

КОНТИНУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ РОСТА ТРЕЩИН КОРРОЗИОННОГО РАСТРЕСКИВАНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА РЕСУРСА КОНСТРУКЦИЙ

О. К. МОРАЧКОВСКИЙ, Ю. В. РОМАШОВ

Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”

На основе механики рассеянного разрушения разработана континуальная модель роста трещин вследствие коррозионного растрескивания сталей для определения ресурса элементов конструкций. Путем расчетного моделирования роста трещин в образцах из аустенитной нержавеющей стали типа 18-8, выполненного на основе приведенных в литературе экспериментальных данных, показана достоверность предложенной модели. Получены решения задачи о ресурсе прямолинейного участка теплообменных труб парогенераторов атомных электростанций, по результатам которых установлена существенная зависимость ресурса от размеров труб, давления в первом контуре и химического состава агрессивной среды.

Ключевые слова: трещина, коррозионное растрескивание сталей, расчет ресурса, континуальная модель трещин, кривая длительной коррозионной прочности, теплообменная труба парогенератора.

Определение ресурса элементов конструкций, подверженных коррозионному растрескиванию – актуальная научно-техническая проблема обеспечения безопасной эксплуатации теплоэнергетического, химического и другого оборудования [1]. Математические модели роста трещин вследствие коррозионного растрескивания сталей могут быть теоретической основой расчета ресурса элементов конструкций, эксплуатирующихся в агрессивных средах.

Следуя общим подходам механики разрушения [2], коррозионное растрескивание рассматривают как распространение трещин и как накопление рассеянного разрушения. Механика распространения трещин основана на идеях Гриффитса [2], а ее приложениями выступают задачи живучести элементов конструкций [3]. Механика рассеянного разрушения основана на концепции о непрерывном накоплении визуально невидимых повреждений в каждой точке материала [2], распространенной в механике деформируемого твердого тела [4]. Обсуждено [5], в частности, ее применение для описания ползучести, длительной прочности и коррозионного растрескивания металлов в агрессивных средах. Приложения механики рассеянного разрушения – это задачи о ресурсе элементов конструкций до появления видимых дефектов.

Цель данной работы – построить на основе механики рассеянного разрушения континуальную модель роста трещин вследствие коррозионного растрескивания сталей для прогнозирования ресурса элементов конструкций, взаимодействующих с агрессивной средой, до появления в них видимых дефектов. В отличие от существующих исследований сделана попытка исключить из рассмотрения физико-химические процессы, происходящие при коррозионном растрескивании, и ограничиться лишь описанием известных фено-

Континуальная модель роста трещин вследствие коррозионного растрескивания сталей. Пусть деформируемое твердое тело занимает область Y , ограниченную поверхностью υ , и в точках на части поверхности $\upsilon_{SCC} \subset \upsilon$ взаимодействует с агрессивной средой, которая вместе с растягивающими напряжениями вызывает коррозионное растрескивание. Следуя идее работы [2], для описания роста трещин с момента ее зарождения до появления видимых дефектов вводим в точках поверхности υ_{SCC} скалярный нормированный параметр ω , связанный с длиной l трещины:

$$\omega = \frac{l - l_0}{l_* - l_0}, \quad 0 \leq \omega \leq 1. \quad (1)$$

Визуально невидимая трещина в начальный момент времени имеет длину l_0 и $\omega = 0$, а в момент времени t^* , когда она достигает критической длины l^* и становится видимой, $\omega = 1$.

Скорость нормированной длины трещины ω в данной агрессивной среде зависит от раскрывающего ее растягивающего напряжения σ , а также текущей длины:

$$\frac{d\omega}{dt} = S(\sigma; \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_k, T) \cdot W(\omega), \quad (2)$$

где $S(\sigma; \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_k, T)$ – функция раскрывающего напряжения, определенная для заданных значений параметров $\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_k$, характеризующих свойства агрессивной среды, и температуры T ; $W(\omega)$ – функция длины трещины.

