

УДК 539.3

О ВЛИЯНИИ ХИМИЧЕСКИ АКТИВНЫХ СРЕД НА  
 НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ И  
 ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ТОНКОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

ЗЕЛЕНЦОВ Д. Г., ПОЧТМАН Ю. М.

Широкое применение тонкостенных конструкций в строительстве и промышленности предъявляет повышенные требования к надежности и долговечности их элементов. Часто элементы таких конструкций эксплуатируются в условиях воздействия агрессивных сред при высоких температурах и давлениях, что существенно сказывается на их несущей способности и долговечности. Особый интерес представляет общий случай коррозионного разрушения, при котором скорость коррозии является функцией напряженно-деформированного состояния (которое, в свою очередь, изменяется с течением времени за счет изменения под действием коррозии геометрических и жесткостных характеристик конструкции), температуры и времени контакта со средой.

1. В общем виде система дифференциальных уравнений, описывающая изменение геометрических и жесткостных характеристик, имеет вид:

$$\frac{d\vec{A}}{dt} + \vec{\psi}(\vec{A}, \sigma, T, t) = 0 \quad (1.1)$$

где  $\vec{A} = [A_1, A_2, A_3, \dots, A_n]^T$  — вектор изменяющихся геометрических и жесткостных характеристик конструкции;  $\vec{\psi} = [\psi_1, \psi_2, \psi_3, \dots, \psi_n]^T$  — вектор известных функций;  $\sigma, T, t$  — соответственно, значения напряжений, температуры и времени контакта со средой. В [1, 2] были предложены некоторые подходы к решению задач расчета и оптимизации тонкостенных цилиндрических оболочек, подверженных коррозионному износу и находящихся в условиях однородного напряженно-деформированного состояния (НДС).

Решение задачи значительно усложняется в случае, когда материал конструкции неоднороден, а также влияние агрессивной среды, температура и напряженное состояние неоднородны по области конструкции. В этом случае аналитическое решение поставленной задачи весьма затруднено, а в ряде случаев вообще невозможно.

В настоящей работе предлагается использовать для решения за-

дач расчета НДС и долговечности тонкостенных конструкций метод конечных элементов (МКЭ). Предполагается, что геометрические и жесткостные характеристики материала, напряжения, температура и характер влияния среды постоянны по области  $i$ -го конечного элемента.

При дискретизации области конструкции  $N$  конечными элементами вектор  $\vec{A}$  будет иметь вид:

$$\vec{A} = [h_1, h_2, h_3, \dots, h_n, \omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_n, E_1, E_2, E_3, \dots, E_n]^T \quad (1.2)$$

Здесь:  $h_i$  — толщина  $i$ -го КЭ. Изменение толщины описывается кинетическим уравнением вида

$$\frac{dh_i}{dt} = -v_i^0 \varphi(\sigma, T, t), \quad i = \overline{1, N} \quad (1.3)$$

где  $v_i^0$  — скорость коррозии  $i$ -го КЭ при отсутствии напряжений;

$$v_i^0 = - \left. \frac{dh_i}{dt} \right|_{\sigma=0}, \quad i = \overline{1, N} \quad (1.4)$$

$\omega_i$  — параметр повреждения ( $0 \leq \omega_i \leq 1$ ); кинетическое уравнение изменения  $\omega_i$  принимается в форме Ю. Н. Работнова:

$$\frac{d\omega_i}{dt} = a_k \left( \frac{\sigma_i}{1 - \omega_i} \right)^{b_k}, \quad i = \overline{1, N} \quad (1.5)$$

где  $a_k$  и  $b_k$  — константы;  $E_i$  — модуль упругости

$$E_i = \frac{E_i^0}{1 + \lambda_k \omega_i} \quad (1.6)$$

$E_i^0$  — модуль упругости исходного материала  $i$ -го КЭ;

$\lambda_k$  — константа. Значение констант  $a_k$ ,  $b_k$ ,  $\lambda_k$  определяется временем контакта с агрессивной средой: с некоторого момента времени  $t^*$  начинается интенсивное накопление повреждений в материале. Промежуток времени  $t: 0 \leq t \leq t^*$  носит название инкубационного периода [3]; его продолжительность зависит от температуры  $T$  и давления  $p$  среды, а также от химического состава материала.

