



УЧЕТ ВЛИЯНИЯ АСИММЕТРИИ ЦИКЛА НА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ СТАЛЕЙ И СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ДВУХЧАСТОТНОМ НАГРУЖЕНИИ

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

Установлено, что при двухчастотном нагружении повышение коэффициента асимметрии цикла от $R = 0$ до $R = 0,5$ приводит к возрастанию скорости развития усталостных трещин до 3...4 раз в основном металле и до 2 раз в металле шва стыковых сварных соединений высокопрочной ($\sigma_T \approx 1000$ МПа) стали. Предложен расчетный метод, позволяющий определять циклическую трещиностойкость конструкционных материалов и сварных соединений в условиях двухчастотного нагружения по диаграммам усталостного разрушения, отвечающим одночастотному нагружению с соответствующим коэффициентом асимметрии цикла.

Ключевые слова: циклическая трещиностойкость, двухчастотное нагружение, асимметрия цикла, стали, сварные соединения, расчет

Для большинства сварных металлоконструкций характерно сложное нагружение, вызванное одновременным действием двух и более разных по амплитуде и частоте переменных нагрузок. Многочисленные экспериментальные данные показывают, что наложение дополнительных высокочастотных напряжений от вибраций на переменные напряжения от основной (обычно низкочастотной) нагрузки может существенно снижать циклическую долговечность материалов и сварных соединений на стадиях возникновения и развития усталостных трещин. Это объясняется в основном увеличением результирующей амплитуды напряжений вследствие алгебраического суммирования обеих нагрузок и дополнительным повреждающим воздействием цикличности высокочастотной составляющей. При этом циклическая долговечность соединений на стадии развития усталостных трещин зависит не только от соотношений амплитуд и частот действующих напряжений, но и от асимметрии цикла наиболее низкочастотной составляющей спектра. Между тем существующие методики и расчетные зависимости для оценки циклической трещиностойкости с учетом влияния асимметрии цикла применимы только к простому циклическому нагружению [1–3 и др.].

Ранее для учета асимметрии цикла при определении скорости развития усталостных трещин в условиях одночастотного нагружения в уравнение Париса вводили дополнительные поправочные коэффициенты [3]. Такой подход можно применить и при двухчастотном нагружении, однако, возникают определенные трудности, вызванные прежде всего тем, что для определения коэффициента интенсивности напряжений при двухчастотном или более сложном нагружении размах напряжений невозможно определять разностью суммарных значений максимального и минимального напряжений цикла. Результатами экспериментальных исследо-

ваний доказано, что значение долговечности, полученное при одночастотном нагружении на уровне напряжений, равном сумме амплитуд составляющих двухчастотного нагружения, может существенно отличаться от значения долговечности, отвечающего двухчастотному нагружению.

При использовании существующего подхода для оценки циклической трещиностойкости материалов и соединений при двухчастотном нагружении (рис. 1) его необходимо заменить эквивалентным по повреждающему действию одночастотным нагружением. Решение этой задачи может быть реализовано на основе полученной ранее зависимости [4] для определения коэффициента снижения долговечности от амплитудных и частотных отношений составляющих двухчастотного нагружения до момента возникновения усталостных трещин.

Анализ результатов исследований сталей и сварных соединений, выполненных в ИЭС им. Е. О. Патона, показал, что кривые усталости при двухчастотном нагружении с фиксированными отношениями частот и амплитуд напряжений располагаются эквидистантно исходной кривой усталости, отвечающей одночастотному нагружению, и

