

А. Сиротюк. Вплив частоти та асиметрії циклу навантаження на швидкість поширення корозійно-втомних тріщин / А. Сиротюк, І. Дмитрах // Вісник ТНТУ. — 2013. — Том 72. — № 4. — С.28-36. — (механіка та матеріалознавство).

УДК 620.191.33

А. Сиротюк, канд. техн. наук; І. Дмитрах, докт. техн. наук

Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України

ВПЛИВ ЧАСТОТИ ТА АСИМЕТРІЇ ЦИКЛУ НАВАНТАЖЕННЯ НА ШВИДКІСТЬ ПОШИРЕННЯ КОРОЗІЙНО-ВТОМНИХ ТРІЩИН

Резюме. Побудовано базові діаграми циклічної корозійної тріщиностійкості конструкційних сталей 20, 12Х1МФ та 08Х18Н12Т, які є основою для проведення розрахунків на довговічність, а також відображають вплив частоти й асиметрії циклу навантаження на швидкість поширення корозійно-втомних тріщин. Для досліджених сталей встановлено екстремальні значення частоти навантаження $f = f^*$, тобто такі, коли проявляється максимальний вплив корозивного середовища на ріст корозійно-втомних тріщин. Показано, що зі зростанням коефіцієнта асиметрії циклу від $R = 0$ до $R = 0,7$ для всіх сталей суттєво знижуються характеристики циклічної корозійної тріщиностійкості. При цьому діаграми їх циклічної корозійної тріщиностійкості зміщуються в область менших значень ΔK , а також стають більш стрімкішими. Враховуючи спектр отриманих експериментальних даних, можна стверджувати, що використання методів механіки руйнування і, зокрема, характеристик тріщиностійкості матеріалів для оцінювання та прогнозування залишкового ресурсу елементів різноманітних відповідальних конструкцій дасть можливість не тільки здійснити принципово якісні зміни в підходах до вирішення цієї проблеми, але й сприятиме зближенню вітчизняної нормативної бази з міжнародною.

Ключові слова: конструкційні сталі; робочі корозивні середовища; корозійно-втомні тріщини; швидкість росту тріщини; коефіцієнти інтенсивності напружень; діаграми циклічної тріщиностійкості; частота циклічного навантаження; коефіцієнт асиметрії циклу навантаження.

A. Syrotyuk, I. Dmytrakh

INFLUENCE OF FREQUENCY AND STRESS RATIO OF LOADING CYCLE ON CORROSION FATIGUE CRACK GROWTH RATE

Summary. Based on the results of experimental tests the corrosion fatigue crack growth diagrams for steels 20, 12X1MF and 08X18H12T were constructed, which are the base for durability calculation of structural components. These diagrams also reflect the influence of frequency and stress ration of loading cycle on fatigue cracks propagation under presence of corrosive operating environment.

The frequency of cyclic loading defines the development of fatigue cracks in structural steels under conditions of corrosive-aggressive environments inasmuch as effects on the time of interaction of corrosion environment with the deformed metal at the pre-fracture zone of material. For studied steels the characteristic values of frequency of loading $f = f^*$ were found, when the maximal environmental effect on corrosion fatigue crack growth rate is achieved. Such extreme on frequency dependence is associated with the ratio of rates of the electrochemical reactions flow in the vicinity the crack tip and the formation of new electrochemically active surface due to crack propagation. These data should be used under construction of the basic corrosion fatigue crack growth diagrams, which are intended for further calculation of durability of defected structural elements.

Based on the test results it has been shown that with the increase of stress ration from $R = 0$ to $R = 0.7$ the crack growth resistance of given steels decreases significantly. Under the corrosion fatigue crack growth diagrams shift to the range of lower values of ΔK and their slope increases. Presented results testified the necessity to take into account the effects of the stress ratio under construction of basic diagrams of corrosion fatigue crack growth resistance for durability calculation.

Taking into account the received spectrum of the experimental data it can be stated that application of fracture mechanics methods as well as characteristics of fatigue growth resistance for the assessment of residual lifetime of different structural elements gives the possibility to make the essentially qualitative changes in approaches for solution of this problem and also to converge the national codes with international.

