

О времени коррозионного разрушения металлов с учетом влияния механического напряжения и температуры

Р.А. Кязимова, Э.Т. Багиров, Институт Математики и Механики Национальной Академии Наук Азербайджана

От редакции. Данный доклад прозвучал на конференции «Ресурсосберегающие технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня», прошедшей в Санкт-Петербурге 13-16 апреля 2010 года. В нем не представлено каких-то конкретных технологий, зато предложена достаточно простая формула для времени коррозионного разрушения под действием напряжения и температуры. Подобные универсальные математические модели могут быть полезны, допустим, при разработке новых стандартных методик оценки долговечности и надежности, при конструировании узлов, работающих в коррозионной среде под давлением, или в других задачах, где на основании имеющихся экспериментальных данных для некоторой среды требуется спрогнозировать поведение определенного металла при интересующих условиях эксплуатации.

Резюме. Предложена эмпирическая формула коррозионной прочности металлов, которая позволяет аналитически описывать экспериментальные кривые коррозионного разрушения под напряжением при учете влияния температуры. Сформулирована система опытов с целью определения универсальных констант системы «металл – коррозионная среда». Представлены результаты обработки опубликованных в литературе некоторых экспериментальных данных по коррозионному разрушению.

Коррозионно-механическое разрушение является одной из опасных разновидностей разрушения металлических элементов конструкций. Такой вид разрушения материалов и изделий имеет место, как известно, при совместном действии нагрузки и агрессивной среды. В процессе коррозионного разрушения существенную роль играют механические напряжения. Выяснению характера и механизма действия напряжений в процессе коррозионного разрушения металлов посвящены экспериментальные исследования различных авторов, среди которых могут быть отмечены [1, 2]. Показано, что в большинстве случаев коррозионное разрушение про-

исходит при действии растягивающих напряжений. Коррозионные трещины распространяются перпендикулярно направлению действия растягивающего напряжения при небольших деформациях или почти без них. Некоторые авторы [3, 4] считают, что коррозионное разрушение возникает лишь в том случае, когда приложенное растягивающее напряжение выше некоторого критического или порогового напряжения. Вместе с тем, ряд исследователей [5, 6] отрицает возможность существования критических напряжений, ниже которых коррозионное разрушение не происходит. По мнению автора работы [6], даже очень малые растягивающие напряжения вызывают коррозионное разрушение, если имеется достаточное время для образования концентратора напряжений. Однако, вопрос о существовании критических напряжений, которые изменяются в зависимости от структур сплава и коррозионной среды, должен быть решен в каждом конкретном случае системы «металл – коррозионная среда», так как от этого во многом зависит вопрос о прогнозировании коррозионного разрушения. Независимо от того, существует ли пороговое напряжение или нет, на процесс коррозионного разрушения существенное влияние оказывает механическое растягивающее напряжение, при том, что при увеличении напряжений время до разрушения уменьшается.

Влияние температуры коррозионной среды на процесс коррозионного разрушения изучено для ряда металлов и сред. Большинство исследований в этом направлении носит экспериментальный характер. В литературе приведены опытные кривые длительной коррозионной прочности на плоскостях время-температура. Однако, механизм влияния температуры на процесс коррозионного разрушения мало изучен. Анализ экспериментальных данных показывает, что с увеличением температуры время до коррозионного разрушения уменьшается. При экспериментальном исследовании влияния температуры коррозионной среды на процесс коррозионного разрушения в образцах создавались постоянные механические напряжения.

Основной характеристикой коррозионной прочности является кривая коррозионной прочности. Вид этой кривой определяется свойствами металла и агрессивной среды, механическим напряжением, температурой и еще очень многими факторами. Аналитическое представление кривой

коррозионной прочности является необходимым при построении феноменологических теорий коррозионной прочности для тел произвольной геометрии [7]. Вместе с тем, такое представление может быть использовано для прогнозирования времени до коррозионного разрушения при стационарных факторах влияния на процесс коррозии.

На основании анализа экспериментальных кривых коррозионной прочности, для времени до коррозионного разрушения металлических образцов в агрессивной среде предлагается следующая аналитическая эмпирическая формула:

$$t_0 = t_0(\sigma, T) = B(\sigma) e^{-\beta \left(\frac{T}{T_s} - 1 \right)}. \quad (1)$$

Здесь t_0 есть время до коррозионного разрушения при различных стационарных растягивающих напряжениях σ и температурах T коррозионной среды; T_s – некоторая температура, приведения к безразмерной величине, которая выбирается из диапазона изменения температуры T ; β – экспериментально определяемая константа; $B(\sigma)$ – экспериментально определяемая функция от напряжения σ .