Проинтегрируем уравнение (2) при постоянном напряжении, что отвечает условиям опытов на растяжение образцов при неизменных свойствах агрессивной среды и температуры:

$$\int_0^1 \frac{d\omega}{W(\omega)} = \int_0^{t^*} S(\sigma; \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_k, T) dt \Rightarrow t^* = \frac{1}{S(\sigma; \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_k, T)} \int_0^1 \frac{d\omega}{W(\omega)}, \quad (3)$$

где t^* – время коррозионного растрескивания, соответствующее появлению видимых трещин.

Выражение (3) согласуется с установленными ранее [6] количественными оценками времени коррозионного растрескивания сталей. Правую часть кинетического уравнения (2) следует выбирать так, чтобы это выражение (3) описывало экспериментально установленные кривые длительной коррозионной прочности.

Когда в точке тела реализуется сложное напряженное состояние, величину σ следует трактовать как эквивалентное напряжение коррозионного растрескивания, определяемое тензором напряжений. Найдем эквивалентное напряжение в точке тела, положение которой на поверхности υ_{SCC} характеризует радиус-вектор \vec{r} , если поверхность υ_{SCC} описывается уравнением $f(\vec{r}) = 0$. Для этого в рассматриваемой точке построим внешнюю нормаль $\vec{n} = \frac{\text{grad} f}{|\text{grad} f|}$, векторы $\vec{\tau} = \frac{\vec{r} \times \vec{n}}{|\vec{r} \times \vec{n}|}$, $\vec{b} = \vec{n} \times \vec{\tau}$, лежащие в касательной плоскости.

Положения точек тела зададим в криволинейных координатах x^k , тензор напряжений представим компонентами σ^{ij} и определим проекции на векторы

$\vec{\tau}$ и \vec{b} напряжения \vec{p}_c , подсчитанного в точке поверхности тела на площадке с нормалью \vec{c} , ортогональной вектору \vec{n} :

$$\begin{aligned} p_{c\tau} &= \sigma_{\tau\tau} \cos \varphi + \sigma_{\tau b} \sin \varphi; & p_{cb} &= \sigma_{\tau b} \cos \varphi + \sigma_{bb} \sin \varphi; \\ \sigma_{\tau\tau} &= \sigma^{ij} \tau_i \tau_j; & \sigma_{bb} &= \sigma^{ij} b_i b_j; & \sigma_{\tau b} &= \sigma_{b\tau} = \sigma^{ij} b_i \tau_j, \end{aligned} \quad (4)$$

где $p_{c\tau}$, p_{cb} – проекции напряжения \vec{p}_c ; φ – угол между ортами $\vec{\tau}$ и \vec{c} ; $\sigma_{\tau\tau}$, σ_{bb} , $\sigma_{\tau b}$ – компоненты напряжений на площадках с нормальными $\vec{\tau}$ и \vec{b} .

Найдем в точке поверхности v_{SCC} тела площадку с нормалью \vec{c} , ортогональной вектору \vec{n} , на которой действуют только нормальные напряжения σ_c . Проекция напряжения на такой площадке имеют вид

$$p_{c\tau} = \sigma_c \cos \varphi; \quad p_{cb} = \sigma_c \sin \varphi. \quad (5)$$

Подставив выражения (5) в формулы (4), получим уравнение для определения нормального напряжения σ_c :

$$\begin{vmatrix} \sigma_{\tau\tau} - \sigma_c & \sigma_{\tau b} \\ \sigma_{\tau b} & \sigma_{bb} - \sigma_c \end{vmatrix} = 0. \quad (6)$$

Эквивалентное напряжение коррозионного растрескивания в точке поверхности v_{SCC} тела принимаем в виде максимального нормального напряжения σ_c , определяемого уравнением (6)

$$\sigma = \max(\sigma_c). \quad (7)$$

Легко показать, что в случае одноосного растяжения, например, цилиндрического образца эквивалентное напряжение (7) равно приложенному к образцу растягивающему напряжению.