Key words: structural steel; operating corrosive environment; corrosion fatigue crack; crack growth rate; stress intensity factor; diagram of cyclic crack growth resistance; frequency of cyclic loading; stress ratio of loading cycle.

Умовні позначення:

da/dN – швидкість росту тріщини;
 КІН – коефіцієнт інтенсивності напружень;
 K_I – коефіцієнт інтенсивності напружень для тріщин нормального відриву;
 $\Delta K_I = K_{\max} - K_{\min}$ – розмах КІН у циклі навантаження;
 K_{\max} , K_{\min} – відповідно найбільше і найменше значення КІН у циклі навантаження;
 ΔK_* – розмах КІН за швидкості росту тріщини 10^{-7} м/цикл;
 K_{th} – граничне значення КІН, за якого тріщина не розвивається;
 K_{fc} – граничне значення КІН, коли починається остаточне спонтанне руйнування тіла (циклічна в'язкість руйнування);
 f – частота циклічного навантаження;
 R – коефіцієнт асиметрії циклу;
 pH – водневий показник середовища.

Постановка проблеми. Аналіз науково-технічних публікацій, матеріалів міжнародних конференцій та симпозіумів свідчить [1, 2], що у високо розвинених країнах для вирішення проблеми подальшого продовження терміну служби і забезпечення надійної роботи відповідальних конструкцій різних галузей промисловості (машинобудування, енергетика, трубопровідний транспорт тощо) вироблена певна технічна політика, яка скоординована як поміж власниками цих об'єктів, так і між науково-технічними структурами та структурами, що володіють правом інспекції й екологічного нагляду. Дана політика має свою специфіку в різних країнах і визначається цілим рядом взаємопов'язаних економічних, технічних, соціальних та інших чинників.

В інженерно-технічному аспекті в основу цієї політики покладена діагностика фактичного стану металу базового обладнання, який у процесі довготривалої експлуатації суттєво змінює свої механічні, фізико-хімічні та інші властивості. При цьому, в якості наукового інструментарію, широко використовуються сучасні підходи механіки руйнування конструкційних матеріалів [3, 4].

Використання методів механіки руйнування і, зокрема, характеристик тріщиностійкості матеріалів для оцінювання та прогнозування залишкового ресурсу різноманітних відповідальних конструкцій дасть можливість не тільки здійснити принципово якісні зміни в підходах до вирішення цієї проблеми, але й сприяє зближенню вітчизняної нормативної бази з міжнародною.

Для використання діаграм циклічної тріщиностійкості матеріалу в розрахунках залишкової довговічності дефектних елементів конструкцій їх описують аналітично [6–8]. Слід зауважити, що не зважаючи на значну кількість запропонованих у літературі аналітичних виразів для опису повної діаграми циклічної тріщиностійкості, найбільшого поширення в інженерній практиці набув підхід, який базується на використанні степеневі залежності типу Паріса [7, 8]

$$da/dN = C_i \cdot (\Delta K)^{n_i}, \quad (1)$$

де C і n – константи системи «матеріал-середовище», які залежать від хімічного складу і структури матеріалу, умов випробувань та хімічного складу середовища; i – порядковий номер ділянки; $\Delta K_I = K_{\max} - K_{\min}$ – розмах КІН у циклі навантаження; K_{\max} і K_{\min} – відповідно найбільше і найменше значення КІН у циклі навантаження. На загал, рівняння (1) описує другу (середньоамплітудну) ділянку діаграми, однак воно може бути використано і для опису як першої (низькоамплітудної), так третьої (високоамплітудної) ділянок діаграми. Такий підхід є виправданим, оскільки діаграми циклічної тріщиностійкості багатьох матеріалів при випробовуваннях у корозивному

середовищі не мають класичної S-подібної форми, властивої для випробувань в інертних середовищах [4]. Тому для цих випадків доцільно описувати кожен ділянку діаграми степеневу залежністю типу Паріса [9].

