

Запропоновано універсальну функцію-формулу корозійної міцності матеріалів, за допомогою якої може бути прогнозовані властивості системи «матеріал – корозійне середовище» з урахуванням дії механічної напруги і концентрації дифундують речовин. Сформульована система дослідів, що дозволяє визначити універсальні константи, які містяться в запропонованій функції. Представлені результати обробки даних експериментів з корозійного руйнування

Ключові слова: корозійна міцність, механічне напруження, концентрація активних речовин, універсальна функція міцності, руйнування

Предложена универсальная функция-формула коррозионной прочности материалов, с помощью которой могут быть спрогнозированы свойства системы «материал – коррозионная среда» с учетом действия механического напряжения и концентрации диффундирующих веществ. Сформулирована система опытов, позволяющая определить универсальные константы, которые содержатся в предложенной функции. Представлены результаты обработки данных экспериментов по коррозионному разрушению, заимствованных из литературы

Ключевые слова: коррозионная прочность, механическое напряжение, концентрация активных веществ, универсальная функция прочности, разрушение

УДК 620.194.2

DOI: 10.15587/1729-4061.2014.32414

ОБ ОДНОЙ УНИВЕРСАЛЬНОЙ ФУНКЦИИ КОРРОЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ И КОНЦЕНТРАЦИИ ДИФФУНДИРУЮЩИХ ВЕЩЕСТВ

Л. Х. Талыблы

Доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий отделом*

E-mail: ltalybly@yahoo.com

Х. А. Мамедова

Научный сотрудник*

E-mail: creepimm@gmail.com

*Отдел теории ползучести
Институт Математики и Механики Национальной
Академии Наук Азербайджана
ул. Б. Вахабзаде, 9, г. Баку,
Азербайджан, AZ 1141

1. Введение

Коррозионное разрушение под напряжением является одним из опасных видов разрушения металлических конструкций. Такой вид разрушения изделий имеет место, как известно, при совместном действии нагрузки и агрессивной среды. В процессе коррозионного разрушения существенную роль играют механические напряжения [1, 2]. Показано, что во многих случаях коррозионное разрушение происходит при действии растягивающих напряжений. Коррозионные трещины распространяются перпендикулярно направлению действия растягивающего напряжения при небольших деформациях или почти без них. Углубленное изучение механизма формирования данного явления является весьма актуальным, т. к. может способствовать формированию адекватного аналитического описания, позволяющего прогнозировать свойства системы «материал – коррозионная среда».

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Коррозионное разрушение под напряжением латуни марки Н62 с различными уровнями предварительных напряжений в растворе Меттессона изучено в [3]. Исследование проводилось с помощью электрохимических и механических методов. Результаты показали, что на скорость коррозии под действием напряжения оказывает влияние потенциал коррозии, при уменьшении потенциала коррозия под действием напряжения увеличивается. В [4] было исследовано коррозионное растрескивание под действием напряжения аустенитного сплава марки Fe18Cr10Mn в среде водного хлорида. Восприимчивость сплава Fe18Cr10Mn в 12 %-ном растворе NaCl при 50 °C уменьшается с увеличением содержания азота от 0,3 до 0,6 мас %. Некоторые авторы [5, 6] считают, что коррозионное разрушение возникает лишь в том случае, если приложенное растягиваю-

щее напряжение выше некоторого критического или порогового напряжения. Вместе с тем, ряд исследователей [7, 8] отрицают возможность существования критических напряжений, ниже которых не происходит коррозионное разрушение. В работе [8] отмечается, что даже очень малые растягивающие напряжения вызывают коррозионное разрушение, если имеется достаточное время для образования концентратора напряжений. Независимо от того, существует или нет пороговое напряжение, на процесс коррозионного разрушения имеет существенное влияние механическое растягивающее напряжение, притом при увеличении напряжения время до разрушения уменьшается.

