Коррозионный рост трещин и усталостная прочность сложных технических систем

К.ф.-м.н., старший научный сотрудник А.Р. Арутюнян;
д.ф.-м.н., профессор Р.А. Арутюнян,
ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный университет»

Аннотация. Рассматривается проблема надежности сложных механических систем, состоящих из некоторого числа элементов с дефектами типа трещин, скорость роста которых в значительной степени определяется процессами коррозионной усталости. К таким системам могут быть отнесены различные инженерные конструкции: энергетические, транспортные, химические и др.

Учитывая, что надежность системы в целом зависит от надежности отдельных элементов и способа их соединения, авторы рассмотрели системы с последовательным, параллельным соединением элементов и системы с резервированием. Для каждой системы определены функции надежности на основе распределения Вейбулла. Сформулированы критерии коррозионной усталости и построены соответствующие кривые усталостной прочности.

По результатам расчетов получены практические рекомендации по проектированию сложных технических систем.

Ключевые слова: рост коррозионных трещин; критерий прочности Гриффитса; сложные механические системы; последовательное соединение элементов; соединение элементов с резервированием; критерий усталости

Постановка задачи

Большинство современных технических систем подвергаются воздействию циклических нагрузок различной частоты. Такие нагрузки приводят к усталостным разрушениям [1, 2], которые, согласно мировой статистике, составляют от 80 до 90% всех разрушений. В последние десятилетия в связи с многочисленными случаями эксплуатационных разрушений в различных областях инженерной практики, возникающих при низких, но длительно действующих циклических нагрузках, выполнены многочисленные исследования в области многоцикловой (гигацикловой) усталости [3–5]. Эти исследования, востребованные во многих областях современной инженерной практики, в частности в строительстве (мосты, платформы, различные транспортные системы), указывают на необходимость пересмотра концепции существования бесконечной долговечности при напряжениях ниже предела усталости.

Обзор литературы

Как показывают многочисленные опыты [6–12], выполненные над различными конструкционными материалами, под воздействием коррозионной среды на кривых усталости не наблюдается явно выраженного предела усталости. Эти положения являются достоверными в случае воздействия циклических нагрузок и агрессивных (коррозионных) сред. При наличии коррозионной среды происходит интенсификация физико-химических процессов, соответственно, возникновение некоторых характерных эффектов. Действительно, при наличии коррозионной среды на кривых усталости отсутствует горизонтальный участок, а на кинетических диаграммах роста коррозионно-усталостных трещин не удается выделить пороговое значение коэффициента интенсивности напряжений [13, 14]. Таким образом, отсутствуют показатели, по которым можно вести расчет на долговременную эксплуатационную надежность материалов и конструкций. Для учета этих положений и формулировки критерия коррозионно-усталостной прочности в работе используются методы механики материалов, в частности, уравнение роста трещин и методы теории надежности.

Кинетическое уравнение роста коррозионных трещин

Для роста трещины в коррозионной среде формулируется кинетическое уравнение, основанное на описании химических процессов растворения металла в кончике трещины. Считается, что коррозионные процессы контролируются кинетическим уравнением, соответствующим реакции разложения твердого раствора, а коэффициент интенсивности напряжений является ответственным за ускорение коррозионных процессов [14]. Как показывают

опыты, при воздействии агрессивной среды происходит ускорение роста трещин усталости. При этом получаются разнообразные диаграммы коррозионно-усталостного роста трещины [13], скорость которой зависит, в частности, от частоты нагружения. Для описания этих эффектов в работе предлагается записывать кинетическое уравнение роста трещин в шкале эффективного времени [12]: $z = tf^{\alpha} = Nf^{\alpha-1}$ ($f = N/t$), где f – частота нагружения; t – реальное время; N – число циклов нагружения; α – постоянная.

Исходя из этих положений, запишем кинетическое уравнение роста коррозионных трещин в следующем виде:

$$\frac{dl}{dz} = F(\Delta K) z^{\beta}, \tag{1}$$

где l – текущая длина трещины; ΔK – размах коэффициента интенсивности напряжений за цикл; F – некоторая функция от ΔK; β – постоянная.