Дана робота є частиною комплексних досліджень трьох характерних марок сталей (вуглецевої, низьколегованої та високолегованої), спрямованих на визначення впливу основних експлуатаційних чинників на опір матеріалу поширенню в ньому втомної тріщини. Зокрема, показано вплив складу робочого середовища [9], частоти циклічного навантаження та асиметрії циклу навантажування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Частота циклічного навантаження визначає розвиток втомних тріщин у конструкційних сталях в умовах дії корозивно-агресивних середовищ [4, 13], оскільки впливає на час взаємодії середовища з деформованим металом в околі зони передруйнування матеріалу.

Вважають, що зі зниженням частоти циклічного навантаження швидкість росту втомної тріщини повинна зростати [4]. Однак це справедливо тільки в певному діапазоні частот навантаження $f \geq 1 \dots 2$ Гц. З подальшим зниженням частоти може спостерігатися зворотна тенденція, тобто швидкість росту тріщини може спадати. Це зумовлено тривалою дією корозивного середовища на матеріал, через що відбувається корозійне затуплення вершини тріщини, що спричиняє зменшення ефективної концентрації напружень [14].

Таким чином, доцільно говорити про неоднозначну зміну характеристик циклічної корозійної тріщиностійкості матеріалу зі зміною частоти циклічного навантаження.

Мета роботи. Встановлення впливу частоти й асиметрії циклу навантаження на швидкість поширення корозійно-втомних тріщин у сталях 20, 12Х1МФ та 08Х18Н12Т у заданих експлуатаційних умовах.

Постановка завдання. За діаграмами циклічної тріщиностійкості конструкційних сталей 20, 12Х1МФ та 08Х18Н12Т оцінити вплив частоти й асиметрії циклу навантаження на фізико-механічний стан і залишковий ресурс відповідальних конструктивних елементів.

Методика досліджень. Випробовували балочні зразки перерізом 10×20 мм в умовах чистого згину та синусоїдальної форми циклу навантажування за коефіцієнта асиметрії $R = 0$, температури корозивного робочого середовища $T = 80^\circ\text{C}$ визначеного складу при різній частоті циклічного навантаження ($f = 0,017 \dots 6,5$ Гц). Вплив асиметрії циклу навантаження на швидкість поширення втомної тріщини у повітрі вивчали за $f = 0,1$ Гц (при $R = 0$ та $R = 0,7$). Детальний опис методичних аспектів роботи наведено у монографії [4].

Результати дослідження. На основі проведених випробувань побудовано базові діаграми циклічної корозійної тріщиностійкості досліджених сталей, які є основою для проведення розрахунків на довговічність, а також підтверджують неоднозначність зміни характеристик циклічної корозійної тріщиностійкості матеріалу зі зміною частоти циклічного навантаження. Іншими словами, для кожної системи „матеріал–середовище” існує значення $f = f^*$, коли циклічна корозійна тріщиностійкість матеріалу найменша (рис. 1 – 3). Такий екстремум на частотній залежності пов’язаний зі співвідношенням швидкостей протікання електрохімічних реакцій в околі вершини тріщини та утворенням нової електрохімічно активної поверхні внаслідок розвитку тріщини [15].