Континуальная модель коррозионного растрескивания сталей (2), (7) дает возможность рассчитывать ресурс элементов конструкций до появления видимой трещины. Для этого нужно проинтегрировать уравнение (2) с начального момента времени, которому отвечает значение $\omega=0$, вплоть до момента времени $t=t^*$, при котором $\omega=1$. При интегрировании следует учитывать перераспределения полей напряжений σ^{ij} во времени, например, вследствие вязкоупругого деформирования, накопления ползучести, повреждаемости в объеме материала. Такие перераспределения описываются начально-краевыми задачами и требуют специального рассмотрения, что не является целью данной работы. Определение ресурса линейно-упругих элементов конструкций разделим на две независимые задачи: решение краевой задачи теории упругости для расчета точки поверхности v_{SCC} тела с максимальным эквивалентным напряжением (7) и интегрирование уравнения (2) при найденном эквивалентном напряжении.

Прогнозирование коррозионного растрескивания стальных образцов. Рассмотрим опытные данные при растяжении образцов из аустенитной нержавеющей стали типа 18-8 в растворах хлорида магния. Закономерности коррозионного растрескивания такой стали часто изучают в кипящих растворах хлорида магния [1, 7, 8]. Установлены линейные зависимости логарифма времени разрушения t^* от напряжения σ [1, 7, 8] и процентного содержания хлорида магния [8], что позволяет конкретизировать правую часть уравнения (2) для заданной температуры:

$$\frac{d\omega}{dt} = \begin{cases} 0, \sigma \leq 0 \\ A \cdot 10^{n\sigma+m\chi} (1-\omega)^{-k}, \sigma > 0, \end{cases} \quad (8)$$

где A, n, m, k – константы, характеризующие стойкость стали против коррозионного растрескивания при заданной температуре; χ – процентное содержание хлорида магния в растворе.

При растяжении образцов $\sigma = \text{const} > 0$. С учетом этого интегрированием уравнения (8) для соответствующего начального условия получим:

$$\frac{1 - (1 - \omega)^{k+1}}{k+1} = A \cdot 10^{n\sigma+m\chi} t. \quad (9)$$

Из соотношения (9) рассчитаем время коррозионного растрескивания:

$$t^* = \frac{10^{-n\sigma-m\chi}}{(k+1)A} \Rightarrow \lg t^* = \lg \frac{1}{(k+1)A} - n\sigma - m\chi. \quad (10)$$

Обработкой методом наименьших квадратов известных в литературе [7, 8] экспериментальных данных о коррозионном растрескивании стали типа 18-8 в растворах хлорида магния для времени (в h) и напряжения (в МПа) получили:

$$\lg \frac{1}{(k+1)A} \cong 6,483, \quad n \cong 6,133 \cdot 10^{-3}, \quad m \cong 9,306 \cdot 10^{-2}. \quad (11)$$

Результаты (9), (11) представлены на рис. 1. Расчетные значения времени коррозионного растрескивания образцов получены в пределах погрешностей экспериментальных данных [8], что свидетельствует о достоверности предложенной континуальной модели роста трещин вследствие коррозионного растрескивания в виде кинетического уравнения (2).

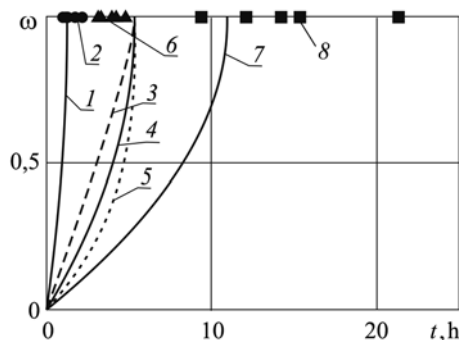


Рис. 1. Зависимости длины трещины ω от времени t при коррозионном растрескивании образцов из стали типа 18-8 в 42%-ом растворе MgCl_2 для 400 МПа (1, 2); 300 (3–6); 250 МПа (7, 8), рассчитанные при $k = 0,25$ (3); 1 (1, 4, 7); 2 (5), и экспериментальные данные работы [11] (2, 6, 8).