Функция $B(\sigma)$ может быть аппроксимирована различными формулами. Согласно формуле (1), она соответствует времени до коррозионного разрушения под напряжением σ при $T = T_s/B(\sigma) = t_0(\sigma, T_s)$. Анализ экспериментальной зависимости $t_0 \sim \sigma$ при постоянной температуре T_s показывает, что наиболее подходящей для функции $B(\sigma)$ аппроксимацией будет степенная аппроксимация:

$$B(\sigma) = t_{os} \left(\frac{\sigma}{\sigma_s} \right)^{-\alpha}, \quad (2)$$

где σ_s – напряжение, выбранное из интервала изменения напряжения σ ; $t_{os} = \text{const}$ время до коррозионного разрушения при $\sigma = \sigma_s$, $T = T_s$, $\alpha > 0$ – подлежащая определению константа.

Формула (1) с учетом (2) принимает вид:

$$t_0 = t_0(\sigma, T) = t_{os} \left(\frac{\sigma}{\sigma_s} \right)^{-\alpha} e^{-\beta \left(\frac{T}{T_s} - 1 \right)}. \quad (3)$$

Приведем методику определения неизвестных констант, входящих в (3). Примем гипотезу об универсальности функции $t_0(\sigma, T)$ для каждой системы «металл – коррозионная среда». Принятая гипотеза позволяет определить неизвестные константы из различных опытов на коррозионное разрушение, например, из опытов на коррозионное разрушение при растяжении или при изгибе экспериментальных образцов в агрессивных средах, имеющих различные постоянные температуры.

Пусть из диапазона изменения T выбрана температура T_s , из диапазона изменения σ – напряжение σ_s . Растягивая образец под напряжением σ_s в агрессивной среде с температурой T_s находим время до коррозионного разрушения t_{os} . Из формулы (3) при $T = T_s$ и $\sigma = \sigma_k = \text{const}$ ($k = 1, 2, \dots, n$) следует:

$$\alpha = \frac{\ln \frac{t_{os}}{t_0(\sigma_k, T_s)}}{\ln \frac{\sigma_k}{\sigma_s}}. \quad (4)$$

Эксперименты на коррозионное разрушение образцов при растяжении постоянными напряжениями σ_k в среде, имеющей постоянную температуру T_s , дают возможность в соответствии с формулой (4) определить константу α . Поскольку $k > 1$, то для определения α целесообразно использовать один из методов математического приближения, например, метод наименьших квадратов.

Теперь определим константы β . Из формулы (3) при $T = T_k = \text{const}$ ($k = 1, 2, \dots, m$) и $\sigma = \sigma_s$ имеем:

$$\beta = \frac{\ln \frac{t_{os}}{t_0(\sigma_s, T_k)}}{\frac{T_k}{T_s} - 1}. \quad (5)$$

Эксперименты на коррозионное разрушение образцов при растяжении постоянным напряжением σ_s в среде с различными постоянными температурами T_k позволяют в соответствии с формулой (5) определить константу β . При определении β также целесообразно воспользоваться одним из методов математического приближения.

Была произведена обработка некоторых экспериментальных данных по коррозионному разрушению [2, 8]. На рис. 1 приведена экспериментальная кривая коррозионного разрушения α -латуни в растворе аммиака (плотность 0,94) при комнатной температуре $T_s = 293$ К [8]. За σ_s принято $\sigma_s = 2$ МПа. При этом оказалось $t_{os} = 15,6$ час.

С учетом этих данных расчеты по формуле (4) дали следующий результат: $\alpha \approx 0,7$. В соответствии с формулой (3) была построена расчетная кривая коррозионной прочности $t_0 \sim \sigma$, T_s (пунктирная линия).