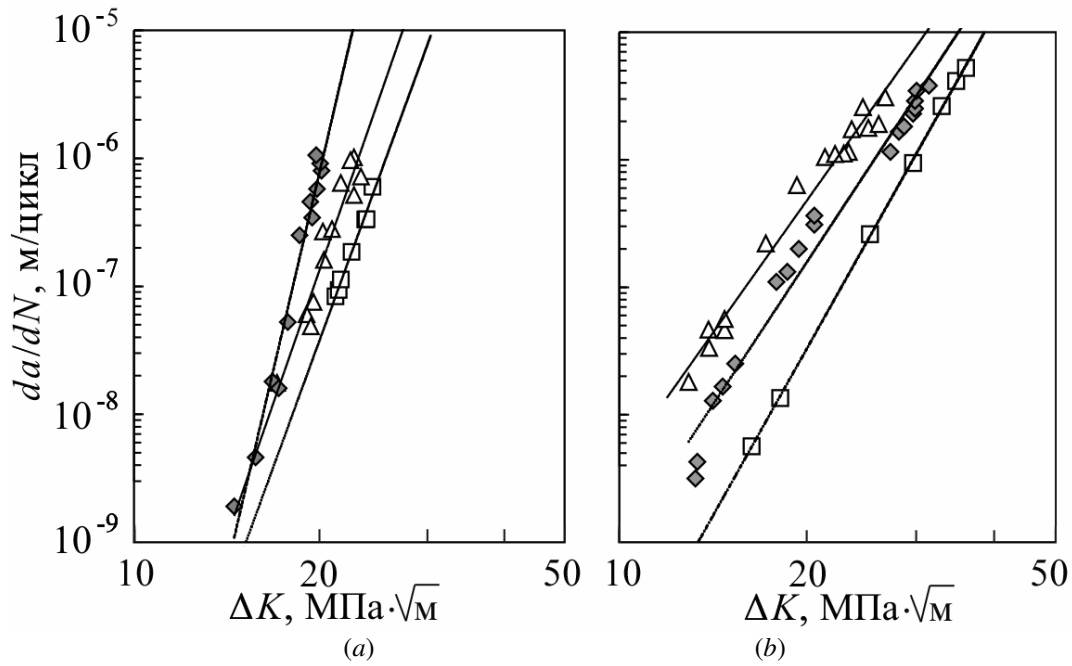


Рисунок 1. Вплив частоти циклічного навантаження на швидкість поширення втомної тріщини у сталях 20 (а) та 12Х1МФ (б) за $R = 0$, $T = 80^\circ\text{C}$, де \square – $f = 0,017$ Гц; \triangle – $f = 0,17$ Гц; \diamond – $f = 1,0$ Гц (середовище: $\text{H}_2\text{O} + \text{NH}_3$ до рН9)

Figure 1. The influence of frequency of cyclic loading on the fatigue crack growth rate in steel 20 (a) and 12X1MΦ (b) under $R = 0$, $T = 80^\circ\text{C}$, where \square – $f = 0.017$ Hz; \triangle – $f = 0.17$ Hz; \diamond – $f = 1.0$ Hz (environment: $\text{H}_2\text{O} + \text{NH}_3$ to pH9)

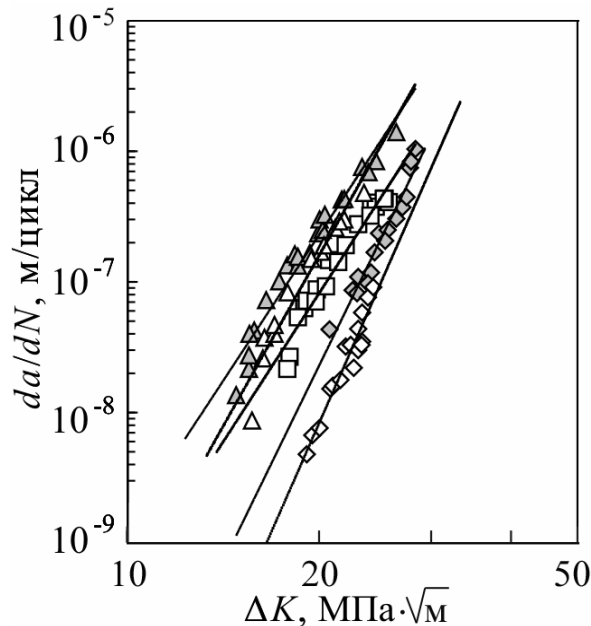


Рисунок 2. Вплив частоти циклічного навантаження на швидкість поширення втомної тріщини у сталі 08Х18Н12Т за $R = 0$, $T = 80^\circ\text{C}$, де \diamond – $f = 0,1$ Гц; \square – $f = 0,33$ Гц; \blacktriangle – $f = 1,0$ Гц; \triangle – $f = 2,0$ Гц; \diamond – $f = 6,5$ Гц (середовище: 1%-ий розчин $\text{H}_3\text{BO}_3 + \text{KOH}$ до рН8 + 10,5 мг/кг KCl)

Figure 2. The influence of frequency of cyclic loading on the fatigue crack growth rate in steel 08X18H12T under $R = 0$, $T = 80^\circ\text{C}$, where \diamond – $f = 0.1$ Hz; \square – $f = 0.33$ Hz; \blacktriangle – $f = 1.0$ Hz; \triangle – $f = 2.0$ Hz; \diamond – $f = 6.5$ Hz (environment: 1% solution $\text{H}_3\text{BO}_3 + \text{KOH}$ to pH8 + 10.5 mg/kg KCl)

