these results and literature data for other steels.

Поступила в редакцию 04.10.2002

МАШИНОСТРОЕНИЕ. МЕТАЛЛООБРАБОТКА-2003

Приглашаем 26–29 ноября принять участие во 2-й специализированной выставке
«Машиностроение. Металлообработка-2003»

В экспозиции:

продукция машиностроительных предприятий для нужд промышленности, сельского хозяйства, транспорта, связи, а также коммунального хозяйства и населения; ремонт и модернизация технологического оборудования и машин; металлорежущее оборудование и инструмент; кузнечно-прессовое оборудование; оборудование для термообработки и нанесения покрытий; сварочное оборудование; контрольно-измерительное оборудование, приборы и инструмент; смазочные материалы и охлаждающие жидкости; здоровье и безопасность, защита окружающей среды.

Мы ждем Вас на выставке
«ЭКСПОДОНБАСС» (г. Донецк)
Тел./факс (062) 3812150; E-mail: zaharov@expodon.dn.ua