Далее для функции F принимается степенная зависимость в виде:

$$F(\Delta K) = K_1 (\Delta K)^m, \tag{2}$$

где K_1, m – постоянные.

Внося (2) в уравнение (1) и записывая это уравнение через число циклов нагружения, когда $z = N$ ($\alpha = 1$), получим:

$$\frac{dl}{dN} = K_1 (\Delta K)^m N^{\beta}. \tag{3}$$

При $\beta = 0$ из уравнения (1) следует кинетическое уравнение Пэриса – Эрдогана [15].

Принимая $\Delta K = \Delta\sigma\sqrt{\pi l}$ ($\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$, σ_{max}, σ_{min} – максимальное и минимальное напряжения за цикл) и начальные условия $N = 0$, $l = l_0$, получим решение уравнения (3) в виде:

$$l = \left[\frac{2-m}{2(\beta+1)} (\Delta\sigma)^m \pi^{m/2} K_1 N^{\beta+1} + l_0^{\frac{2-m}{2}} \right]^{\frac{2}{2-m}}. \tag{4}$$

Для описания чисто коррозионного роста трещин в уравнении (1) можно считать $F(\Delta K) = const = F_0$, $\alpha = 0$ ($z = t$), тогда из (1) следует:

$$\frac{dl}{dt} = F_0 t^{\beta}. \tag{5}$$

Решение уравнения (5) при начальном условии $N = 0$, $l = l_0$ имеет вид:

$$l = \frac{F_0}{\beta+1} t^{\beta+1} + l_0. \tag{6}$$

На рисунке 1 показаны кривые роста трещин усталости для разных значений напряжений согласно формулам (4) и (6). Приняты следующие значения коэффициентов: $m = 4$, $l_0 = 10^{-6}$ м, $\beta = 1$, $F_0 = 5 \cdot 10^{-20} [м] \cdot [цикл.]^{-2}$, $K_1 = 3 \cdot 10^{-15} [м]^{-1} \cdot [цикл.]^{-2} \cdot [МПа]^{-4}$.

Согласно кривым на рисунке 1, в случае отсутствия внешнего напряжения после инкубационного периода наблюдается медленный рост трещины (кривая 3). При воздействии напряжения и коррозионной среды инкубационный период завершается ускоренным ростом трещины до разрушения образца (кривые 1, 2).

В механике материалов считается, что разрушение образца с трещиной наступает при достижении длины трещины критической величины l_*. В случае хрупких материалов условие разрушения определяется критерием Гриффитса [16], согласно которому критическая длина трещины соответствует уровню критического напряжения

$$l_* = \frac{2\gamma E}{\pi(\Delta\sigma)^2}, \tag{7}$$

где γ – поверхностная энергия; E – модуль Юнга.

