УДК 539.375.539.4

АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ СПОСОБ ВЫВОДА ФОРМУЛ Ю. Н. РАБОТНОВА ДЛЯ ВРЕМЕНИ ДО КОРРОЗИОННОГО РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОВ

Р. А. КЯЗИМОВА

Институт математики и механики НАН Азербайджана, Баку

Предложен альтернативный способ вывода формул Ю. Н. Работнова для времени до коррозионного разрушения металлов в агрессивной среде при постоянном и переменном напряжениях. Показано, что эти формулы можно использовать для определения времени до коррозионного разрушения тел произвольной геометрии.

Ключевые слова: *металлические элементы, коррозионное разрушение, формула Ю. Н. Работнова, напряжение, деформация.*

Металлические элементы конструкций, работающих в агрессивных средах под нагрузкой, после некоторого времени разрушаются. Определение времени до разрушения – один из основных вопросов в исследованиях коррозии материалов и изделий при совместном действии нагрузки и агрессивной среды. Существуют различные мнения о возможном механизме разрушения металла в коррозионной среде. Среди них – гипотеза, предложенная Ю. Н. Работновым [1]. Следуя ей, “возникающие в результате химической реакции металла с активной средой молекулярные образования диффундируют в межкристаллитную прослойку. Конец возникшей трещины является фокусом концентрации напряжений; поскольку коэффициент диффузии зависит от напряжения, диффузия идет наиболее интенсивно впереди трещины. Рост концентрации диффундирующего агента снижает сопротивление отрыву металла, что приводит к дальнейшему росту трещины”. На основе предложенного подхода к коррозионному разрушению Ю. Н. Работнов вывел формулы для времени до коррозионного разрушения при постоянной нагрузке (переменном напряжении) и постоянной деформации [1]. Считают [2], что гипотеза Работнова противоречит факту о влиянии поляризации на скорость растрескивания металлов.

В данной работе формулы Ю. Н. Работнова для времени до коррозионного разрушения выведены на основе альтернативного подхода [3] – концепции накопленных повреждений. Установлено, что эти формулы верны вне зависимости от механизма разрушения металла в коррозионной среде.

Коррозию металлов определим как процесс накопления некоторого вида повреждений. При этом исключим из рассмотрения механизм образования и накопления этих повреждений. Предположим, что коррозионное разрушение происходит тогда, когда накопление коррозионных повреждений достигает определенного уровня.

Согласно экспериментальным данным [2], основные факторы, влияющие на коррозионный процесс, следующие: механическое напряжение, под которым находится тело; температурное поле, которое может иметь тело при различных теплообменах, в том числе в результате теплообмена с температурой

Контактная особа: Р. А. КЯЗИМОВА, e-mail: kazimova_raisa@yahoo.com

агрессивной среды; концентрация диффундирующего вещества; потенциал коррозии. Назовем эти факторы определяющими для рассмотрения параметров коррозионного процесса.

Пусть монотонно возрастающая по времени t неотрицательная функция $\eta(t)$ характеризует степень (глубину) коррозии, точнее, интенсивность накопленных коррозионных повреждений. При этом с учетом нормировки коррозии времени можем принимать: $0 \le \eta(t) \le 1$. В начальный момент времени t=0 считаем $\eta(0)=0$; коррозионное разрушение наступает в течении времени t_*, для которого $\eta(t_*)=1$. Воспользуемся законом физико-химической кинетики, следуя которому, функция $\eta(t)$ удовлетворяет уравнение [3]

$$\frac{d\eta}{dt} = \Omega\left[\eta(t),\, \sigma_e(t),\, T(t),\, C(t),\, U(t)\right]. \qquad .(1)$$

Здесь функция Ω характеризует скорость накопления коррозионных повреждений в зависимости от достигнутого значения $\eta(t)$, некоторого эквивалентного механического напряжения σ_e, абсолютной температуры тела T, концентрации диффундирующего вещества C, потенциала коррозии U. В данном случае эквивалентное напряжение σ_e введено для учета пространственного напряженного состояния σ_{ij} (i, j = 1,2,3). За σ_e можно принять, например, σ_1 – наибольшее главное растягивающее напряжение, или σ_t – интенсивность напряжений, которая является инвариантной величиной:

$$\sigma_t = \frac{\sqrt{2}}{2}\left[(\sigma_{11}-\sigma_{22})^2 + (\sigma_{22}-\sigma_{33})^2 + (\sigma_{33}-\sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{13})^2\right]^{1/2}.$$

Отметим, что параметры σ_e, T, C, U, а также функция η зависят не только от времени, но и от координаты $(x) = (x_1, x_2, x_3)$ точек тела, которые опущены при написании формулы (1). Здесь будем рассматривать коррозионный процесс, который протекает при постоянных температуре, концентрации и потенциале: $T=T_s$=const, $C=C_s$=const, $U=U_s$=const.

