



УДК 621.791.019:539.4

КИНЕТИКА РОСТА НЕСКВОЗНЫХ УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН В СТАЛЯХ 03X20H16AG6 И 12X18H10T ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЗНАЧЕНИЯХ КОЭФФИЦИЕНТА АСИММЕТРИИ ЦИКЛА НАПРЯЖЕНИЙ

В. В. КНЫШ, канд. физ.-мат. наук, **С. А. СОЛОВЕЙ**, **А. З. КУЗЬМЕНКО**, инженеры
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

На основе экспериментальных данных построены кинетические диаграммы усталостного разрушения сталей 03X20H16AG6 и 12X18H10T при различных значениях коэффициента асимметрии цикла напряжений. Предложено трехпараметрическое кинетическое уравнение, описывающее закономерности развития несквозных усталостных трещин в исследуемых сталях, определены характеристики трещиностойкости. Расчетные значения долговечностей, вычисленные на основе установленного уравнения, сопоставлены с экспериментальными.

Ключевые слова: высоколегированные стали, циклическая трещиностойкость, долговечность, коэффициент интенсивности напряжений, коэффициент асимметрии цикла напряжений, полуэллиптическая трещина

Усталостные трещины в сварных соединениях, как правило, зарождаются в зонах перехода шва к основному металлу в местах действия максимальных остаточных напряжений растяжения. Эти трещины, развиваясь на поверхности металла и в глубь его, формируются в своей плоскости в виде, близком к полуэллиптическому [1, 2]. Известно, что вследствие взаимодействия остаточных напряжений и напряжений цикла переменного нагружения в зонах концентраторов сварных соединений образуется новый цикл напряжений того же размаха, что и исходный, но другой асимметрии, который и определяет кинетику усталостных трещин [3]. В этой связи закономерности развития усталостных трещин в сварных соединениях удобно описывать кинетическими уравнениями, которые в явном виде содержат коэффициент асимметрии цикла напряжений.

В настоящее время существует значительное количество работ, посвященных исследованию влияния асимметрии цикла напряжения на скорость развития сквозных трещин в различных конструкционных материалах [4–6]. Что касается установления таких зависимостей для описания кинетики несквозных усталостных трещин, то требуется специальное самостоятельное экспериментальное обоснование в связи с ограниченным количеством данных в литературе. При этом в качестве базовых зависимостей, отражающих степень трещиностойкости, должны оставаться экспериментально установленные кинетические диаграммы усталостного разрушения (КДУР) основ-

ного металла, полученные при фиксированных значениях коэффициента асимметрии цикла напряжений.

Для установления КДУР в процессе усталостных испытаний на циклическую трещиностойкость образцов с несквозными трещинами необходимо определять размеры этих трещин по всему фронту их распространения. С этой целью в ИЭС им. Е. О. Патона разработана специальная методика определения параметров несквозных трещин с помощью индикаторных следов на их поверхности, которую успешно применяли при исследовании циклической трещиностойкости тавровых сварных соединений стали 12X18H10T (рис. 1). Эта методика включает элементы фрактографического и капиллярного методов контроля. Путем сочетания обоих этих методов возможно проследить за перемещением фронта трещины после полного разрушения сварного образца.

В образце с несквозной трещиной через заданные промежутки времени (количество циклов нагружения) образовавшуюся открытую полость

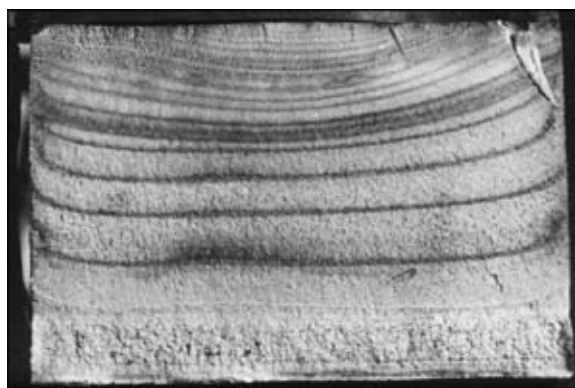


Рис. 1. Вид усталостного излома образца таврового сварного соединения с индикаторными следами кинетики роста поверхностной полуэллиптической трещины