Влияние концентрации активных диффундирующих веществ коррозионной среды на процесс коррозионного разрушения изучено для ряда металлов и сред. Опыты показывают, что состав и концентрация активных веществ коррозионной среды существенно влияет на коррозионное растрескивание металла. По данным [2] в водных растворах аммиака скорость коррозионного растрескивания непрерывно увеличивается по мере роста концентрации аммиака. По данным Эделяну [9] при увеличении концентрации хлорида время до растрескивания сталей уменьшалось. По данным Перримана и Хаддена [2] дугообразные стальные образцы в аэрируемом растворе натрия хлорида растрескивались в течение нескольких часов, а в деаэрируемом растворе – через 94 дня. Есть и другие исследования [2], изучающие влияния концентрации ионов хлора в растворах NaCl на скорость коррозионного растрескивания магниевых сплавов МА-3. Эти результаты показывают, что скорость коррозионного растрескивания непрерывно растет по мере повышения концентрации соли. При этом отмечается [2], что повышение концентрации NaCl увеличивает не только скорость коррозионного растрескивания, но и скорость общей коррозии магнитного сплава [2]. В [10] исследуется воздействие изменения состава климата на скорость атмосферной коррозии стальных конструкций. Показывается, что увеличение концентрации двуокиси углерода и относительной влажности увеличивает скорость коррозионного процесса, но, вместе с тем, уменьшает скорость коррозионного процесса и уменьшает время до коррозионного растрескивания стальных конструкций. Важным фактором коррозионного растрескивания является концентрация водорода в коррозионной среде, с которой соприкасается металл. В работе [12] приведена формула для времени до коррозионного разрушения при фиксированном растягивающем напряжении от концентрации адсорбированных атомов водорода:

$$t_0 = [VC_0 / (C_0 - C)]^2,$$

где t_0 – время до растрескивания; C_0 – концентрация атомов водорода на поверхности стали; C – концентрации водорода при появлении видимой трещины; V – константа.

Данная формула имеет ограниченное применение, так как описывает зависимость времени до растрескивания от концентрации атомов водорода на поверхности металла. Вместе с тем, она не пригодна для учета концентрации других агрессивных сред.

3. Цель и задачи исследования

Основной характеристикой коррозионной прочности являются экспериментальные кривые зависимости времени до коррозионного разрушения исследуемого материала в заданной агрессивной среде от механического напряжения [1, 2], температуры [2], концентрации диффундирующих веществ [2, 3, 8, 9], потенциала коррозии [11] и еще очень многих факторов, влияющих на коррозионный процесс. Установление функциональной зависимости времени до растрескивания от величины отмеченных факторов влияния на коррозионную прочность имеет большое значение для выяснения механизма коррозионного растрескивания. Вместе с тем, аналитическое представление кривых коррозионной прочности является необходимым при построении феноменологических теорий коррозионной прочности для тел произвольной конфигурации [13, 14]. Кроме того, такое представление может быть использовано для прогнозирования свойств системы «материал – коррозионная среда».

Задачей исследования является построение относительно более общей формулы, которая представляет зависимость времени до коррозионного разрушения от концентрации различных диффундирующих веществ, в том числе атомов водорода.

4. Универсальная функция коррозионной прочности

На основании анализа форм кривых зависимости времени до коррозионного разрушения (t_0) от концентрации диффундирующих веществ (C), предлагается следующая аналитическая формула для этой зависимости:

$$t_0 = t_0(\sigma, T) = f(\sigma) e^{-\alpha \left(\frac{C}{C_s} - 1 \right)}. \quad (1)$$

Здесь $f(\sigma)$ – экспериментально определяемая функция от механического напряжения σ ; C_s – некоторая условная концентрация, приведенная к безразмерной величине, которая выбирается из интервала изменения концентрации C ; α – экспериментально определяемая константа: > 0 .

Функция $f(\sigma)$ может быть представлена различными формулами. Согласно (1), она соответствует времени до коррозионного разрушения под напряжением σ при $C = C_s$: $f(\sigma) = t_0(\sigma, T_s)$. Анализ экспериментальной зависимости $t \sim \sigma$ при постоянной концентрации C_s показывает, что более подходящей для функции $V(\sigma)$ формулой будет:

$$f(\sigma) = t_{0s} \left(\frac{\sigma}{\sigma_s} \right)^{-\beta}, \quad (2)$$

где σ_s – напряжение, приведенное к безразмерной величине, которое может быть выбрано из интервала изменения напряжения σ ; $0 < \beta$ – подлежащая определению константа; $t_{0s} = \text{const}$ – время до коррозионного разрушения при $\sigma = \sigma_s$, $C = C_s$.

При учете (2) формула (1) принимает вид:

$$t_0 = t_0(\sigma, T) = t_{0s} \left(\frac{\sigma}{\sigma_s} \right)^{-\beta} e^{-\alpha \left(\frac{C}{C_s} - 1 \right)} \tag{3}$$

5. Методика экспериментального определения универсальных констант

Сформулируем систему экспериментов, позволяющих определить универсальные для каждой системы «материал – агрессивная среда» константы, которые входят в формулу (3). Примем гипотезу об универсальности функции $t_0(\sigma, T)$ для каждой системы «метал – агрессивная среда». Принятая гипотеза позволяет определить неизвестные константы из различных опытов на коррозионное разрушение, например из опытов на коррозионное разрушение при растяжении или изгибе экспериментальных образцов в агрессивных средах, имеющих различные постоянные концентрации диффундирующих веществ.