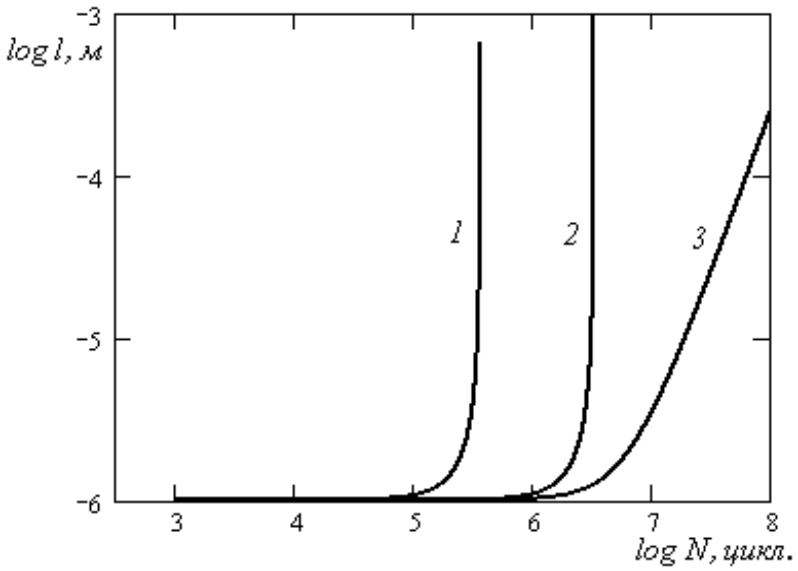

Рисунок 1. Теоретические кривые роста трещин усталости по формуле (4): кривая 1 – $\Delta\sigma = 150MPa$, кривая 2 – $\Delta\sigma = 50MPa$ и по формуле (6) – кривая 3

Отметим, что в случае циклических нагружений при построении кривых усталости в качестве $\Delta\sigma$ следует рассматривать амплитуду напряжения $\sigma_a = (\sigma_{max} - \sigma_{min})/2$ или максимальное напряжение цикла σ_{max}.

Согласно концепции Гриффитса разрушение не произойдет, если длина трещины меньше критической. При этом не рассматривается практически важный случай медленного роста трещин меньше критических размеров под воздействием напряжений и коррозионной среды, когда рост трещины можно описать с помощью соотношения (4). Этот подход используется при формулировке критерия прочности для элемента среды и сложных механических систем.

Критерий усталости для образца (элемента среды)

Сначала рассмотрим критерий усталости для элемента среды, дефектное состояние которого определяется некоторым числом начальных трещин, размеры которых изменяются в пределах $l_0 \le l \le l_*$. Считая распределение размеров начальных трещин случайным, функцию надежности зададим в виде экспоненциальной зависимости Вейбулла [17]:

$$R_0(l) = \frac{e^{-\lambda l^\varphi} - e^{-\lambda l_*^\varphi}}{e^{-\lambda l_0^\varphi} - e^{-\lambda l_*^\varphi}}, \tag{8}$$

где λ, φ – постоянные.

С учетом (4) функцию надежности (8) можно записать через число циклов нагружения N:

$$R_0(N) = \frac{e^{-\lambda l^\varphi(N)} - e^{-\lambda l_*^\varphi}}{e^{-\lambda l_0^\varphi} - e^{-\lambda l_*^\varphi}}. \tag{9}$$

Задавая уровень надежности $R_0 = R_*$ и учитывая уравнение (4), из соотношения (9) получим критерий усталостной прочности для элемента среды:

$$(\Delta\sigma)^m N^{\beta+1} = \frac{2(\beta+1)}{(2-m)\pi^{m/2}K_1}\left[\left(-\frac{1}{\lambda}ln(C)\right)^{\frac{2-m}{2\varphi}} - l_0^{\frac{2-m}{2}}\right], \quad (10)$$

где $C = R_*\left(e^{-\lambda l_0^{\varphi}} - e^{-\lambda l_*^{\varphi}}\right) + e^{-\lambda l_*^{\varphi}}$; $l_* = \frac{2\gamma E}{\pi(\Delta\sigma)^2}$.

Вероятностный критерий коррозионно-усталостной прочности сложных механических систем

Далее формулируется вероятностный критерий [17–22] коррозионно-усталостной прочности сложных систем с последовательным соединением элементов и с резервированием.

Пусть элементы взаимодействуют так, что отказ любого из них приводит к отказу системы. Такое соединение называют последовательным. При одинаковых показателях надежности всех элементов функция надежности последовательно соединенных n элементов имеет вид:

$$R(N) = R_0^n(N) = \left(\frac{e^{-\lambda l^{\varphi}(N)} - e^{-\lambda l_*^{\varphi}}}{e^{-\lambda l_0^{\varphi}} - e^{-\lambda l_*^{\varphi}}}\right)^n. \quad (11)$$