трещины заполняли индикаторной жидкостью, состоящей из ксилола (60 %), тонера электрографического черного (30 %) и ацетона (10 %). Поскольку время контакта индикаторной жидкости с поверхностью составляло 2...5 мин, высыхания индикаторной жидкости не происходило. В дальнейшем избыток этой жидкости удаляли с внутренних поверхностей трещины продувкой сжатым воздухом ее полости в течение 1...2 мин. Однако небольшое количество индикаторной жидкости по фронту распространения трещины удерживалось вследствие действия сил поверхностного натяжения. Затем с помощью кисти керосин в полость трещины, где остатки индикаторной жидкости по фронту распространения трещины коагулировали с керосином. Вследствие циклического смыкания берегов трещины при ее закрытии и высокой вязкости частиц коагулированной индикаторной жидкости твердые ее компоненты проникали в шероховатости излома по всему фронту развития трещины. Остатки керосина удаляли сжатым воздухом, продувая полости трещины в течение 1...2 мин. Высохшие коагулированные частицы индикаторной жидкости при последующих вводах индикаторной жидкости и керосина становились нерастворимыми, образуя при этом характерный (индикаторный) след в виде бороздки. Количество циклов нагружения образца, относящихся к завершению данного этапа, фиксировалось. Длину трещины на поверхности образца измеряли с погрешностью $\pm 0,1$ мм на оптическом микроскопе. По истечению заданного промежутка времени (количество циклов нагружения образца) указанные операции последовательно повторяли, при этом на поверхности тре-

щины регистрировались индикаторные следы. По излому сварного соединения определяли расстояния между соседними индикаторными следами и устанавливали закономерности развития фронта усталостной трещины в зависимости от количества циклов нагружения.

Предложенная методика позволяет проводить экспериментальные исследования циклической трещиностойкости материалов, не нарушая режимы усталостных испытаний, и может применяться для различных конструкционных материалов. Эта методика использована в данной работе для экспериментального установления КДУР коррозионностойких сталей в максимально углубленной точке фронта поверхностных трещин.

Экспериментальные исследования закономерностей развития поверхностных полуэллиптических усталостных трещин в сталях 03X20H16AG6 ($\sigma_T = 335$ МПа, $\sigma_B = 685$ МПа) и 12X18H10T ($\sigma_T = 259$ МПа, $\sigma_B = 685$ МПа) при различных значениях коэффициента асимметрии цикла напряжений проводили на образцах размером 600×120×35 мм. Поверхность образцов (в их средней части) шлифовали и фрезеровали концентратор в виде канавки с максимальной глубиной 2,5 мм и шириной 9 мм. Исходную трещину на поверхностях образцов выращивали до длины $2c = 12$ мм при заданном значении коэффициента асимметрии цикла напряжения с амплитудой, не превышающей амплитуду рабочего напряжения, при котором в дальнейшем проводили исследования роста несквозной трещины. Образцы из стали 03X20H16AG6 испытывали при одноосном переменном растяжении-сжатии с коэффициентом асимметрии цикла напряжений $R_\sigma = -1$ ($\sigma_{max} = 147$ МПа), 0 ($\sigma_{max} = 196$ МПа) и 0,5 ($\sigma_{max} = 249$ МПа), а образцы из стали 12X18H10T — при $R_\sigma = -1$ ($\sigma_{max} = 122$ МПа) и 0 ($\sigma_{max} = 192$ МПа). Выбор циклических нагрузок при заданной асимметрии осуществляли таким образом, чтобы диапазоны изменения скорости роста усталостных трещин соответствовали линейному участку КДУР, а несквозные трещины развивались так же, как и поверхностные полуэллиптические трещины с устойчивой формой [2].