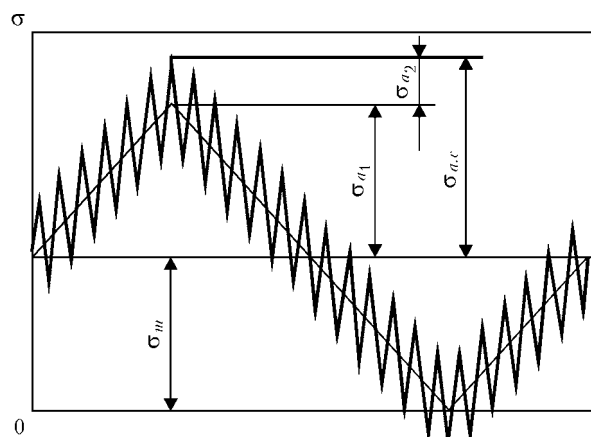


Рис. 1. Форма цикла нагружения: σ_{a_1} , σ_{a_2} — соответственно амплитуда низко- и высокочастотного напряжения; $\sigma_{a,c}$ — суммарная амплитуда напряжений; σ_m — среднее напряжение цикла; t — время

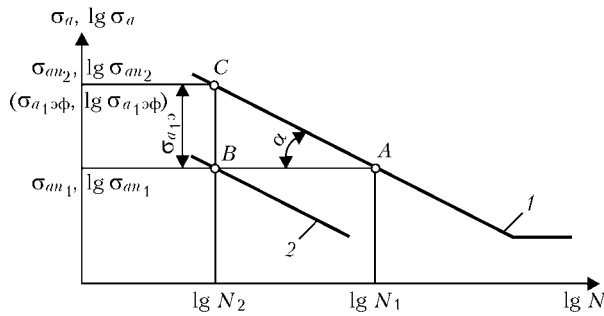


Рис. 2. Кривые усталости в полулогарифмической и логарифмической системах координат в условиях одно- (1) и двухчастотного (2) нагружения

смещены в область меньшей долговечности (рис. 2). Установлено, что для аддитивного двухчастотного нагружения с отношением частот $(f_2/f_1) \geq 10$, когда влияние сдвига фаз между составляющими несущественно и им можно пренебречь, аналитическое выражение коэффициента снижения долговечности α определяется выражением

$$\alpha = N_1/N_2 = (f_2/f_1)^{\vartheta} \sigma_{a_2}/\sigma_{a_1}, \quad (1)$$

где N_1 — долговечность при одночастотном нагружении с амплитудой напряжений σ_{a_1} ; N_2 — долговечность при двухчастотном нагружении, определяемая по количеству циклов низкочастотной составляющей с амплитудой σ_{a_1} ; f_1 — частота изменения нагрузки в условиях одночастотного нагружения и низкочастотной составляющей при дополнительном наложении вибраций; f_2 , σ_{a_2} — соответственно частота и амплитуда напряжений высокочастотной составляющей двухчастотного нагружения; ϑ — коэффициент, учитывающий влияние материала.

Если в произвольной точке А (рис. 2), соответствующей амплитуде низкочастотных напряжений $\sigma_{a_{n_1}}$, на кривой усталости 1 в полулогарифмической системе координат дополнительно наложить высокочастотное напряжение с амплитудой σ_{a_2} , то долговечность $\lg N_1$ снизится до значения $\lg N_2$ в точке В. Это эквивалентно увеличению амплитуды низкочастотных напряжений $\sigma_{a_{n_1}}$ на $\sigma_{a_{1\text{эф}}}$ до уровня $\sigma_{a_{n_2}}$ в точке С. Значение эквивалентного напряжения $\sigma_{a_{1\text{эф}}}$ можно определить из прямоугольного треугольника ABC выражением

$$\sigma_{a_{1\text{эф}}} = \operatorname{tg} \alpha (\lg N_1 - \lg N_2), \quad (2)$$

где $\operatorname{tg} \alpha = (\sigma_{a_{n_2}} - \sigma_{a_{n_1}}) / (\lg N_1 - \lg N_2)$ — тангенс угла наклона исходной кривой усталости к оси абсцисс, имеющий размерность напряжений.