Задавая уровень надежности $R = R_*$ и учитывая уравнение (4), из соотношения (11) получим критерий усталостной прочности для системы с последовательным соединением элементов:

$$(\Delta\sigma)^m N^{\beta+1} = \frac{2(\beta+1)}{(2-m)\pi^{m/2}K_1}\left(\left(-\frac{1}{\lambda}ln(C_1)\right)^{\frac{2-m}{2\varphi}} - l_0^{\frac{2-m}{2}}\right), \quad (12)$$

где $C_1 = R_*^{\frac{1}{n}}\left(e^{-\lambda l_0^{\varphi}} - e^{-\lambda l_*^{\varphi}}\right) + e^{-\lambda l_*^{\varphi}}$; $l_* = \frac{2\gamma E}{\pi(\Delta\sigma)^2}$.

В случае параллельного соединения k элементов отказ системы будет происходить при отказе всех элементов, а функция надежности будет выражаться в виде:

$$R(N) = 1 - [1 - R_0(N)]^k = 1 - \left(1 - \frac{e^{-\lambda l^{\varphi}(N)} - e^{-\lambda l_*^{\varphi}}}{e^{-\lambda l_0^{\varphi}} - e^{-\lambda l_*^{\varphi}}}\right)^k. \quad (13)$$

Критерий коррозионной усталости для систем с параллельным соединением элементов имеет вид:

$$(\Delta\sigma)^m N^{\beta+1} = \frac{2(\beta+1)}{(2-m)\pi^{m/2}K_1}\left\{\left[-\frac{1}{\lambda}ln(C_2)\right]^{\frac{2-m}{2\varphi}} - l_0^{\frac{2-m}{2}}\right\}, \quad (14)$$

где $C_2 = \left[1 - (1 - R_*)^{\frac{1}{k}}\right]\left(e^{-\lambda l_0^{\varphi}} - e^{-\lambda l_*^{\varphi}}\right) + e^{-\lambda l_*^{\varphi}}$; $l_* = \frac{2\gamma E}{\pi(\Delta\sigma)^2}$.

В случае общего резервирования с k параллельно и n последовательно соединенными элементами функция надежности и критерий усталости выражаются в виде:

$$R(N)=1-\left[1-R_0^n(N)\right]^k=1-\left[1-\left(\frac{e^{-\lambda l^{\varphi}(N)}-e^{-\lambda l_*^{\varphi}}}{e^{-\lambda l_0^{\varphi}}-e^{-\lambda l_*^{\varphi}}}\right)^n\right]^k; \quad (15)$$

$$(\Delta\sigma)^m N^{\beta+1}=\frac{2(\beta+1)}{(2-m)\pi^{m/2}K_1}\left(\left(-\frac{1}{\lambda}ln(C_3)\right)^{\frac{2-m}{2\varphi}}-l_0^{\frac{2-m}{2}}\right), \quad (16)$$

где $C_3=\left[1-\left(1-R_*\right)^{\frac{1}{k}}\right]^{\frac{1}{n}}\left(e^{-\lambda l_0^{\varphi}}-e^{-\lambda l_*^{\varphi}}\right)+e^{-\lambda l_*^{\varphi}}$, $l_*=\frac{2\gamma E}{\pi(\Delta\sigma)^2}$.

В случае раздельного резервирования функция надежности и критерий усталости выражаются следующими соотношениями:

$$R(N)=\left[1-\left(1-R_0(N)\right)^k\right]^n=\left[1-\left(1-\frac{e^{-\lambda l^{\varphi}(N)}-e^{-\lambda l_*^{\varphi}}}{e^{-\lambda l_0^{\varphi}}-e^{-\lambda l_*^{\varphi}}}\right)^k\right]^n; \quad (17)$$

$$(\Delta\sigma)^m N^{\beta+1}=\frac{2(\beta+1)}{(2-m)\pi^{m/2}K_1}\left(\left(-\frac{1}{\lambda}ln(C_4)\right)^{\frac{2-m}{2\varphi}}-l_0^{\frac{2-m}{2}}\right), \quad (18)$$

где $C_4=\left[1-\left(1-R_*^{\frac{1}{n}}\right)^{\frac{1}{k}}\right]\left(e^{-\lambda l_0^{\varphi}}-e^{-\lambda l_*^{\varphi}}\right)+e^{-\lambda l_*^{\varphi}}$, $l_*=\frac{2\gamma E}{\pi(\Delta\sigma)^2}$.