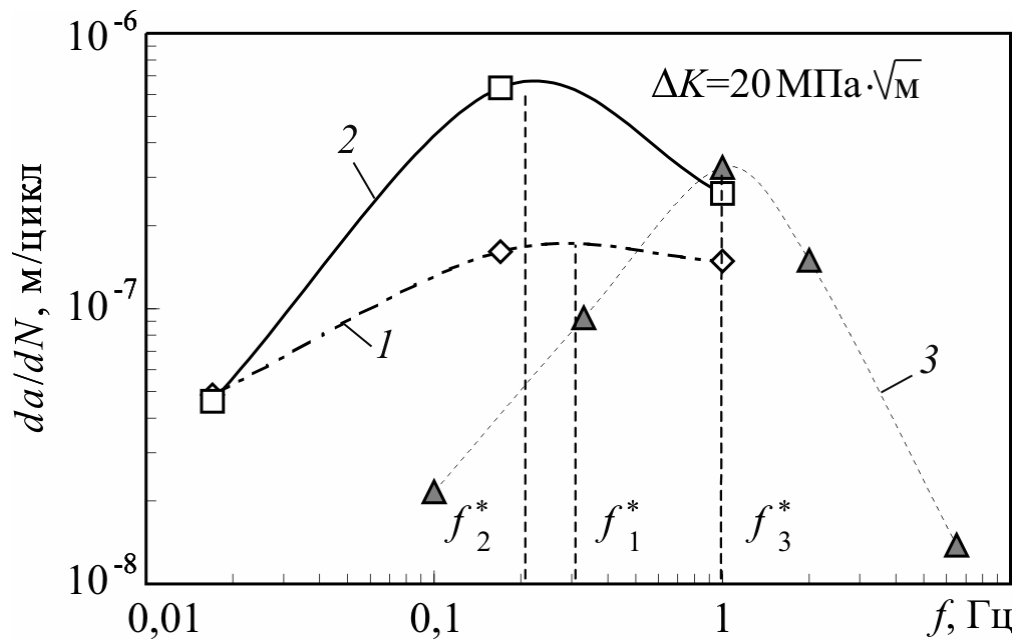


Рисунок 3. Залежність швидкості поширення корозійно-втомної тріщини від частоти циклічного навантаження: 1 – сталь 20; 2 – сталь 12X1MΦ; 3 – сталь 08X18H12T

Figure 3. The dependence of the fatigue crack growth rate versus frequency of cyclic loads: 1 – steel 20; 2 – steel 12X1MΦ; 3 – steel 08X18H12T

Вплив частоти циклічного навантаження на швидкість розвитку корозійно-втомної тріщини характеризує також зміна значень констант у залежності (1) (табл. 1, 2).

Таблиця 1

Вплив частоти циклічного навантаження на константи у залежності
(1) для сталей 20 та 12Х1МФ

Частота навантаження f , Гц	20		12Х1МФ	
	$C, \frac{\text{м/цикл}}{(\text{МПа}\sqrt{\text{м}})^n}$	n	$C, \frac{\text{м/цикл}}{(\text{МПа}\sqrt{\text{м}})^n}$	n
0,017	$3 \cdot 10^{-25}$	13,16	$2 \cdot 10^{-19}$	8,70
0,170	$1 \cdot 10^{-25}$	13,82	$5 \cdot 10^{-16}$	6,89
1,000	$1 \cdot 10^{-33}$	20,54	$3 \cdot 10^{-17}$	7,42

Таблиця 2

Вплив частоти циклічного навантаження на константи у залежності
(1) для сталі 08Х18Н12Т

Частота навантаження f , Гц	$C, \frac{\text{м/цикл}}{(\text{МПа}\sqrt{\text{м}})^n}$	n
0,10	$2 \cdot 10^{-21}$	9,99
0,33	$1 \cdot 10^{-17}$	7,55
1,00	$5 \cdot 10^{-17}$	7,42
2,00	$8 \cdot 10^{-19}$	8,67
6,50	$3 \cdot 10^{-23}$	11,01

Для сталі 20 у діапазоні частот навантаження $f = 0,017 \dots 1,0$ Гц зі збільшенням частоти діаграми циклічної корозійної тріщиностійкості зміщуються в область менших значень ΔK (рис. 1а). При цьому, керуючись отриманими тенденціями (рис. 3, крива 1), можна очікувати екстремуму на частотній залежності, якщо $f^* \approx 0,25$ Гц.