Согласно гипотезам Кирхгофа-Лява, напряженное состояние в одном КЭ будет характеризоваться вектором

$$\vec{\sigma} = [\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}]^T \quad (1.7)$$

Поэтому в уравнениях (1.3) и (1.5) в качестве  $\sigma$  будем использовать некоторое эквивалентное напряжение, например,

$$\sigma_u = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y} \quad (1.8)$$

Поэтому в уравнениях (1.3) и (1.5) в качестве  $\sigma$  будем использовать характеристики в некоторый момент времени будут характеризоваться векторами:

$$\begin{aligned}
 \vec{\sigma} &= [\sigma_{a_1}, \sigma_{a_2}, \sigma_{a_3}, \dots, \sigma_{a_N}]^T \\
 \vec{\omega} &= [\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_N]^T \\
 \vec{h} &= [h_1, h_2, h_3, \dots, h_N]^T \\
 \vec{E} &= [E_1, E_2, E_3, \dots, E_N]^T
 \end{aligned}
 \tag{1.9}$$

2. Применим пошаговый (по времени) алгоритм расчета, который позволит оценить НДС и поврежденность конструкции на данном шаге по его значению на предыдущем. Для этого выберем шаг по времени  $\Delta t$  таким, чтобы обеспечить необходимую точность вычислений. Тогда значения элементов вектора  $\vec{A}$  определяются следующим образом:

$$A_s^j = A_s^{j-1} - \Delta t^j \psi_s(\vec{A}^{j-1}, \vec{\sigma}^{j-1}, T, \Delta t^{j-1}) \tag{2.1}$$

Здесь  $j$  — номер шага по времени;  $\vec{\sigma} = [D][B][K]\vec{R}$  (2.2)

$\vec{R}$  — вектор узловых нагрузок;  $[K]$ ,  $[B]$ ,  $[D]$  — соответственно матрицы жесткости конструкции, дифференцирования и упругости, причем элементы матрицы жесткости являются функцией вектора  $\vec{A}$ :

$$k_{mn} = f(\vec{A}) \tag{2.3}$$

Будем считать, что конструкция выходит из строя, когда

$$\max\{\sigma_j\} \geq [\sigma] \tag{2.4}$$

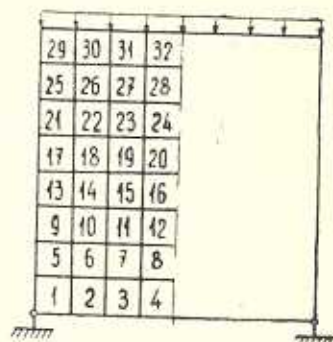
или

$$\max\{\omega_j^i\} \geq 1 \tag{2.5}$$

Долговечность конструкции, таким образом, будет равна

$$\tau = \sum_{j=1}^l \Delta t^j \tag{2.6}$$

где  $l$  — номер шага, на котором начинают выполняться условия (2.4) — (2.5).



Фиг. 1.



3. В качестве численной иллюстрации рассмотрим свободноопертую квадратную балку-стенку (Фиг. 1) со стороной  $L = 1\text{ м}$ , нагруженную по верхнему контуру равномерно распределенной нагрузкой интенсивности  $q = 1,96 \cdot 10^6 \text{ Н/м}$ . Характеристики материала  $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ ,  $\mu = 0,3$ . Конструкция находится в агрессивной среде, не вызывающей накопления повреждений, а следовательно, и изменения жесткостных характеристик.

Рассмотрим две модели, описывающие изменение толщины конструкции во времени. В [4] предложена модель

$$\frac{dh}{dt} = -v^0 \exp \frac{V\sigma}{RT} \quad (3.1)$$

где  $V$  — мольный объем корродирующего материала (для стали  $V = 7 \text{ см}^3$ );  $R$  — универсальная газовая постоянная.

В [5] предполагается, что скорость коррозии линейно зависит от напряжений:

$$\frac{dh}{dt} = -v^0(1 + k\sigma) \quad (3.2)$$

где

$$k = \left(1 - \frac{v^0}{v^{*p}}\right) \left[ \frac{1}{\sigma} \right]; \quad v^{*p} = - \left. \frac{dh}{dt} \right|_{\sigma=|\sigma|} \quad (3.3)$$

Параметры агрессивной среды принимались:  $T = 300$  град  $K$ ,  $v^{*p} = 0,5$  см/год,  $0,1 \leq v^0 \leq 0,3$  см/год. В качестве  $[\sigma]$  принимался предел текучести  $\sigma_T = 240$  МПа. Величина шага по времени вычислялась по формулам

$$\Delta t^j = \alpha \Delta t^{j-1} \quad (3.4)$$

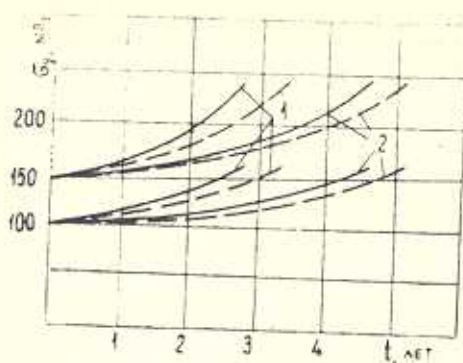
$$\Delta t^1 = \frac{h^0}{\beta v^0} \quad (3.5)$$

Значения  $\alpha$  и  $\beta$  выбирались в процессе эксперимента на ЭВМ в пределах:  $0,8 \leq \alpha \leq 1,0$ ;  $10 \leq \beta \leq 25$ .