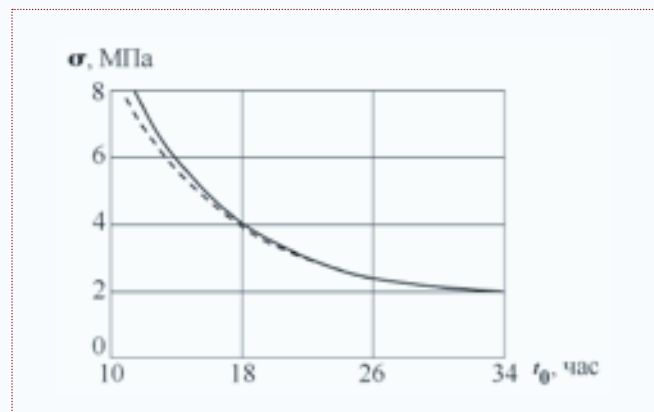


Рис. 1. Экспериментальная (сплошная линия [5]) и расчетная по формуле (3) при $T = T_s$ (пунктирная линия) кривые коррозионной прочности α -латуни в растворе аммиака (плотность 0,94)

На рис. 2 представлены результаты различных экспериментов по изучению влияния температуры коррозионной среды на процесс коррозионного разрушения [2].

Точки на кривой 1 получены при исследовании коррозионного разрушения армировочной бетонной проволоки в 10%-ном растворе роданистого аммония. Напряжения создавались сведением концов изогнутой скобки проволоки [2]. Точки на кривой 2 получены в результате экспериментов Радекера [2] по коррозионному разрушению мартеновской стали (0,14% C) в 80%-ном растворе нитрата кальция. Напряжения создавались одноосным растяжением. Как видим, зависимость $\ln t_0 \sim T, \sigma_s$ близ-

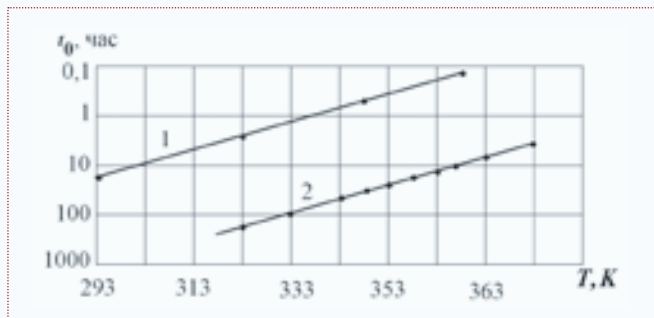


Рис. 2. Экспериментальные данные (точки [2]) и расчетные кривые по формуле (3) при $\sigma = \sigma_s$ для армировочной бетонной проволоки в 10%-ном растворе роданистого аммония (кривая 1) и для мартеновской стали (0,14% C) в 80% растворе нитрата кальция (кривая 2)

ка к линейной, что соответствует формуле (3). В обоих случаях примем: $T_s = 323$ К. При этом имеем: $t_{os} = 1,8$ час для армировочной бетонной проволоки; $t_{os} = 200$ час для мартеновской стали. Результаты расчета по формуле (5) оказались следующими: $\beta \approx 17$ для армировочной бетонной проволоки; $\beta \approx 0,6$ для мартеновской стали. После определения экспериментальных констант, по формуле (3) при $\sigma = \sigma_s$ были построены расчетные кривые зависимости $t_0 \sim T, \sigma_s$ (рис. 2 линии 1 и 2). Расчетные линии оказались близкими к экспериментальным точкам.

Сравнение экспериментальных и расчетных данных дает возможность использовать функцию (3) как функцию коррозионной прочности.

Замечание 1. Для некоторых систем «металл – коррозионная среда» в качестве функции $V(\sigma)$, что входит в (1), взамен аппроксимации (2) может быть принята экспоненциальная аппроксимация.

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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Logan X.Л. Коррозия металлов под напряжением. Москва: Металлургия 1970, 340 с.
2. Романов В.В. Коррозионное растрескивание металлов. Москва: Гостехиздат 1960, 179 с.
3. Акольдин П.А. Коррозия и защита металла теплоэнергетического оборудования. Москва: Энергоиздат, 1982, 303 с.
4. Кеше Г. Коррозия металлов. Мсква: Металлургия 1984, 400 с.
5. Гликман Л.А. Коррозионно-механическая прочность металлов. Москва-Ленинград. Машигиз 1955, 175 с.
6. Dix E.H. Trans. of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, 1940, v.137, p. 11-16.
7. Talybly L.Kh. On determining the time corrosion fracture of metals // Transactions of National Academy of sciences of Azerbaijan, ser. of physical-technical & mathematical sci. Issue mathematics and mechanics, Baku: «Elm», 2003, V.XXIII, №1, p. 239-246.
8. Зорин Е. Е. Влияние температуры и коррозионно-активной среды на свойства металлов под напряжением при статических и циклических нагрузениях. Доклад кафедры «Сварки и защиты от коррозии» РГУ нефти и газа, 1999, www.Deport.ru.