Результаты измерений полудлины c трещины на поверхностях образцов и максимальной ее глубины, установленной по маркерным линиям, при различных значениях коэффициента асимметрии цикла напряжений показаны на рис. 2. Из рисунка видно, что изменение асимметрии цикла напряжений в несквозных трещинах приводит к изменению значения коэффициента сжатия (отношения глубины l трещины к ее полудлине c), но по мере роста длины трещины оно остается неизменным. У стали 03X20H16AG6 коэффициент сжатия равен примерно 0,9 при положительных

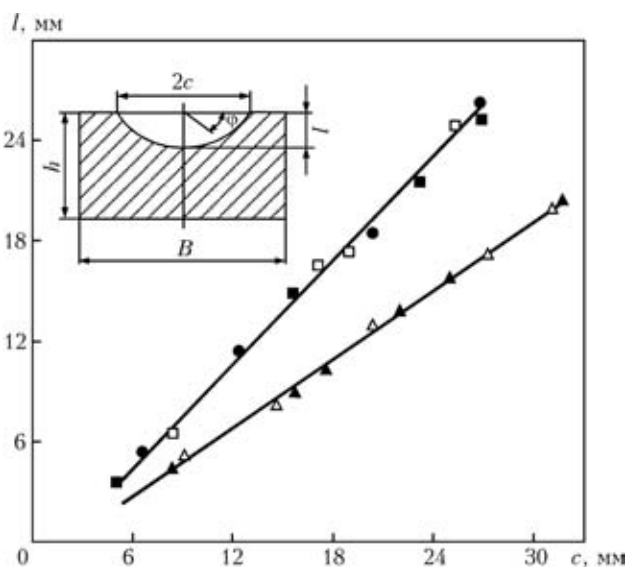


Рис. 2. Зависимость глубины l полуэллиптической трещины от ее полудлины c , полученная по маркерным линиям: a — образцы из стали 03X20H16AG6 при $R_\sigma = -1$ (\blacktriangle), 0 (\blacksquare), 0,5 (\bullet); b — образцы из стали 12X18H10T при $R_\sigma = -1$ (\triangle), 0 (\square); h , B — соответственно высота и ширина образца