Пусть из интервала изменения C выбрана величина C_s , из интервала изменения σ – величина σ_s . Растягивая до разрушения образец под напряжением σ_s в агрессивной среде концентрации C_s , находим время t_{0s} . Из формулы (3) при $C = C_s$ и различных $\sigma = \sigma_k = \text{const}$ ($k = 1, 2, \dots, n$) следует

$$\beta = \ln(t_{0s} / t_0(\sigma_k, T_s)) / \ln(\sigma_k / \sigma_s) \tag{4}$$

Эксперименты на коррозионное разрушение образцов при растяжении постоянными напряжениями σ_k в агрессивной среде при постоянной температуре и концентрации C_s дают возможность в соответствии с формулой (4) определить константу β . Поскольку $k > 1$, то для определения β необходимо использование одного из методов математического приближения.

Теперь определим константу α . Из формулы (3) при $\sigma = \sigma_s = \text{const}$ и при различных постоянных концентрациях $C = C_k = \text{const}$ ($k = 1, 2, \dots, m$) имеем

$$\alpha = \frac{\left[\ln \frac{t_{0s}}{t_0(\sigma_s, C_k)} \right]}{\left(\frac{C_k}{C_s} - 1 \right)} \tag{5}$$

Эксперименты на коррозионное разрушение образцов при растяжении постоянным напряжением σ_s в агрессивной среде с различными постоянными концентрациями C_k позволяют в соответствии с формулой (5) определить константу α . При определении α также следует воспользоваться одним из методов математического приближения.

6. Результаты обработки некоторых экспериментов

Эделяну (Edeleanu) [9] исследовал влияние концентрации $MgCl_2$ на время коррозионного растрескивания нержавеющей стали марки 18-8 при постоянном значении растягивающего напряжения ($\sigma = \sigma_s = \text{const}$). На рис. 1 результаты экспериментов представлены точками. За величину C_s была принята 20 % $MgCl_2$.

При этом, применение метода средних для аппроксимации экспериментальных данных, представленных точками на рис. 1, дали следующие результаты: $t_{0s} = 178$ час $\alpha = 1,625$.

Кривая коррозионной прочности образца из нержавеющей стали марки 18-2 в среде чистого $MgCl_2$, вычисленная в соответствии с уравнением (3), при полученных данных приведена на рис. 1 сплошной линией.

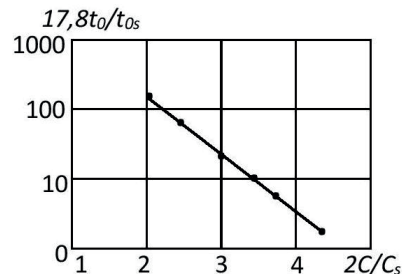


Рис. 1. Влияние концентрации $MgCl_2$ на время коррозионного растрескивания стали марки 18-8 (точки – экспериментальные данные [9], линия – расчет по формуле (3))

В этой же работе [9] экспериментально изучена зависимость времени до коррозионного растрескивания стали марки 18-10 от концентрации $NaCl$. Точками на рис. 2 представлены результаты этих экспериментов, обработка которых производилась по формуле (3). Величина C_s была принята 11,5 % $NaCl$. Время t_{0s} оказалось 446,7 час, а постоянная α была приблизительно равна 9,3. С использованием этих значений t_{0s} и α , результаты вычисления по формуле (3) представлены на рис. 2 линией. При этом принимались $t_1 = 100$ час, $C_1 = 10\%$ $NaCl$.

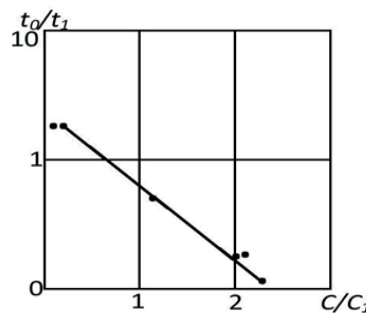


Рис. 2. Влияние концентрации $NaCl$ на время коррозионного растрескивания стали марки 18-10 (точки – экспериментальные данные [9], линия – расчет по формуле (3))

Удовлетворительное совпадение экспериментальных и расчетных данных позволяет использовать формулу (3) в качестве универсальной функции-характеристики системы «материал – агрессивная среда». Вместе с тем, формула (3) может быть использована в феноменологических теориях коррозионного разрушения материалов [13, 14].

Замечание 1. Для некоторых систем «метал – агрессивная среда» в качестве функции $f(\sigma)$, входящей в (1)

взамен формулы (2), может быть принята экспоненциальная зависимость.