Fig. 1. Crack length, ω , versus time, t , under stress corrosion cracking of specimens made of 18-8 type steel in 42% MgCl_2 solution for 400 МПа (1, 2); 300 (3–6), 250 МПа (7, 8) МПа, obtained as calculation results for $k = 0.25$ (3); 1 (1, 4, 7); 2 (5) and experimental data from [11] (2, 6, 8).

Ресурс прямолинейного участка теплообменных труб парогенераторов. При эксплуатации парогенераторов атомных электростанций наблюдались разрушения вследствие коррозионного растрескивания теплообменных труб, изготовленных из аустенитных нержавеющей сталей [9]. С учетом большой длины прямолинейных участков теплообменных труб горизонтальных парогенераторов [9] рассматриваем их напряженно-деформированное

состояние в рамках задачи о плоской деформации (рис. 2а). Для компонент тензора напряжений, отвечающих решению задачи Ляме о деформировании линейно-упругого толстостенного осесимметричного цилиндра с соотношением $\alpha = r_1/r_2$ внутреннего r_1 и наружного r_2 радиусов внутренним давлением p [10], эквивалентные напряжения в точках наружной поверхности, вычисленные по формуле (7), примут вид

$$\sigma = \frac{2\alpha^2}{1-\alpha^2} p. \quad (12)$$

В качестве эквивалента агрессивной рабочей среды второго контура, в которой эксплуатируются теплообменные трубы парогенераторов, принимаем растворы хлорида магния, а в качестве материала труб – аустенитную нержавеющую сталь типа 18-8. Подставим напряжение (12) в формулу (10) и определим ресурс теплообменной трубы:

$$t^* = \frac{1}{(k+1)A} 10^{-n \frac{2\alpha^2}{1-\alpha^2} p - m\chi}. \quad (13)$$

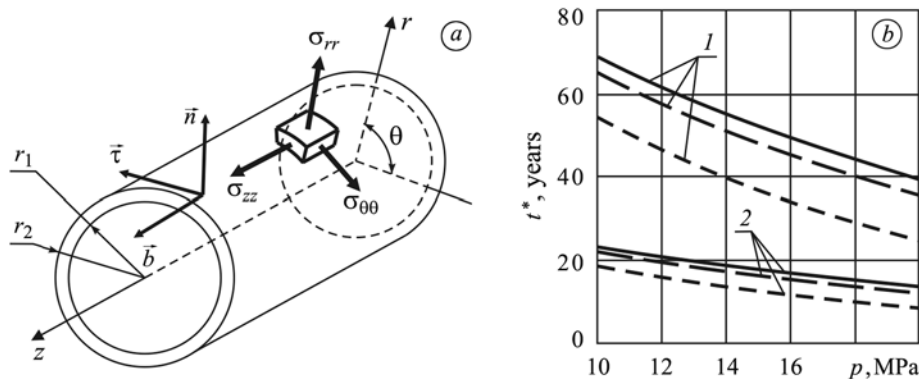


Рис. 2. Расчетные схема (а) и время коррозионного растрескивания (b) прямолинейного участка теплообменных труб парогенераторов: $\alpha = 0,8125$ (сплошные линии); $\alpha = 0,825$ (длинные штрихи); $\alpha \approx 0,8571$ (короткие штрихи) в 5% (1); 10% (2) растворах $MgCl_2$.

Fig. 2. Analytical model (a) and stress corrosion cracking time (b) of a straight section of steam generators heat-exchange pipes: $\alpha = 0.8125$ (solid line); $\alpha = 0.825$ (long dash); $\alpha \approx 0.8571$ (short dash) in 5% (1); 10% (2) $MgCl_2$ solutions.

По формуле (13) рассчитаем ресурс теплообменных труб парогенераторов [9]: ПГВ-1000 с $\alpha = 0,8125$; ПГВ-4 с $\alpha = 0,825$; ПГВ-1 с $\alpha \approx 0,8571$. Значения констант A , n , m , определим из равенств (11) при $k = 1$. Результаты расчетов представлены на рис. 2b. Видно, что с увеличением значения α и давления p воды в первом контуре снижается расчетный ресурс, что объясняется увеличением растягивающих напряжений на наружной поверхности труб. С повышением концентрации $MgCl_2$ в растворе существенно снижается ресурс теплообменных труб вследствие интенсификации физико-химических процессов при взаимодействии поверхности труб с агрессивной средой. Расчетные оценки ресурса отвечают данным, полученным в процессе эксплуатации парогенераторов [9].