Обозначив $\operatorname{tg} \alpha = k$, соотношение (2) можно записать в виде $\sigma_{a_{1\text{эф}}} = k \lg(N_1/N_2)$, или

$$\sigma_{a_{1\text{эф}}} = k \lg \alpha. \quad (3)$$

После подстановки значения $\lg \alpha$ из зависимости (1) в выражение (3) амплитуду низкочастотных напряжений, эквивалентных по повреждающему действию амплитуде накладываемых высокочастотных напряжений, можно определить по формуле

$$\sigma_{a_{1\text{эф}}} = k \vartheta (\sigma_{a_2}/\sigma_{a_1}) \lg(f_2/f_1). \quad (4)$$

Амплитуда эффективных напряжений $\sigma_{a_{1\text{эф}}}$, эквивалентных по повреждающему действию двухчастотному нагружению с составляющими σ_{a_1} и σ_{a_2} , определяется выражением $\sigma_{a_{1\text{эф}}} = \sigma_{a_{n_1}} + \sigma_{a_{1\text{эф}}}$, или после подстановки значений из (4)

$$\sigma_{a_{1\text{эф}}} = \sigma_{a_{n_1}} + k \vartheta (\sigma_{a_2}/\sigma_{a_1}) \lg(f_2/f_1). \quad (5)$$

Размах коэффициента интенсивности напряжений при двухчастотном нагружении ΔK_d , когда кривая усталости имеет вид прямой линии в полулогарифмической системе координат, равен

$$\Delta K_d = 2 \sigma_{a_{1\text{эф}}} \sqrt{\pi L} f_k, \quad (6)$$

где f_k — поправочная функция. С учетом (5), опустив индекс n_1 при σ_{a_1} :

$$\Delta K_d = 2 [\sigma_{a_1} + k \vartheta (\sigma_{a_2}/\sigma_{a_1}) \lg(f_2/f_1)] \sqrt{\pi L} f_k. \quad (7)$$

Амплитуду эффективных напряжений $\sigma_{a_{1\text{эф}}}$, эквивалентных по повреждающему действию двухчастотному нагружению с составляющими σ_{a_1} и σ_{a_2} , можно определить также исходя из аналитической связи параметров кривой усталости.

Известно, что при нормальной температуре и отсутствии коррозионной среды левая наклонная ветвь кривых усталости углеродистых сталей в полулогарифмических координатах имеет вид прямой линии и может быть описана уравнением [5]

$$\sigma_{a_{n_2}} - \sigma_{a_{n_1}} = k(\lg N_1 - \lg N_2), \quad (8)$$

где k — параметр, характеризующий угол наклона левой ветви кривой усталости к оси абсцисс и определяемый по формуле

$$k = (\sigma_{a_{n_2}} - \sigma_{a_{n_1}}) / (\lg N_1 - \lg N_2) = \operatorname{tg} \alpha. \quad (9)$$

Из уравнения (8) находим

$$\sigma_{a_{n_2}} = \sigma_{a_{n_1}} + k \lg(N_1/N_2). \quad (10)$$

Как уже отмечалось, при наложении на исходные напряжения $\sigma_{a_{n_1}}$ дополнительных, более высокочастотных напряжений σ_{a_2} , циклическая долговечность снижается до значения $\lg N_2$, что соответствует уровню эффективных напряжений одночастотного нагружения $\sigma_{a_{1\text{эф}}} = \sigma_{a_{n_2}}$. Отношение долговечностей N_1/N_2 при этом определяется в соответствии с выражением (1).



С учетом изложенного зависимость (10) можно представить в виде

$$\sigma_{a,эф} = \sigma_{a,n_1} + k\vartheta(\sigma_{a_2}/\sigma_{a_1}) \lg(f_2/f_1). \quad (11)$$

Уравнение (11) полностью совпадает с уравнением (5), а следовательно, ΔK_d определяется уравнением (7).

В тех случаях, когда левая наклонная ветвь кривых усталости имеет вид прямой линии в логарифмических координатах, она может быть описана степенным уравнением

$$\sigma_a^m N = C, \quad (12)$$

где σ_a — амплитуда переменных напряжений; N — количество циклов до разрушения; m и C — параметры кривой усталости.