Функцию Ω представим в виде

$$\Omega = \psi(\eta)\cdot\varphi_1(\sigma_e(t), T_s, C_s, U_s) \equiv \psi(\eta)\cdot\varphi(\sigma_e(t)).$$

Учтем это в соотношении (1):

$$\frac{d\eta(t)}{dt} = \psi(\eta(t))\varphi(\sigma_e(t)). \qquad (2)$$

Проинтегрируем уравнение (2) при условии $\eta(0)=0$:

$$\int_0^{\eta}\frac{d\eta}{\psi(\eta)} = \int_0^{t}\varphi(\sigma_e(\tau))\,d\tau.$$

При учете же условия $\eta(t_*)=1$ получим:

$$\int_0^{t_*}\phi(\sigma_e(\tau))\,d\tau = 1, \qquad (3)$$

где

$$\phi = \varphi / B;\; B = \int_0^1 \frac{d\eta}{\psi(\eta)}. \qquad (4)$$

Для функции $\phi(\sigma_e)$ примем следующую аппроксимацию:

$$\phi(\sigma_e) = \frac{1}{A}\left(\frac{\sigma_e}{\sigma_s} - 1\right)^{\alpha}, \qquad (5)$$

где A и α=const; σ_s – экспериментально определяемое напряжение, ниже которого в экспериментальном образце не происходит коррозионное разрушение [2, 4]. В этом случае соотношение (3) перепишем в виде

$$\int_0^{t_*}\left(\frac{\sigma_e(\tau)}{\sigma_s}-1\right)^{\alpha} d\tau = A. \qquad (6)$$

Для определения постоянных A и α воспользуемся результатами экспериментов коррозионного разрушения при различных постоянных деформациях. В этом случае с некоторым приближением можно принимать, что в той части материала, куда еще не проникла коррозия, напряжение остается постоянным [1]. Пусть различным постоянным деформациям соответствуют различные постоянные напряжения: $\sigma_e = \sigma_k = \text{const}$ (k = 1,2,...). Время до коррозионного разрушения в этом случае обозначим как t_0, т.е. считаем, что при $\sigma_e = \sigma_k = \text{const}$ время t_* приближается к t_0. При этом из соотношения (6) получим:

$$t_0 = A\left(\frac{\sigma_k}{\sigma_s}-1\right)^{-\alpha}. \qquad (7)$$

Используя результаты экспериментов, представленных в виде $t_0 = t_0(\sigma_k)$, из выражения (7) с помощью одного из методов математического приближения, находим константы A и α.

Формула (7) при α=1/2 совпадает с формулой, выведенной Ю. Н. Работновым [1] для определения времени до коррозионного разрушения при постоянных напряжениях (деформациях). Обработка опытных данных А. М. Жукова [4] о длительной коррозионной прочности латуни в аммиачной среде при α=1/2 дала следующие результаты [1]: $\sigma_s = 4{,}6 \cdot 10^5$ Pa, A = 3,67.

Если закон изменения напряжения σ_e во времени t был бы известным, то, зная константы A и α, из соотношений (5) можно определить время t_*. Однако нахождение этого закона, особенно для тел сложной геометрии, представляет некоторые трудности из-за специфичности коррозионного процесса. В случае, когда напряжение σ_e в процессе коррозии изменяется во времени t и закон $\sigma_e = \sigma_e(t)$ неизвестен, то для определения времени до коррозионного разрушения используем метод, предложенный ранее [3].

Функцию $\eta(t)$ примем в виде

$$\eta(t) = 1-\frac{\sigma_{eo}}{\sigma_e(t)}, \qquad (8)$$

где σ_{eo} – номинальное напряжение: $\sigma_{eo} = \sigma_e(t)\big|_{t=0}$. Считаем, что величина $\sigma_{eo}/\sigma_e(t)$ при $t = t_*$ становится малой по сравнению с единицей.

При первом приближении предполагаем, что $\psi(\eta)$=1. В этом случае из формулы (4) имеем: B=1, $\varphi=\phi$. Следуя работе [1], также примем α=1/2 и учтем (5) и (8) в уравнении (2). Получим:

$$\frac{\sigma_{eo}}{\sigma_e^2}\frac{d\sigma_e}{dt} = \frac{1}{A}\left(\frac{\sigma_e}{\sigma_s}-1\right)^{1/2}.$$

Проинтегрируем это соотношение:

$$\frac{t_*}{A} = \sigma_{eo}\int_{\sigma_{eo}}^{\sigma_b}\frac{d\sigma_e}{\sigma_e^2\left(\frac{\sigma_e}{\sigma_s}-1\right)^{1/2}}, \qquad (9)$$

где σ_b – напряжение, при котором происходит отрыв чистого металла [1].