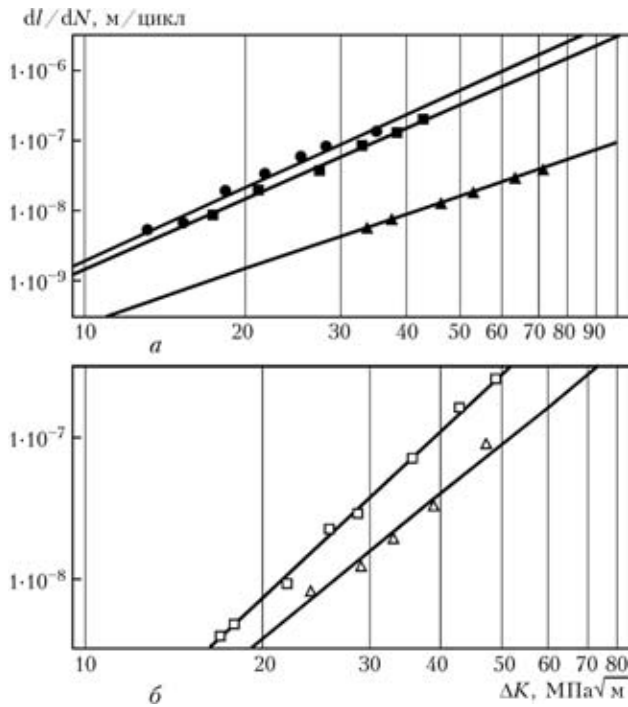


Рис. 3. Кинетические диаграммы усталостного разрушения и линии регрессии экспериментальных точек сталей 03X20H16AG6 (а) и 12X18H10T (б) в максимально углубленной точке фронта полуэллиптической трещины: а — ▲ — $R_{\sigma} = -1$ ($\sigma_{max} = 147$ МПа), $\lg(dl/dN) = 2,414002 \cdot \lg(\Delta K) + (-11,6969)$; ■ — $R_{\sigma} = 0$ ($\sigma_{max} = 196$ МПа), $\lg(dl/dN) = 3,159111 \cdot \lg(\Delta K) + (-11,73748)$; ● — $R_{\sigma} = 0,5$ ($\sigma_{max} = 249$ МПа), $\lg(dl/dN) = 3,341055 \cdot \lg(\Delta K) + (-11,80641)$; б — Δ — $R_{\sigma} = -1$ ($\sigma_{max} = 122$ МПа), $\lg(dl/dN) = 3,421973 \cdot \lg(\Delta K) + (-12,83322)$; □ — $R_{\sigma} = 0$ ($\sigma_{max} = 192$ МПа), $\lg(dl/dN) = 3,997881 \cdot \lg(\Delta K) + (-13,29316)$

значениях коэффициента асимметрии цикла напряжений ($R_{\sigma} = 0$ и $0,5$), но уменьшается до $0,6$ в области знакопеременных амплитуд напряжений ($R_{\sigma} = -1$); то же происходит и у стали 12X18H10T — $l/c = 0,9$ и $0,6$ соответственно при $R_{\sigma} = 0$ и -1 . Такое изменение коэффициента сжатия может быть объяснено следующим. Влияние асимметрии цикла напряжений на эволюцию контура несквозной трещины заключается в том, что сжимающая часть цикла нагружения способствует более интенсивному относительному раскрытию вершины трещины, находящейся в плосконапряженном состоянии (в частности, по оси c), чем в плоскодеформированном (в частности, по оси l), при этом изменяется относительная скорость роста трещины и соответственно коэффициент сжатия [2].

Для построения КДУР при развитии полуэллиптических усталостных трещин необходимо вычислять значения коэффициента интенсивности напряжений (КИН), отвечающего заданным условиям нагружения. Из литературы известны подходы к определению таких КИН при различных условиях приложения нагрузки и геометрии образцов [7–11]. Размах КИН для призматических

образцов в условиях одноосного переменного растяжения-сжатия в максимально углубленной точке ($\varphi = \pi/2$) фронта развития полуэллиптической усталостной трещины вычисляли по формуле [7]

$$\Delta K = \frac{\Delta\sigma\sqrt{\pi l}}{\Phi} [M_1 + M_2(l/h)^2 + M_3(l/h)^4] g f_{\varphi} f_B \quad (1)$$

где

$$M_1 = 1,13 - 0,09(l/c); \quad M_2 = -0,54 + 0,89(0,2 + l/c)^{-1};$$

$$M_3 = 0,5 - (0,65 + l/c)^{-1} + 14(1 - l/c)^{24};$$

$$g = 1 + [0,1 + 0,35(l/h)^2] (1 - \sin \varphi)^2;$$

$$f_{\varphi} = [(l/c)^2 \cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi]^{1/4};$$

$$f_B = [\sec((\pi c)/B \sqrt{l/h})]^{1/2};$$

$\Delta\sigma$ — размах номинальных напряжений в бруто-сечении циклически нагружаемого образца, которое совпадает с плоскостью тещины; Φ — эллиптический интеграл второго рода, при вычислении которого обычно используют приближенные его выражения, например, в виде

$$\Phi = \left[1 + 1,464 \left(\frac{l}{c} \right)^{1,65} \right]^{1/2}.$$

В уравнении (1) учтено влияние формы трещины тыльной, фронтальной и боковых поверхностей образца на значение КИН.

Текущим значениям скорости распространения трещины на i -м шаге их вычисления $v_{li} = (\Delta l_i) / (\Delta N_i) = (l_i - l_{i-1}) / (N_i - N_{i-1})$ ставились в соответствие значения размахов КИН, полученные по (1) при $l = l_i - \Delta l_i / 2$.