Для сталі 12Х1МФ також існує неоднозначна залежність характеристик циклічної корозійної тріщиностійкості від частоти навантаження у діапазоні $f = 0,017 \dots 1,0$ Гц (рис. 1б). Для даної системи «матеріал-середовище» за частоти навантаження $f^* = 0,17$ Гц середовище найбільше впливає на зменшення характеристик тріщиностійкості (рис. 3, крива 2).

Для сталі 08Х18Н12Т в умовах впливу водного режиму борного регулювання з відхиленнями за хлоридами в досліджуваному діапазоні частот $f = 0,017 \dots 6,5$ Гц екстремальною є частота $f^* = 1,0$ Гц (рис. 3, крива 3). Для цієї частоти спостерігається (рис. 2) найбільше пришвидшення росту тріщини і, відповідно, найменше значення характеристик циклічної корозійної тріщиностійкості.

Наведені значення частоти навантаження $f = f^*$ є одними з параметрів, які визначають екстремальні умови випробувань, тобто такі, коли проявляється максимальний вплив корозивного середовища на ріст корозійно-втомних тріщин. Ці дані необхідно використовувати для побудови базових діаграм циклічної корозійної тріщиностійкості, що будуть використані у розрахунках на довговічність дефектних елементів конструкцій.

На прикладі сталей 20, 12Х1МФ та 08Х18Н12Т [13] вивчено вплив коефіцієнта асиметрії циклу навантаження на розвиток втомних тріщин в умовах дії робочого корозивного середовища (рис. 4).