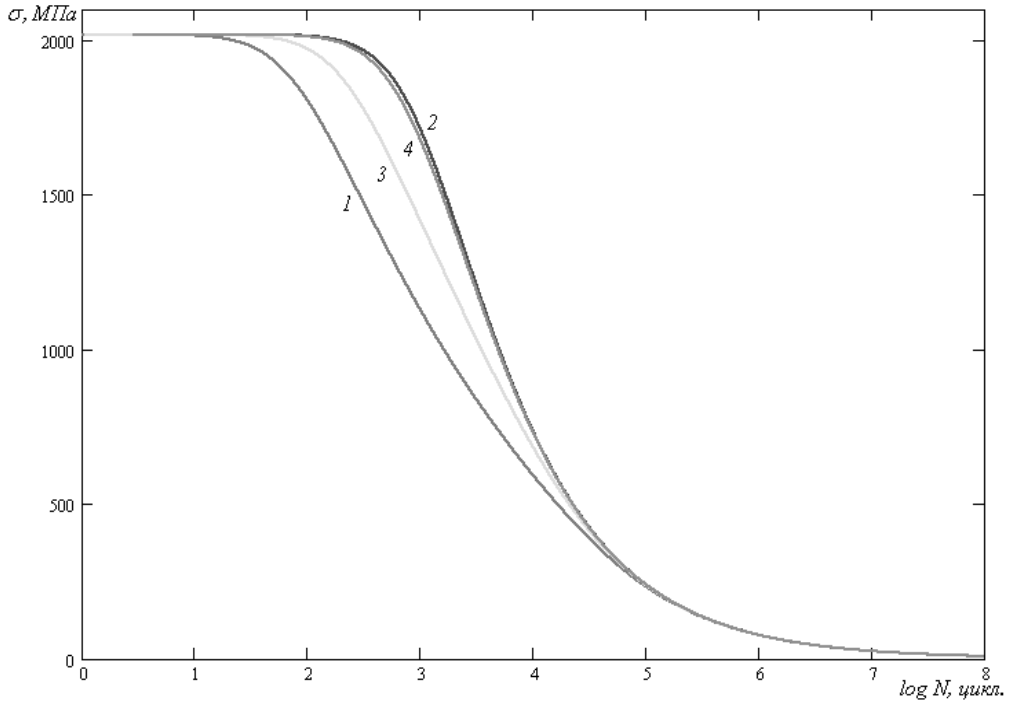

Рисунок 2. Кривые коррозионной усталости при $\beta=1$: 1 – последовательное, 2 – параллельное соединение элементов, 3 – случай общего и 4 – раздельного резервирования

Теоретические кривые усталости согласно формулам (12), (14), (16) и (18) отмечены на рисунке 2 цифрами 1, 2, 3 и 4 соответственно. При расчетах по этим формулам были использованы следующие величины коэффициентов: $K_1 = 3 \cdot 10^{-15} [м]^{-1} \cdot [цикл.]^{-2} \cdot [МПа]^{-4}$, $m = 4$, $l_0 = 10^{-3}$ м, $R_* = 0,8$, $C = 7,5 \cdot 10^{-11} [м]^{-1} \cdot [цикл.]^{-2} \cdot [МПа]^{-4}$, $\gamma = 0,15$ Дж/м^2, $E = 10^5$ МПа, $\lambda = 5[м]^{-1}$, $k = 10$, $n = 20$, $\varphi = 2$, $\beta = 1$.

Как следует из рисунка 2, на начальном и конечном участках кривые усталости совпадают. Значительное различие кривых усталости наблюдается на среднем участке.