В области ограниченной долговечности уравнение (12) можно представить по двум точкам левой наклонной ветви кривой усталости с координатами (σ_{a,n_1}, N_1) и (σ_{a,n_2}, N_2) уравнением в виде

$$\sigma_{a,n_1}^m N_1 = \sigma_{a,n_2}^m N_2, \quad (13)$$

где σ_{a,n_1}^m и σ_{a,n_2}^m — пределы ограниченной выносливости, соответствующие количеству циклов N_1 и N_2 ; $m = \lg(N_1/N_2) / \lg(\sigma_{a,n_1}/\sigma_{a,n_2})$ — показатель наклона кривой усталости.

Если в произвольной точке A логарифмических координат (рис. 2), соответствующей низкочастотным напряжениям $\lg \sigma_{a,n_1}$ на исходной кривой усталости 1 , наложить высокочастотное напряжение $\lg \sigma_{a_2}$, то долговечность $\lg N_1$ снизится до значения $\lg N_2$ в точке B . Это соответствует увеличению низкочастотных напряжений $\lg \sigma_{a,n_1}$ до уровня $\lg \sigma_{a,n_2}$ в точке C .

Из уравнения (13) следует, что

$$\sigma_{a,n_2}^m = \sigma_{a,n_1}^m N_1/N_2. \quad (14)$$

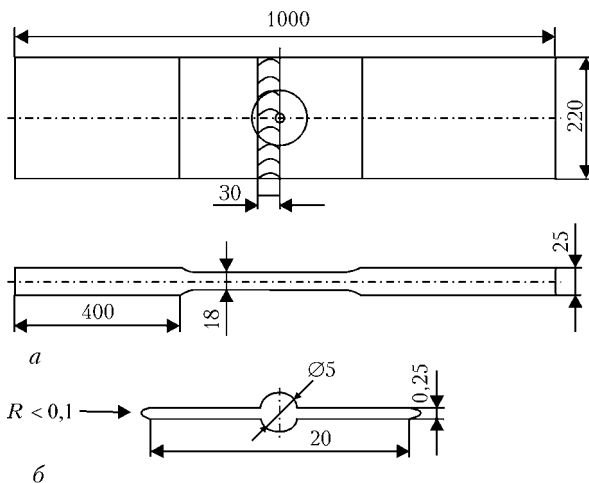


Рис. 3. Форма и размеры сварного образца со снятыми выпуклостями (а) и начального надреза сквозной центральной трещины (б)

С учетом принятых обозначений N_1/N_2 и его значения из уравнения (1) получим

$$\sigma_{a_1 n_2}^m = \sigma_{a_1 n_1}^m (f_2/f_1)^{\vartheta \sigma_{a_2}/\sigma_{a_1}}. \quad (15)$$

Из уравнения следует, что амплитуда эффективных напряжений $\sigma_{a,эф} = \sigma_{a,n_2}$, эквивалентных по повреждающему действию двухчастотному нагружению с составляющими σ_{a_1} и σ_{a_2} , определяется выражением

$$\sigma_{a,эф} = \sigma_{a,n_1} (f_2/f_1)^{\vartheta \sigma_{a_2}/m \sigma_{a_1}}. \quad (16)$$

После подстановки значения $\sigma_{a,эф}$ из (16) в (6), и опустив индекс n_1 при σ_{a_1} , размах коэффициента интенсивности напряжений при двухчастотном нагружении (когда левая наклонная ветвь кривых усталости имеет вид прямой линии в логарифмических координатах) можно представить в виде

$$\Delta K_d = 2\sigma_{a_1} (f_2/f_1)^{\vartheta \sigma_{a_2}/m \sigma_{a_1}} \sqrt{\pi L} f_k. \quad (17)$$

Полученные зависимости (7) и (17) позволяют определять скорость развития усталостных трещин в материалах и сварных соединениях при двухчастотном нагружении по кинетическим диаграммам усталостного разрушения, отвечающим одночастотному нагружению. Они предназначены для использования при построении диаграмм, когда левая наклонная ветвь кривых усталости имеет вид прямой линии соответственно в полулогарифмических и логарифмических координатах.