Зависимости скорости роста усталостных трещин в образцах из сталей 03X20H16AG6 и 12X18H10T от размаха КИН в максимально углубленной точке фронта трещины ($\varphi = \pi/2$) при различных значениях коэффициента асимметрии цикла напряжений приведены в виде соответствующих КДУР на рис. 3. В подрисунковой подписи приведены уравнения линий регрессии экспериментальных точек, отвечающих указанным значениям R_{σ} .

Из КДУР следует, что с увеличением фиксированных значений R_{σ} возрастает угол наклона линии регрессии экспериментальных точек. Такой характер изменения КДУР предлагается описывать уравнением с тремя константами:

$$\frac{dl}{dN} = C_{-1} (\Delta K)^{m_{-1} + \lambda} \sqrt[3]{1 + R_{\sigma}}, \quad (2)$$

где C_{-1} и m_{-1} — характеристики трещиностой-

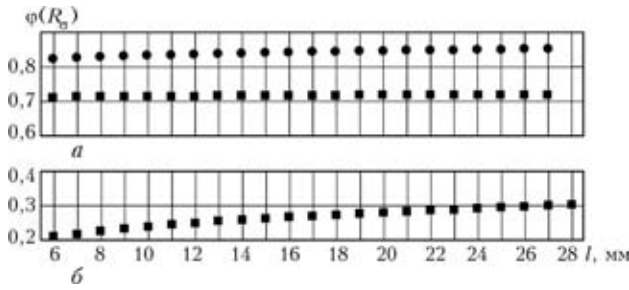


Рис. 4. Зависимость показателя степени $\varphi(R_{\sigma}) = \lambda \sqrt[3]{1 + R_{\sigma}}$ уравнения (2) от максимальной глубины поверхностной трещины в сталях 03X20H16AG6 (а) и 12X18H10T (б) при $R_{\sigma} = 0$ (■) и 0,5 (●)

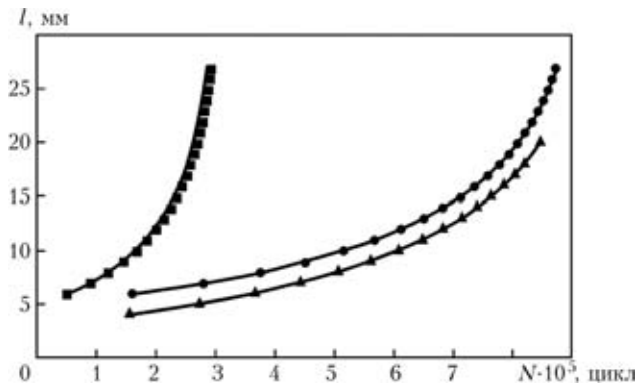


Рис. 5. Зависимость максимальной глубины поверхностной трещины от количества циклов перемен напряжений в стали 03X20H16AG6: ▲, ■, ● — экспериментальные данные соответственно для $R_{\sigma} = -1$; 0 и +0,5; кривые — расчетные

кости материала при $R_{\sigma} = -1$; λ — постоянная величина, характеризующая чувствительность материала к асимметрии цикла напряжений.

Показатель степени $\varphi(R_{\sigma}) = \lambda \sqrt[3]{1 + R_{\sigma}}$ может быть определен через параметры трещиностойкости $C_{R_{\sigma}}$ и $m_{R_{\sigma}}$ степенной зависимости Пэриса $dl/dN = C_{R_{\sigma}} (\Delta K)^{m_{R_{\sigma}}}$, установленные из экспериментальных КДУР, отвечающих заданному значению коэффициента R_{σ} . Так, для значений $R_{\sigma} = 0$ и 0,5 соответствующие показатели степени $\varphi(0)$ и $\varphi(0,5)$ определяются соотношениями:

$$\varphi(0) = \frac{\lg [C_0(\Delta K)]^{m_0} - \lg [C_{-1}(\Delta K)]^{m_{-1}}}{\lg \Delta K},$$

$$\varphi(0,5) = \frac{\lg [C_{0,5}(\Delta K)]^{m_{0,5}} - \lg [C_{-1}(\Delta K)]^{m_{-1}}}{\lg \Delta K}, \quad (3)$$