Вычислив интеграл и произведя некоторые преобразования, из выражения (9) в конечном итоге получим:

$$t_* = A\left\{\frac{\sigma_{eo}}{\sigma_s}\left(\lambda - \mathrm{arctg}\sqrt{\frac{\sigma_{eo}}{\sigma_s}-1}\right) - \sqrt{\frac{\sigma_{eo}}{\sigma_s}-1}\right\}. \qquad (10)$$

Здесь
$$\lambda = \sqrt{\frac{\sigma_s}{\sigma_b}\left(1-\frac{\sigma_s}{\sigma_e}\right)} + \mathrm{arctg}\sqrt{\frac{\sigma_b}{\sigma_s}-1} = \mathrm{const}\,. \qquad (11)$$

Как видим, формула (10) полностью совпадает с полученной Ю. Н. Работновым [1] на основе выдвинутой им гипотезы о механизме коррозионного разрушения. Мы же пришли к ней совершенно иным способом – вне зависимости от механизма протекания коррозии. Это говорит о том, что формулу (10) Ю. Н. Работнова можно считать достаточно полной для определения времени до коррозионного разрушения элементов конструкций, работающих в условиях постоянных температуры, концентрации агрессивной среды, потенциала коррозии. Входящие в нее константы λ, A можно определить с использованием экспериментальных кривых длительной коррозионной прочности при различных постоянных нагрузках. Величину $\sigma_s \neq 0$ принимаем как нижнюю границу интересующего нас диапазона изменения напряжения: $\sigma_s \le \sigma_{eo}$. Отметим, что величина A в формуле (11) такая же, как и в формуле (7). В формулу (10) входит напряжение σ_{eo}. Поскольку $\sigma_{eo} = \sigma_e(t)$ при t=0, его можно определить из решения задачи теории упругости без учета влияния коррозионной среды. Выбор формулы для σ_{eo} через известные компоненты напряжений σ_{ij} продиктовано условием задачи теории упругости.

Опытные данные А. М. Жукова [4] по коррозионному разрушению экспериментального образца при воздействии постоянной нагрузки (в этом случае напряжение увеличивается во времени вследствие уменьшения рабочей площади образца) были обработаны [1] на основании формулы (10). Получены: $A \approx 3{,}67r$, $\sigma_s \approx 4{,}6 \cdot 10^5$ Pa, λ=1,50.

Наконец, отметим следующее. Если для материалов $\sigma_b >> \sigma_s$, что фактически предполагали согласно формуле (11), имеем $\lambda \approx \pi/2 \approx 1{,}57$. Как видим, это значение для λ мало отличается от такого же, полученного ранее [1] при обработке экспериментальных данных. Это говорит о том, что для большинства металлов постоянная λ имеет одно и то же значение: $\lambda \approx \pi/2$.

РЕЗЮМЕ. Запропоновано альтернативний спосіб виведення формул Ю. М. Работнова для часу до корозійного руйнування металів в агресивному середовищі під постійним і змінним напруженнями. Показано, що ці формули можна використовувати для визначення часу до корозійного руйнування тіл довільної геометрії.

SUMMARY. The alternative method of deriving the Yu. M. Rabotnov's formulae for the time of corrosive failure of metals in aggressive medium under constant and variable stresses is proposed. It is shown that these formulae can be used for determination of the time to corrosion failure of arbitrary geometry bodies.

1. *Работнов Ю. Н.* О возможном механизме разрушения металла в коррозионной среде // Изб. тр. Проблемы механики деформируемого твердого тела. – М.: Наука, 1991. – С. 75–80.
2. *Романов В. В.* Коррозионное растрескивание металлов. – М.: Гостехиздат, 1960. – 179 с.
3. *Talybly L. Kh.* On determining the time to corrosion fracture of metals // Transactions of National Academy of Sciences of Azerbaijan, ser. of physical-technical and mathematical sci., Issue mathematical and mechanics Baku: "ELM" 2003. – **XXIII**, № 1. – P. 239–246.
4. *Жуков А. М.* Прочность и пластичность латуни в аммиачной среде // Изв. АН СССР. Отделение техн. наук. – 1954. – № 9. – С. 67–72.

Получено 25.04.2008