С целью экспериментальной проверки предложенной методики определения размаха коэффициента интенсивности напряжений ΔK_d применительно к оценке циклической трещиностойкости сварных соединений в условиях двухчастотного нагружения, были проведены испытания на усталость плоских крупномасштабных образцов со стыковым швом и снятыми выпуклостями (рис. 3), изготовленных из высокопрочной стали ($\sigma_T \approx 1000$ МПа). Для ини-

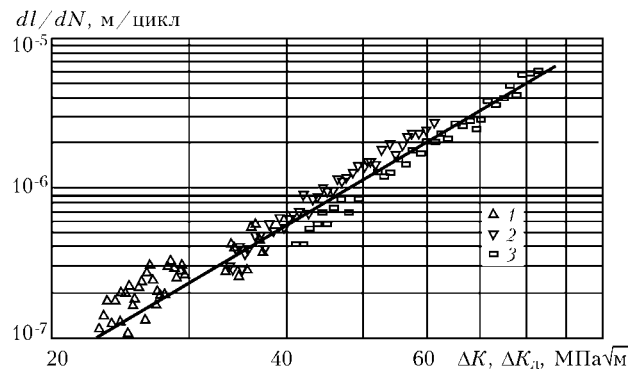


Рис. 4. Усредненная зависимость скорости роста усталостных трещин по линии сплавления сварных соединений высокопрочной стали от размаха коэффициента интенсивности напряжений при отнулевом одно- и двухчастотном ($f_2/f_1 = 100$) нагружениях (сплошная линия): 1 — одночастотное; 2 — двухчастотное нагружение $\sigma_2/\sigma_1 = 0,2$; 3 — двухчастотное нагружение $\sigma_2/\sigma_1 = 0,4$

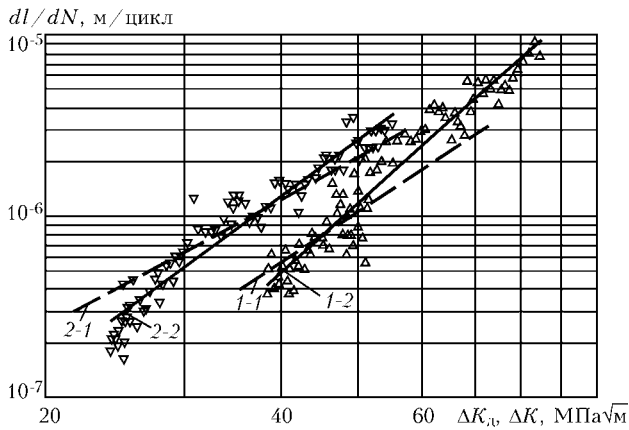


Рис. 5. Кинетические диаграммы усталостного разрушения высокопрочной стали при двухчастотном ($f_2/f_1 = 100$ и $\sigma_2/\sigma_1 = 0,2$ — сплошные линии) и одночастотном (штриховые) осевом растяжении: (1-2) и (2-1) при $R = 0$; (2-2) и (2-1) при $R = 0,5$

цирования усталостного разрушения образцов в металле ЗТВ начальный надрез в виде центральной сквозной трещины располагали вдоль по линии сплавления шва с основным металлом. Исходные экспериментальные данные получали при мягком режиме одно- и двухчастотного осевого растяжения. Одночастотное нагружение и низкочастотная составляющая двухчастотного нагружения имели треугольную форму цикла с коэффициентом асимметрии $R = 0$ и изменялись с частотой $f_1 = 0,05$ Гц. При двухчастотном нагружении отношение частот f_2/f_1 составляло 100, а отношение амплитуд напряжений $\sigma_2/\sigma_1 = 0,2$ и $0,4$. Испытания выполняли на сервогидравлической машине «Шенк 1000 кН», дополнительно оборудованной электронно-оптической системой, обеспечивающей бесконтактное измерение линейных размеров трещин на поверхности образцов в интервале 0,1...200 мм с точностью 0,01 мм. Размах коэффициента интенсивности напряжений при двухчастотном нагружении определяли по выражению (7). Значения коэффициента $\vartheta = 1,67$ и тангенса угла наклона исходной кривой усталости $k = 52$ МПа принимали по результатам экспериментальных исследований основного материала. Результаты исследования циклической трещиностойкости сварных соединений при одно- и двухчастотном нагружении представлены в виде точек на рис. 4. Медианные значения этих данных располагаются практически на одной прямой, что позволяет заменить их общей линией регрессии (сплошная линия). Хорошее совпадение скоростей усталостного разрушения при $\Delta K = \Delta K_d$ подтверждает возможность данного метода определять циклическую трещиностойкость материалов и сварных соединений в условиях двухчастотного нагружения по кинетическим диаграммам усталостного разрушения, отвечающим одночастотному нагружению.