значения которых по мере увеличения фронта развития усталостной полуэллиптической трещины изменяются в узких пределах (рис. 4) ($\varphi_{cp}(0) = 0,72$, $\varphi_{cp}(0,5) = 0,84$ для стали 03X20H16AG6 и $\varphi_{cp}(0) = 0,27$ для стали 12X18H10T). При известных значениях $\varphi_{cp}(R_{\sigma_i})$ постоянная λ находится методом наименьших квадратов из уравнения

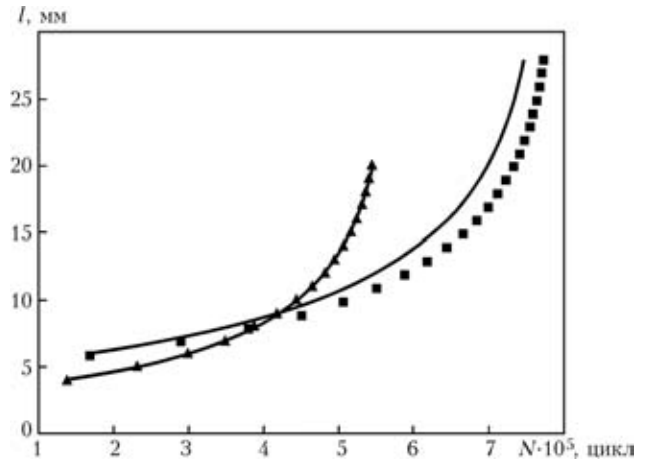


Рис. 6. Зависимость максимальной глубины поверхностной трещины от количества циклов перемен напряжений в стали 12X18H10T: ▲, ■ — экспериментальные данные, полученные соответственно для $R_{\sigma} = -1$ и 0; кривые — расчетные

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n \varphi_{cp}(R_{\sigma_i}) \sqrt[3]{1 + R_{\sigma_i}}}{\sum_{i=1}^n (\sqrt[3]{1 + R_{\sigma_i}})^2}. \quad (4)$$

На основе полученных экспериментальных данных для исследуемых сталей установлены следующие значения постоянных соотношения (2): $C_{-1} = 0,2 \cdot 10^{-11}$, $m_{-1} = 2,41$, $\lambda = 0,73$ (сталь 03X20H16AG6); $C_{-1} = 0,15 \cdot 10^{-12}$, $m_{-1} = 3,42$, $\lambda = 0,27$ (сталь 12X18H10T).

Вычисленные значения долговечностей интегрированием уравнения (2) показали, что для установленных характеристик трещиностойкости максимальное отклонение расчетных значений долговечностей от экспериментальных при различных значениях коэффициента асимметрии цикла напряжений для сталей 03X20H16AG6 и 12X18H10T не превышает 10 % (рис. 5 и 6). Таким образом, кинетическое уравнение (2), содержащее три материальные константы, может применяться в инженерной практике для описания кинетики усталостного разрушения исследованных сталей при развитии несквозных трещин в диапазоне изменения коэффициента асимметрии цикла напряжений $-1, 0 \leq R_{\sigma} \leq 0,5$.

Выводы

1. Коэффициент сжатия несквозных трещин не зависит от прочностных характеристик коррозионностойких сталей 03X20H16AG6 и 12X18H10T, а определяется значением коэффициента асимметрии цикла напряжений R_{σ} .
2. Экспериментально установлены диаграммы усталостного разрушения сталей 03X20H16AG6 и 12X18H10T для максимально углубленной точки



фронта полуэллиптической трещины при различных значениях R_σ .

3. Обосновано трехпараметрическое кинетическое уравнение, описывающее закономерности развития полуэллиптических усталостных трещин в сталях 03X20N16AG6 и 12X18N10T и учитывающее в явном виде значение коэффициента асимметрии напряжений R_σ . Для исследованных сталей установлены значения параметров (характеристик трещиностойкости) предложенного уравнения.