Заключение

Сформулированы кинетические уравнения роста коррозионно-усталостных трещин и критерии усталостной прочности для образца с трещиной и сложных технических систем. Предполагается, что коррозионные процессы контролируются кинетическим уравнением, соответствующим реакции разложения твердого раствора, а коэффициент интенсивности напряжений является ответственным за ускорение коррозионных процессов. Считается, что в начальном состоянии трещины имеют размеры, которые являются безопасными для данного уровня напряжений. Под воздействием коррозионной среды происходит медленный квазистатический рост трещины и при достижении ее длиной критической величины, соответствующей данному уровню напряжения, настает мгновенное хрупкое разрушение согласно критерию хрупкой прочности Гриффитса.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Предложенные кинетические уравнения роста коррозионных трещин описывают характерные кривые роста коррозионно-усталостных трещин при отсутствии внешнего напряжения, которые отличаются от соответствующих кривых, полученных под воздействием внешнего напряжения.

2. Сформулированы критерии усталости для образца (элемента среды) и для сложных технических систем с последовательным соединением элементов и с резервированием, которые выражаются в виде единой аналитической зависимости и описывают все участки экспериментальных кривых усталости. Этот результат является новым в мировой научной литературе по усталости.

3. Показано, что долговечность сложных систем, построенных по принципу резервирования, значительно выше по сравнению с системой без резервирования. При этом схемы параллельного и раздельного резервирования являются наиболее надежными.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты №12-01-00594, №12-01-31257).

Литература

1. Вейбулл В. Усталостные испытания и анализ их результатов. М.: Машиностроение, 1964. 276 с.
2. Коцаньда С. Усталостное растрескивание металлов. М.: Металлургия, 1990. 623 с.
3. Schijve J. Fatigue of structures and materials in the 20th century and the state of the art // International journal of fatigue. 2003. Vol. 25. Issue 8. Pp. 679–702.
4. Ботвина Л.А. Гигацикловая усталость – новая проблема физики и механики разрушения // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2004. №4. С. 41–51.
5. Bathias C. There is no infinite fatigue life in metallic materials // Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. 1999. Vol. 22. No.7. Pp. 559–565.
6. Chlistovsky R.M., Heffernan P.J., DuQuesnay D.L. Corrosion-fatigue behaviour of 7075-T651 aluminum alloy subjected to periodic overloads // International Journal of Fatigue. 2007. Vol. 29. Issues 9–11. Pp. 1941–1949.