Для оценки влияния асимметрии цикла на скорость развития усталостных трещин в условиях двухчастотного нагружения исследования выполняли на аналогичных по форме и размерам образцах с центральной сквозной трещиной (рис. 3), идентичных ранее исследованным в условиях од-

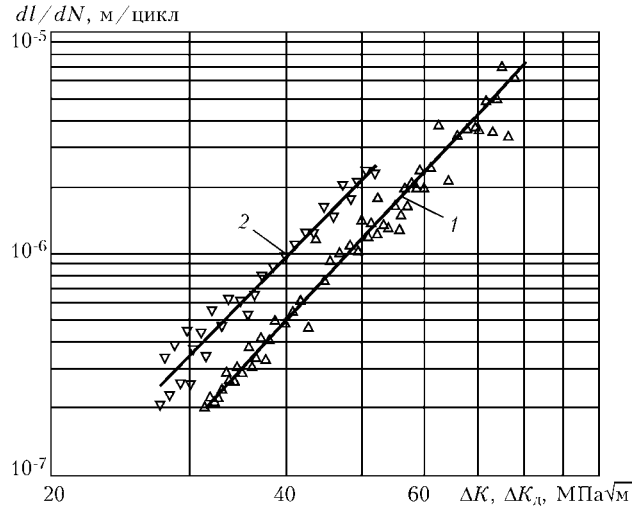


Рис. 6. Кинетические диаграммы усталостного разрушения металла шва сварных соединений высокопрочной стали при двухчастотном осевом растяжении ($f_2/f_1 = 100$, $\sigma_2/\sigma_1 = 0,2$): 1 — $R = 0$; 2 — $R = 0,5$

нечастотного нагружения [3] и изготовленных из основного металла той же стали ($\sigma_T = 1000$ МПа).

Образцы испытывали в условиях осевого двухчастотного мягкого циклического растяжения с отношением амплитуд напряжений $\sigma_2/\sigma_1 = 0,2$ и отношением частот $f_2/f_1 = 100$ при коэффициенте асимметрии цикла $R = 0$ и $0,5$. Размах коэффициента интенсивности напряжений ΔK_d определяли по изложенной выше методике с использованием выражения (7). Зависимости $dl/dN - \Delta K_d$ в условиях двухчастотного нагружения при $R = 0$ (1-2) и $R = 0,5$ (2-2) приведены на рис. 5. Для сопоставления, там нанесены также штриховые линии (1-1) и (2-1) зависимостей $dl/dN - \Delta K$, полученных ранее [3] при одночастотном нагружении на аналогичных образцах и тех же значениях коэффициента асимметрии цикла. Из рисунка видно, что кривые (1-1) и (1-2), а также (2-1) и (2-2), полученные соответственно в условиях одно- и двухчастотного нагружения при фиксированном значении коэффициента асимметрии цикла, удовлетворительно совпадают. При переходе от $R = 0$ до $R = 0,5$ скорость развития усталостных трещин в основном металле исследованной стали возрастает в 3...4 раза при обоих видах переменного нагружения.