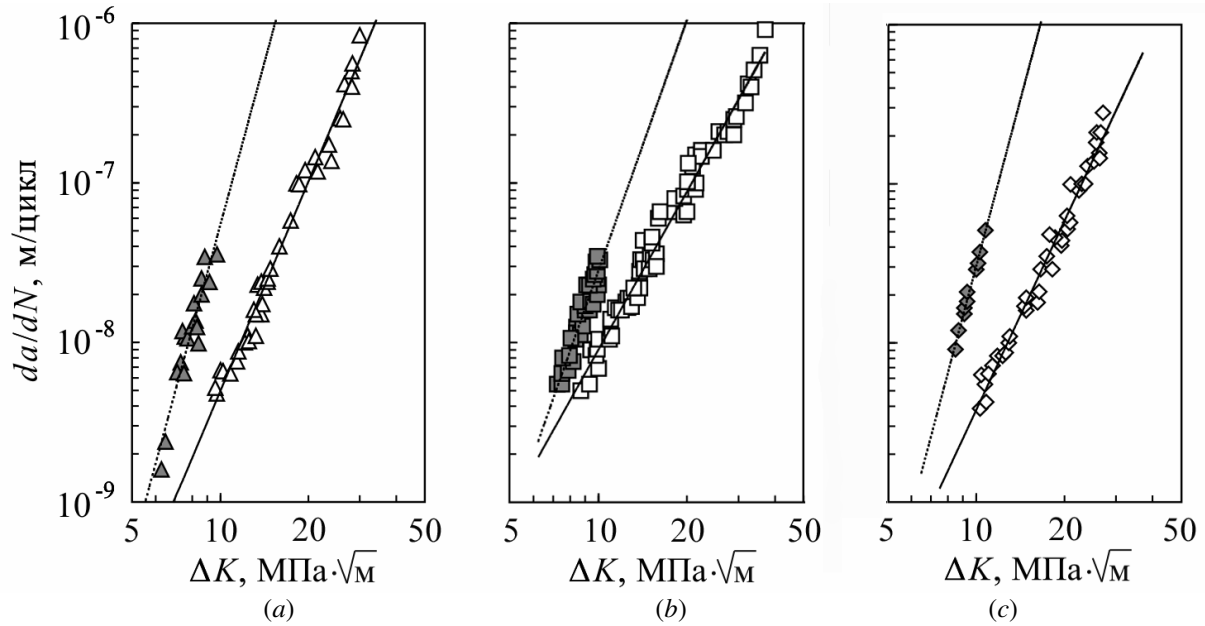


Рисунок 4. Вплив асиметрії циклу навантаження на швидкість поширення втомної тріщини у сталях 20 (a), 12X1MΦ (b) і 08X18H12T (c) у повітрі за $f=0,1$ Гц: $\Delta, \square, \diamond - R=0$; $\blacktriangle, \blacksquare, \blacklozenge - R=0,7$

Figure 4. The influence of stress ratio of loading cycle on the fatigue crack growth rate in steel 20 (a), 12X1MΦ (b) і 08X18H12T (c) in air under $f=0.1$ Hz: $\Delta, \square, \diamond - R=0$; $\blacktriangle, \blacksquare, \blacklozenge - R=0.7$

Виявлено [4, 13], що зі зростанням коефіцієнта асиметрії циклу від 0 до 0,7 для всіх сталей суттєво знижуються характеристики циклічної корозійної тріщиностійкості. При цьому діаграми їх циклічної корозійної тріщиностійкості зміщуються в область менших значень ΔK , а також стають більш стрімкішими, що проявляється у зростанні показника степеня n (табл. 3) у залежності (1).

Таблиця 3

Вплив асиметрії циклу навантаження на константи в залежності (1)

Сталь	$R=0$		$R=0,7$	
	$C, \frac{\text{м/цикл}}{(\text{МПа}\sqrt{\text{м}})^n}$	n	$C, \frac{\text{м/цикл}}{(\text{МПа}\sqrt{\text{м}})^n}$	n
20	$2 \cdot 10^{-13}$	4,36	$1 \cdot 10^{-14}$	6,75
12X1MΦ	$5 \cdot 10^{-12}$	3,28	$2 \cdot 10^{-13}$	5,20
08X18H12T	$4 \cdot 10^{-13}$	3,94	$4 \cdot 10^{-15}$	6,93

Наведені результати свідчать про необхідність враховувати коефіцієнт асиметрії циклу навантаження під час побудови базових (для розрахунків на довговічність) діаграм циклічної корозійної тріщиностійкості сталей.

Висновки. За результатами випробувань для досліджених систем «матеріал-середовище» встановлено характеристичні значення частоти навантаження $f=f^*$, за яких проявляється максимальний вплив робочого середовища на ріст корозійно-втомних тріщин, зокрема:

- для сталі 20 у досліджуваному діапазоні частот $f=0,017...1,0$ Гц екстремальною є частота $f^* \approx 0,25$ Гц;
- для сталі 12X1MΦ у досліджуваному діапазоні частот $f=0,017...1,0$ Гц екстремальною є частота $f^* = 0,17$ Гц;
- для сталі 08X18H12T у досліджуваному діапазоні частот

$f = 0,017...6,5$ Гц екстремальною є частота $f^* = 1,0$ Гц.

На основі проведених експериментальних випробувань показано, що зі зростанням коефіцієнта асиметрії циклу від $R=0$ до $R=0,7$ для всіх досліджених сталей суттєво знижуються характеристики циклічної корозійної тріщиностійкості. При цьому діаграми їх циклічної корозійної тріщиностійкості зміщуються в область менших значень ΔK , а також стають більш стрімкішими.

Conclusions. For studied system “material-environment” the characteristic values of loading frequency $f = f^*$ were determined, when the maximal environmental effect on corrosion fatigue crack growth rate is available, namely:

- for the steel 20 the extreme frequency is $f^* \approx 0.25$ Hz at the test frequency range $f = 0.017...1.0$ Hz ;
- for the steel 12X1MΦ the extreme frequency is $f^* \approx 0.17$ Hz at the test frequency range $f = 0.017...1.0$ Hz ;
- for the steel 08X18H12T the extreme frequency is $f^* \approx 1.0$ Hz at the test frequency range $f = 0.017...6.5$ Hz .