ВЫВОДЫ

На основе механики рассеянного разрушения для прогнозирования ресурса элементов конструкций предложена континуальная модель роста тре-

щин вследствие коррозионного растрескивания сталей. В модели учтено влияние на коррозионное растрескивание сложного напряженного состояния в точке, текущее значение длины трещины вплоть до образования макротрещин, химический состав и температура агрессивной среды. Выполненные расчеты показали сильную зависимость ресурса теплообменных труб горизонтальных парогенераторов атомных электростанций от размеров, давления теплоносителя первого контура и химического состава агрессивной среды. Расчетные значения времени скрытого разрушения теплообменных труб согласуются с полученными в процессе эксплуатации парогенераторов.

РЕЗЮМЕ. На основі механіки розсіяного руйнування розроблено континуальну модель росту тріщин внаслідок корозійного розтріскування сталей для визначення ресурсу елементів конструкцій. Шляхом розрахункового моделювання росту тріщин у зразках із аустенітної нержавної сталі типу 18-8 на основі літературних експериментальних даних показано достовірність запропонованої моделі. Отримано розв'язки задачі про ресурс прямолінійної ділянки теплообмінних труб парогенераторів атомних електростанцій, за результатами яких встановлено суттєву залежність ресурсу від розмірів труб, тиску у першому контурі та хімічного складу агресивного середовища.

SUMMARY. Based on dissipated damage mechanics continual model of crack growth due to steels stress corrosion cracking for structural elements life time evaluation is presented. The proposed model is proved by using the obtained results of computational simulation of crack growth of 18-8 steel specimens based on published experimental data. Computational results for a straight section of nuclear power plants steam generators heat-exchange pipes are obtained. The influence of heat-exchange pipes sizes, heat transport main circuit pressure and corrosive medium chemical composition on life time is established.

1. *Василенко И. И., Мелехов Р. К.* Коррозионное растрескивание сталей. – К.: Наук. думка, 1977. – 264 с.
2. *Работнов Ю. Н.* Введение в механику разрушения. – М.: Наука, 1987. – 80 с.
3. *Андрейків О. С., Гембара О. В.* Механіка руйнування та довговічність металевих матеріалів у водневмісних середовищах. – К.: Наук. думка, 2008. – 344 с.
4. *Lemaitre J., Chaboche J.-L.* Mechanics of solid materials. – Cambridge: University press, 1994. – 556 p.
5. *Локощенко А. М.* Ползучесть и длительная прочность металлов в агрессивных средах (Обзор) // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2001. – 37, № 4. – С. 27–41.
(*Lokoshchenko A. M., Creep and Long-Term Strength of Metals in Corrosive Media (Review) // Materials Science. – 2001. – 37, № 4. – P. 559–572.*)
6. *Герасимов В. В.* Прогнозирование коррозии металлов. – М.: Металлургия, 1989. – 152 с.
7. *Акользин П. А., Гуляев В. Н.* Коррозионное растрескивание аустенитных сталей. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 272 с.
8. *Погодин В. П., Богоявленский В. Л., Сентюров В. П.* Межкристаллитная коррозия и коррозионное растрескивание нержавеющей сталей в водных средах. – М.: Атомиздат, 1970. – 294 с.
9. *Парогенераторы реакторных установок ВВЭР для атомных электростанций / Б. И. Лукасевич, Н. Б. Трунов, Ю. Г. Драгунов, С. Е. Давиденко.* – М.: ИКЦ “Академкнига”, 2004. – 391 с.
10. *Прочность, устойчивость, колебания: Справ. в 3-х т.* – М.: Машиностроение, 1968. – Т. 2. – 464 с.

Получено 02.10.2009