7. Nan Z.Y., Ishihara S., Goshima T. Corrosion fatigue behavior of extruded magnesium alloy AZ31 in sodium chloride solution // International Journal of Fatigue. 2008. Vol. 30. Issue 7. Pp. 1181–1188.
8. Beretta S., Carboni M., Fiore G., Lo Conte A. Corrosion–fatigue of A1N railway axle steel exposed to rainwater // International Journal of Fatigue. 2010. Vol. 32. Issue 7. Pp. 952–961.
9. Bayraktar E., Mora R., Garcia I.-M., Bathias C. Heat treatment, surface roughness and corrosion effects on the damage mechanism of mechanical components in the very high cycle fatigue regime // International Journal of Fatigue. 2009. Vol. 31. Issue 10. Pp. 1532–1540.
10. Nascimento M.P., Voorwald H.J.C. Considerations on corrosion and weld repair effects on the fatigue strength of a steel structure critical to the flight-safety // International Journal of Fatigue. 2010. Vol. 32. Issue 7. Pp. 1200–1209.
11. Wasekar N.P., Jyothirmayi A., Sundararajan G. Influence of prior corrosion on the high cycle fatigue behavior of microarc oxidation coated 6061-T6 Aluminum alloy // International Journal of Fatigue. 2011. Vol. 33. Issue 9. Pp. 1268–1276.
12. Shahnewaz Bhuiyan Md., Mutoh Y. Corrosion fatigue behavior of conversion coated and painted AZ61 magnesium alloy // International Journal of Fatigue. 2011. Vol. 33. Pp. 1548–1556.
13. Романив О.Н., Никифорчин Г.Н. Механика коррозионного разрушения конструкционных сплавов. М.: Металлургия, 1986. 294 с.
14. Арутюнян Р.А., Денисова А.А. Кинетика роста коррозионных трещин и критерий усталостного разрушения // Вестник СПбГУ. Серия 1: Математика. Механика. Астрономия. Вып. 3. №17. С. 60–64.
15. Пэрис П., Эрдоган Ф. Критический анализ законов распространения трещин // Техническая механика. Труды Американского общества инженеров механиков. 1963. Серия D. Том 85. №4. С. 60–68.
16. Griffith A.A. The theory of rupture // Proceedings of the First International Congress of Applied Mechanics. Delft, 1924. Pp. 58–63.
17. Weibull W. A statistical distribution function of wide applicability // Journal of Applied Mechanics. 1951. Vol. 18. No.3. Pp. 293–297.
18. Арутюнян Р.А. Проблема деформационного старения и длительного разрушения в механике материалов. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2004. 252 с.
19. Гумбель Э. Статистика экстремальных значений. М.: Мир, 1965. 450 с.
20. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. М.: Машиностроение, 1984. 312 с.
21. Арутюнян Р.А. Об одной вероятностной модели усталостного разрушения сложных систем // Доклады РАН. 1993. Т. 332. №3. С. 317–318.
22. Арутюнян Р.А. Оценка надежности сложных инженерных систем в условиях циклических нагружений // Вестник СПбГУ. Серия 1. Математика. Механика. Астрономия. 1998. Вып. 4. №22. С. 64–67.

Александр Робертович Арутюнян, Санкт-Петербург, Россия
Тел. раб.: +7(812)526-65-91; эл. почта: arutalr@rambler.ru

Роберт Ашотович Арутюнян, Санкт-Петербург, Россия
Тел. раб.: +7(812)526-65-91; эл. почта: Robert.Arutyunyan@paloma.spbu.ru

© Арутюнян А.Р., Арутюнян Р.А., 2013

doi: 10.5862/MCE.44.5

Corrosion cracking propagation and fatigue strength of complex technical systems

A.R. Arutyunyan,
St. Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia
+7(812)5266591; e-mail: arutalr@rambler.ru
R.A. Arutyunyan,
St. Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia
+7(812)5266591; e-mail: Robert.Arutyunyan@paloma.spbu.ru

Key words

development of corrosion cracks; Griffit's strength criterion; complex mechanical systems; elements connected in series; elements connected with reservation; fatigue fracture criterion

Abstract

The reliability problem of complex mechanical systems composed of some number of elements with the crack type defects, which growth rate is essentially governed by the processes of corrosion fatigue, was considered. Among these systems there are different engineering constructions: energetic, transport, chemical and others.

Taking into account that the reliability of a system as a whole depends on the reliability of individual elements and the way of their connection, the systems with the elements connected parallel, in series and with reserved elements were considered. For each system the reliability function, based on the Poisson's and Weibull's distribution, was defined. The criteria for corrosion fatigue for each system were formulated and corresponding fatigue curves were constructed.

In accordance with these results the practical suggestions how to design the most reliable systems were derived.