Based on the test results it has been shown that with the increase of stress ration from $R=0$ to $R=0.7$ the crack growth resistance of given steels decreases significantly, the corrosion fatigue crack growth diagrams being shifted to the range of lower values of ΔK and their slope increases.

Список використаної літератури

1. Fracture of Materials and Structures from Micro to Macro Scale: 18th European Conference on Fracture, 30.08 – 03.09.2010: Book of Abstracts. – Dresden (Germany): DVM, 2010. – 385 p.
2. Fracture Mechanics of Materials and Structures: First Greek-Ukrainian, First Greek National Conference, 21 – 23.10.2010: proceedings. – Xanti (Greece): Democritus University of Thrace, 2010. – 119 p.
3. Pluinage, G. Fatigue and fracture emanating from notch; the use of the notch stress intensity factor / G. Pluinage // Nuclear Engineering and Design. – 1998. – V. 185, Is. 2–3. – P. 173 – 184.
4. Дмитрах, І.М. Вплив корозійних середовищ на локальне руйнування металів біля концентраторів напружень [Текст] / І.М. Дмитрах, В.В. Панасюк. – Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка, 1999. – 341 с.
5. Панасюк, В.В. Характеристики корозійної тріщиностійкості матеріалів та їх значення в проблемі забезпечення експлуатаційної надійності теплоенергетичного обладнання. Частина I [Текст] / В.В. Панасюк, І.М. Дмитрах, А.Б. Вайнман та ін. // Енергетика та електрифікація. – 1998. – № 6. – С. 29 – 35.
6. Ярема, С.Я. Методология определения характеристик сопротивления развитию трещин (трещиностойкости) материалов при циклическом нагружении [Текст] / С.Я. Ярема // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 1981. – Т. 17, № 4. – С. 100 – 110.
7. Paris, P.C. A rational analytic theory of fatigue / P.C. Paris, M.P. Gomez, W.E. Anderson // The Trend in Engineering. – 1961. – Vol. 13, № 1. – P. 9 – 14.
8. Paris, P. A critical analysis of crack propagation laws / P. Paris, F. Erdogan // Journal of Basic Engineering. – 1963. – Vol. 85, № 4. – P. 528 – 533.
9. Сиротюк, А. Вплив хімічного складу середовища на швидкість поширення корозійно-втомних тріщин [Текст] / А. Сиротюк, І. Дмитрах // Вісник ТНТУ. – 2013. – Т. 70, № 2. – С. 73 – 79 (механіка та матеріалознавство).
10. Панасюк, В.В. Механіка квазіхрупкого руйнування матеріалів [Текст] / В.В. Панасюк. – К.: Наук. думка, 1991. – 416 с.
11. Панасюк, В.В. Метод визначення порогового коефіцієнта інтенсивності напружень K_{ISCC} [Текст] / В.В. Панасюк, І.М. Дмитрах // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 1995. – Т. 31, № 1. – С. 76 – 80.
12. Panasyuk, V.V. Fatigue crack growth in corrosive environment / V.V. Panasyuk, L.V. Ratyck, I.N. Dmytrakh // Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. – 1984. – V. 7, Is. 1. – P. 1 – 11.
13. Механіка руйнування та міцність матеріалів [Текст]: довідн. посіб.; за заг. ред. В.В. Панасюка. – К.: Академперіодика, 2005. [Т. 7]: Надійність та довговічність елементів конструкцій теплоенергетичного устаткування / І.М. Дмитрах, А.Б. Вайнман, М.Г. Стащук, Л.Тот; за ред. І. М. Дмитраха. – К.: Академперіодика, 2005. – 378 с.

14. Dmytrakh, I.M. On corrosion fatigue initiation from notches and the local corrosion fracture approaches / I.M. Dmytrakh // Notch Effects in Fatigue and Fracture: NATO Science Series II. Mathematics, Physics and Chemistry. – The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2001. – V. 11. – P. 331 – 346.
15. Дмитрах, І.М. Проблеми оцінки роботоздатності та ризику руйнування елементів конструкцій теплоенергетичного устаткування [Текст] / І.М. Дмитрах // Актуальні проблеми сучасного матеріалознавства. – К.: Академперіодика, 2008. – Т. 2. – С. 598 – 613.

Отримано 09.07.2013