1. *Панасюк В. В., Сушинский А. И., Кацов К. Б.* Разрушение элементов конструкций с несквозными трещинами. — Киев: Наук. думка, 1991. — 172 с.
2. *Красовский А. Я., Орыняк И. В.* Оценка остаточного ресурса сварных швов трубопроводов первого контура АЭС, поврежденных межкристаллитной коррозией // Автомат. сварка. — 2000. — № 9/10. — С. 57–65.
3. *Труфяков В. И.* Прочность сварных соединений при переменных нагрузках. — Киев: Наук. думка, 1990. — 256 с.
4. *Зависимость скорости развития усталостных трещин от асимметрии цикла / В. И. Труфяков, В. В. Кныш, П. П. Михеев, А. З. Кузьменко // Пробл. прочности. — 1987. — № 3. — С. 5–7.*
5. *Влияние асимметрии цикла нагружения и прочностных*

- характеристик на циклическую трещиностойкость конструкционных сплавов с учетом явления закрытия усталостной трещины / В. Т. Трошенко, В. В. Покровский, В. Ю. Подколызин, П. В. Ясний // Там же. — 1991. — № 10. — С. 17–25.*
6. *Пиняк И. С.* Аналитическое описание скорости роста усталостной трещины в металлах при различных асимметриях цикла нагружения // Там же. — 2001. — № 5. — С. 111–119.
7. *Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений / Под ред. Ю. Мураками: В 2 т. — М.: Мир, 1990. — Т. 2. — 1116 с.*
8. *Закономерности развития поверхностных трещин в низколегированной стали при асимметричном циклическом изгибе: Сообщ. 1 / В. И. Летунов, И. В. Крамаренко, Б. С. Шульгинов, В. А. Вайншток // Пробл. прочности. — 1985. — № 11. — С. 17–20.*
9. *Овчинников А. В.* Приближенная формула определения коэффициентов интенсивности напряжений для тел с поверхностными трещинами // Там же. — 1986. — № 2. — С. 44–47.
10. *Копсов И. Э.* Расчет коэффициентов интенсивности напряжений для полуэллиптической поверхностной трещины в неоднородном поле напряжений // Там же. — 1990. — № 7. — С. 38–41.
11. *Махненко В. И., Махненко О. В.* Развитие расчетных методов оценки допустимости выявленных дефектов в сварных соединениях ответственных конструкций // Автомат. сварка. — 2000. — № 9/10. — С. 83–91.

Based on experimental data kinetic diagrams of fatigue fracture of steels 03Kh20N16AG6 and 12Kh18N10T at different values of the coefficient of stress cycle asymmetry are plotted. A three-parameter kinetic equation is proposed describing the regularities of development of non-through-thickness fatigue cracks in the studied steels, and its parameters are determined. The fatigue life values calculated on the basis of the derived equation are compared with the experimental data.

Поступила в редакцию 13.04.2007

Вышел в свет очередной (№ 19) выпуск журнала фирмы «Fronius» Weld+Vision на русском языке

От редактора 3-6

Настойчивые попытки улучшения мира

Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы 7-11

От изобретательства к реальным инновациям

Что нового на рынке «Fronius»

Кратко и по существу 12-13

Новости от «Fronius»

Практические примеры 14-17

Дуговая сварка в защитных газах — большая экономия для оператора общественного транспорта Берлина

Наплавка на фирме «Uhlig GmbH» с использованием цифровой системы TimeTwin

Компания 18-21

Торжественное открытие предприятия в Саттледте: трехдневное празднество

Школа энергии будущего

Информация для путешественников 22-23

Торонто — город этнического разнообразия



По вопросам заказа просьба обращаться в редакцию журнала «Автоматическая сварка»
Тел./факс: (38044) 528-34-84, 529-26-23, 528-04-86; E-mail: journal@paton.kiev.ua