Для оценки влияния асимметрии цикла на скорость развития усталостных трещин в металле шва сварных соединений усталостные испытания в условиях двухчастотного нагружения выполняли также при мягком режиме циклического растяжения с отношением амплитуд напряжений $\sigma_2/\sigma_1 = 0,2$ и отношением частот $f_2/f_1 = 100$. Коэффициент асимметрии цикла принимали равным $R = 0$ и $R = 0,5$. Для иницирования усталостного разрушения сварных образцов (рис. 3) по металлу шва начальный надрез располагали в его центральной части. Кинетические диаграммы усталостного разрушения металла шва сварных соединений высокопрочной стали при нулевом и асимметричном двухчастотном осевом растяжении пред-



тавлены на рис. 6. Эти данные показывают, что при двухчастотном нагружении повышение коэффициента асимметрии цикла от $R = 0$ до $R = 0,5$ приводит к увеличению скорости развития усталостных трещин в металле шва стыковых сварных соединений исследованной стали примерно в 2 раза.

Из сопоставления кинетических диаграмм (рис. 5, 6) видно, что при фиксированных значениях коэффициента асимметрии цикла скорости усталостного разрушения по основному металлу и металлу шва сварных соединений практически соизмеримы, характер влияния асимметрии цикла на скорость усталостного разрушения для указанных зон сварного соединения идентичен.

Выводы

1. С ростом коэффициента асимметрии цикла от $R = 0$ до $R = 0,5$ скорость развития усталостных трещин в основном металле исследованной стали повышается в 3...4 раза при одно- и двухчастотном нагружении.

2. При двухчастотном нагружении повышение коэффициента асимметрии цикла от $R = 0$ до $R = 0,5$ приводит к увеличению скорости развития усталостных трещин в металле шва стыковых сварных соединений исследованной стали примерно в 2 раза.

It is established that at bicyclic loading the increase in the coefficient of cyclic asymmetry from $R = 0$ to $R = 0.5$ leads to fatigue crack propagation rate increasing 3 to 4 times in the base metal and up to 2 times in the weld metal of butt joints on high-strength steel ($\sigma_y \approx 1000$ MPa). A calculation method is proposed, allowing determination of cyclic crack resistance of structural materials and welded joints under the conditions of bicyclic loading by fatigue fracture diagrams, corresponding to single-frequency loading with a respective coefficient of cycle asymmetry.

3. При фиксированных значениях коэффициента асимметрии цикла скорости усталостного разрушения по линии сплавления, металлу шва сварных соединений и основному металлу соизмеримы.

4. Характер влияния асимметрии цикла на скорость усталостного разрушения практически идентичный для различных зон сварного соединения и основного металла. Это позволяет с помощью предлагаемой методики определять циклическую трещиностойкость материалов и сварных соединений при двухчастотном нагружении по кинетическим диаграммам, отвечающим одночастотному нагружению с соответствующим значением коэффициента асимметрии цикла.

1. *Форман Р., Керн В., Энгл Р.* Численные исследования распространения трещин в циклически нагружаемых конструкциях // Тр. Америк. о-ва инженеров-механиков. Сер. Д. — 1967. — № 3. — С. 8–16.
2. *Зависимость скорости развития усталостных трещин от асимметрии цикла* / В. И. Труфяков, В. В. Кныш, П. П. Михеев и др. // Автомат. сварка. — 1987. — № 3. — С. 5–7.
3. *Ковальчук В. С.* Учет влияния асимметрии цикла на циклическую трещиностойкость материалов и сварных соединений // Там же. — 2003. — № 9. — С. 3–6.
4. *Труфяков В. И., Ковальчук В. С.* Определение долговечности при двухчастотном нагружении: Сообщение 2. Предлагаемая методика // Пробл. прочности. — 1982. — № 10. — С. 15–20.
5. *Троценко В. Т., Сосновский Л. А.* Сопротивление усталости металлов и сплавов: Справочник. Ч. 1. — Киев: Наук. думка, 1987. — 510 с.

Поступила в редакцию 13.02.2003



3-я Международная конференция по сварочным материалам

Разработка, технология, производство, качество



1–4 июня 2004

г. Днепропетровск

Организаторы:

*Ассоциация «Электрод» предприятий СНГ
ОАО «Днепрометиз»*

При поддержке:

*Межгосударственного Научного совета по сварке и родственным технологиям, ИЭС им. Е. О. Патона,
Общества сварщиков Украины,
Российского научно-технического сварочного общества*

Контактный тел./факс: (38044) 227 72 35