References

1. Veybull V. *Ustalostnyye ispytaniya i analiz ikh rezultatov* [Fatigue experiments and analisys of results]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1964. 276 p. (rus)
2. Kotsanda S. *Ustalostnoye rastreskivaniye metallov* [Fatigue cracking of metallic materials]. Moscow: Metallurgiya, 1990. 623 p. (rus)
3. Schijve J. Fatigue of structures and materials in the 20th century and the state of the art. *International Journal of Fatigue*. 2003. Vol. 25. Pp. 679–702.
4. Botvina L. A. *Plant laboratory. Diagnostics of materials*. 2004. Vol. 70. No.4. Pp. 41–51. (rus)
5. Bathias C. There is no infinite fatigue life in metallic materials. *Fatigue Fracture Engineering Materials Structures*. 1999. Vol. 22. No.7. Pp. 559–565.
6. Chlistovsky R.M., Heffernan P.J., DuQuesnay D.L. Corrosion-fatigue behaviour of 7075-T651 aluminum alloy subjected to periodic overloads. *International Journal of Fatigue*. 2007. Vol. 29. Issues 9–11. Pp. 1941–1949.
7. Nan Z.Y., Ishihara S., Goshima T. Corrosion fatigue behavior of extruded magnesium alloy AZ31 in sodium chloride solution. *International Journal of Fatigue*. 2008. Vol. 30. Issue 7. Pp. 1181–1188.
8. Beretta S., Carboni M., Fiore G., Lo Conte A. Corrosion–fatigue of A1N railway axle steel exposed to rainwater. *International Journal of Fatigue*. 2010. Vol. 32. Issue 7. Pp. 952–961.
9. Bayraktar E., Mora R., Garcia I.-M., Bathias C. Heat treatment, surface roughness and corrosion effects on the damage mechanism of mechanical components in the very high cycle fatigue regime. *International Journal of Fatigue*. 2009. Vol. 31. Issue 10. Pp. 1532–1540.
10. Nascimento M.P., Voorwald H.J.C. Considerations on corrosion and weld repair effects on the fatigue strength of a steel structure critical to the flight-safety. *International Journal of Fatigue*. 2010. Vol. 32. Issue 7. Pp. 1200–1209.
11. Wasekar N.P., Jyothirmayi A., Sundararajan G. Influence of prior corrosion on the high cycle fatigue behavior of microarc oxidation coated 6061-T6 Aluminum alloy. *International Journal of Fatigue*. 2011. Vol. 33. Issue 9. Pp. 1268–1276.

12. Shahnewaz Bhuiyan Md., Mutoh Y. Corrosion fatigue behavior of conversion coated and painted AZ61 magnesium alloy. *International Journal of Fatigue*. 2011. Vol. 33. Pp. 1548–1556.

13. Romaniv O.N., Nikiforchin G.N. *Mekhanika korrozionnogo razrusheniya konstruktsionnykh splavov* [Mechanics of corrosion fracture of structural alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1986. 294 p. (rus)

14. Arutyunyan R.A., Denisova A.A. *Vestnik of the St. Petersburg University: Mathematics*. 2002. Vol. 17. No.3. Pp. 60–64. (rus)

15. Peris P., Erdogan F. *Technical mechanics. Proceedings of American Society of Mechanical Engineers. Series D.* 1963. Vol. 85. No. 4. Pp. 60–68. (rus)

16. Griffith A.A. The theory of rupture. *Proceedings of First International Congress of Applied Mechanics*. Delft, 1924. Pp. 58–63.

17. Weibull W. A statistical distribution function of wide applicability. *Journal of Applied Mechanics*. 1951. Vol. 18. No.3. Pp. 293–297.

18. Arutyunyan R. A. *Problema deformatsionnogo stareniya i dlitelnogo razrusheniya v mekhanike materialov* [Problem of deformation aging and long-term fracture of mechanics of materials]. Saint-Petersburg: Izd-vo SPbGU, 2004. 252 p. (rus)

19. Gumbel E. *Statistika ekstremalnykh znacheniy* [Statistic of extremal values]. Moscow: Mir, 1965. 450 p. (rus)

20. Bolotin V.V. *Prognozirovaniye resursa mashin i konstruktsiy* [Prediction of resource of machines and structures]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1984. 312 p. (rus)

21. Arutyunyan R. A. *Doklady of Russian Academy of Science*. 1993. Vol. 332. No.3. Pp. 317–318. (rus)

22. Arutyunyan R. A. *Vestnik of the St.-Petersburg University: Mathematics*. 1998. Vol. 22. No.4. Pp. 64–67. (rus)

Full text of this article in English: pp. 42–48