Замечание 2. Вместо экспериментов на коррозионное разрушение при постоянных напряжениях могут быть использованы соответствующие эксперименты при постоянной деформации. В последнем случае с некоторым приближением можно принимать, что в той части металла, куда еще не проник процесс коррозии, напряжение остается постоянным [10].

7. Выводы

Были проанализированы экспериментальные данные, относящиеся к изучению зависимости времени до коррозионного разрушения различных материалов

агрессивных средах от механических напряжений и от концентрации диффундирующих веществ. В результате этого анализа предложена аналитическая формула – универсальная функция, представляющая собой зависимость времени до коррозионного разрушения от стационарных механического напряжения и концентрации диффундирующих веществ.

Сформулирована система опытов для нахождения универсальных констант системы «материал – коррозионная среда», которые входят в предложенную функцию коррозионной прочности.

Произведена обработка экспериментальных данных, которая показала удовлетворительное совпадение расчетных данных с экспериментальными. Данный факт позволяет использовать предложенную формулу в качестве характеристики системы «материал – агрессивная среда».

Литература

1. Логан, Л. Л. Коррозия металлов под напряжением [Текст] / Л. Л. Логан. – Москва: Металлургия, 1970. – 340 с.
2. Романов, В. В. Коррозионное растрескивание металлов [Текст] / В. В. Романов. – Москва: Гостехиздат, 1960. – 179 с.
3. Du, X. S. Pre-strain enhances film rupture to promote SCC of brass in Mattsson's solution-A proposal for a film-rupture-induced SCC mechanism [Text] / X. S. Du, Y. S. Su, C. Zhang, S. X. Li, L. S. Qiao, W. Y. Chu, W. G. Chen, Q. S. Zhang, D. X. Liu // Corrosion Science. – 2013. – Vol. 69. – P. 302–310. doi: 10.1016/j.corsci.2012.11.043
4. Yoon, Y.-S. Sangshik Kini. Effect on NanC on stress corrosion cracking susceptibility of austenitic Fe18Cr10Mn-basses stainless steels [Text] / Young-Sob Yoon, H.-Y. Ha, T.-H. Lee, S. Kini // Corrosion Science. – 2014. – Vol. 80. – P. 28–36. doi: 10.1016/j.corsci.2013.09.014
5. Акользин, П. А. Коррозия и защита металла теплоэнергетического оборудования [Текст] / П. А. Акользин. – Москва: Энергоиздат, 1982. – 303 с.
6. Кеше, Г. Коррозия металлов [Текст] / Г. Кеше. – Москва: Металлургия, 1984. – 400 с.
7. Гликман, Л. А. Коррозионно-механическая прогнозность металлов [Текст] / Л. А. Гликман. – Москва-Ленинград: Машгиз, 1955. – 175 с.
8. Dix, E. H. Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers [Text] / E. H. Dix // 1940. – Vol. 137. – P. 11–16.
9. Эделяну, С. Факторы коррозионного растрескивания аустенитных нержавеющей сталей / Коррозионное растрескивание и хрупкость [Текст] / С. Эделяну. – Москва, 1961. – С. 119–131.
10. Nguyen, M. N. An assessment of climate change effects on atmospherec corrosion rates of steel structures [Text] / M. N. Nguyen, X. Wang, R. H. Leicester // Corrosion Engineering Sciences and Technology. – 2013. – Vol. 48, Issue 5. – P. 359–369. doi: 10.1179/1743278213y.0000000087
11. Li, Y. T. Influence of AC interference to corrosion of Q235 corbonsteel [Text] / Y. T. Li, Lix, G. W. Cai, L. H. Yang // Corrosion Engineering, Science and Technology. – 2013. – Vol. 48, Issue 5. – P. 322–326. doi: 10.1179/1743278212y.0000000076
12. Ажогин, Ф. Ф. Коррозионное растрескивание и защита высокопрочных сталей [Текст] / Ф. Ф. Ажогин. – Москва: Металлургия, 1974. – 256 с.
13. Talybly, L. Kh. On determining the time to corrosion fracture of metals [Text] / L. Kh. Talybly // Transactions of National Academy of Sciences of Azerbaijan, ser. Of physical-technical and mathematical sci./ssue mathematical and mechanics. Baku: “Elm”. – 2003. – Vol. XXIII, Issue 1. – P. 239–246.
14. Талыблы, Л. Х. К вопросу прогнозирования коррозионного разрушения металлов при нестационарных изменениях потенциала [Текст] / Л. Х. Талыблы, А. М. Джафарова // Тяжелое машиностроение. – 2014. – № 10. – С. 37–40.
15. Работнов, Ю. Н. О возможном механизме разрушения металла в коррозионной среде [Текст] / Ю. Н. Работнов // Изв. АН СССР, ОТН. – 1954. – № 6. – С. 53–56.