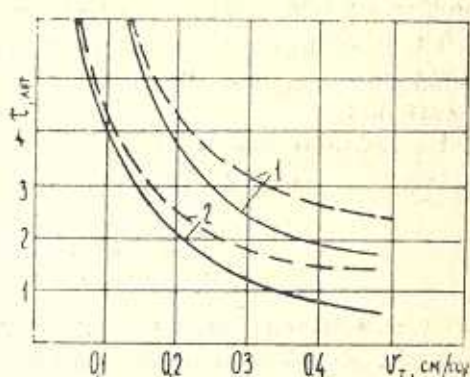
На графиках (Фиг. 2 и 3) показаны зависимости напряжений в элементах конструкции от времени и долговечности конструкции от скорости коррозии в ненагруженной конструкции.

Рост напряжений в элементах конструкции в зависимости от времени контакта со средой (Фиг. 2) зависит от вида среды. В верхней части графика показаны кривые роста напряжений в элементе №1, в нижней — кривая роста в элементе №9. Цифрой 1 обозначена кривая при скорости коррозии  $v^0 = 0,25$  см/год, цифрой 2 — для  $v^0 = 0,15$  см/год. Сплошная линия соответствует модели разрушения (3.1), штриховая — модели (3.2). Агрессивная среда, описываемая моделью (3.1), как следует из графика, оказывает более сильное воздействие на процесс разрушения конструкции, чем среда, описываемая моделью (3.2). На-

пряжения достигают предельных, в первую очередь, в элементе № 1 и долговечность конструкции в данном случае определяется долговечностью этого элемента (№ 2, 73 года).



Фиг. 2.



Фиг. 3.

На фиг. 3 показано влияние скорости коррозии  $v^0$  на долговечность конструкции. Здесь цифрой 1 обозначены кривая для конструкции с начальной толщиной  $h^0 = 3$  см; цифрой 2—для конструкции с  $h^0 = 2,5$  см. Результаты получены с помощью специального разработанного пакета прикладных программ на языке ФОРТРАН для ЭВМ типа ЕС с использованием различных типов КЭ и моделей агрессивных сред.

В заключение отметим, что предлагаемый подход позволяет с высокой точностью оценить ресурс конструкции и ее НДС в произвольный момент времени для различных видов агрессивных сред.

## INFLUENCE OF CHEMICAL ACTIVE MEDIUM ON STRESS-STRAIN STATE AND DURABILITY OF THIN-WALL CONSTRUCTIONS

D. G. ZELENTSOV, YU. M. POCHTMAN

ՔԱՐԱԿԱՊԱՏ ԿԱՌՈՒՅՎԱԾՔՆԵՐԻ ԵՐԿԱՐԱԿԵՑՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ԼԱՐՎԱԾԱՅԻՆ ԴԵՖՈՐՄԱՑՎԱԾ ՎԻՃԱԿԻ ՎՐԱ ՔԻՄԻԱՊԵՍ ԱԿՏԻՎ ՄԻՋԱՎԱՅՐԻ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅԱՆ ՄԱՍԻՆ

Դ. Գ. ՉԵԼԵՆՏՈՎ, ՅՈՒ. Մ. ՊՈՇՏՄԱՆ

Ա մ փ ո փ ո ս մ

Առաջարկվում է անհամասեռ բարակապատ կառուցվածքների երկարակեցության և լարվածային դեֆորմացված վիճակի հետազոտման ընդհանուր մոտեցում, երբ նրանք փոխազդեցության մեջ են մտնում բարդ ակտիվ միջավայրերի հետ:

## ЛИТЕРАТУРА

1. Овчинников И. Г., Сабитов Х. А. К определению напряженно-деформированного состояния и долговечности цилиндрических оболочек с учетом коррозионного износа.—Стр. механика и расчет сооружений, 1986, №1, с. 13—17.
2. Зеленцов Д. Г., Почтман Ю. М. Оптимизация долговечности и стоимости цилиндрических оболочек, подвергающихся механическому и химическому разрушению.—ФХММ, 1987, №4, с. 70—73.
3. Арчаков Ю. И. Водородная коррозия стали.—М.: Металлургия, 1985. 192 с.
4. Гутман Э. М. Механохимия металлов и защита от коррозии.—М.: Металлургия, 1981. 270 с.
5. Карпунин В. Г., Клещев С. И., Корнишин М. С. К расчету пластин и оболочек с учетом общей коррозии.—В кн.: Труды X Всесоюзной конференции по теории оболочек и пластин, Тбилиси: Менинереба, 1975, т. 1, с. 166—174.

Днепропетровский государственный  
университет

Поступила в редакцию  
10.XI.1988