

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:

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

где $\vec{A} = [A_1, A_2, A_3, \dots, A_n]^T$ — вектор изменяющихся геометрических и жесткостных характеристик конструкции; $\vec{\psi} = [\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n]^T$ — вектор известных функций; ε, 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-

для 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 A будет иметь вид:

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

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

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

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

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

ω_i — параметр повреждения ($0 \leq \omega_i \leq 1$); кинетическое уравнение изменения ω_i принимается в форме К. 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;

λ_k — константа. Значение констант a_k , b_k , λ_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 σ будем использовать некоторое эквивалентное напряжение, например,

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

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

$$\begin{aligned} \vec{a} &= \{a_{01}, a_{02}, a_{03}, \dots, a_{0N}\}^T \\ \vec{\omega} &= \{\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_N\}^T \\ \vec{h} &= \{h_1, h_2, h_3, \dots, h_N\}^T \\ \vec{E} &= \{E_1, E_2, E_3, \dots, E_N\}^T \end{aligned} \quad (1.9)$$

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 Δt таким, чтобы обеспечить необходимую точность вычислений. Тогда значения элементов вектора \vec{A} определяются следующим образом:

$$A_i^j = A_i^{j-1} - \Delta t^j \psi_j(A^{j-1}, \vec{\sigma}^{j-1}, T, \Delta t^{j-1}) \quad (2.1)$$

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

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

$$k_{ij} = f(\vec{A}) \quad (2.3)$$

Будем считать, что конструкция выходит из строя, когда

$$\max\{\sigma_i^j\} > [\sigma] \quad (2.4)$$

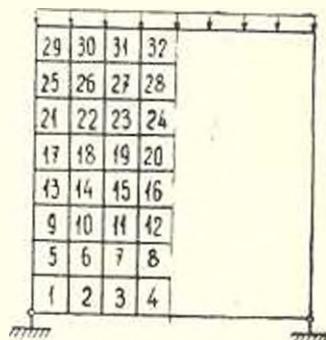
или

$$\max\{\omega_i^j\} > 1 \quad (2.5)$$

Долговечность конструкции, таким образом, будет равна

$$s = \sum_{j=1}^l \Delta t^j \quad (2.6)$$

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



Фиг. 1.

3. В качестве численной иллюстрации рассмотрим свободнооперную 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 $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$, $\nu = 0,3$. 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

$$\frac{dh}{dt} = -v^0 \exp \frac{V_0}{RT} \quad (3.1)$$

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

$$k = \left(1 - \frac{v^0}{v^{kp}}\right) \left| \frac{1}{\sigma} \right|; \quad v^{kp} = - \frac{dh}{dt} \Big|_{\sigma=|\sigma|} \quad (3.3)$$

Параметры агрессивной среды принимались: $T = 30^\circ \text{ град К}$, $v^{kp} = 0,5 \text{ см/год}$, $0,1 \leq v^0 \leq 0,3 \text{ см/год}$. В качестве $|\sigma|$ принимался предел текучести $\sigma_T = 240 \text{ МПа}$. Величина шага Δt во времени вычислялась по формулам

$$\Delta t^1 = \alpha \Delta t^0 \quad (3.4)$$

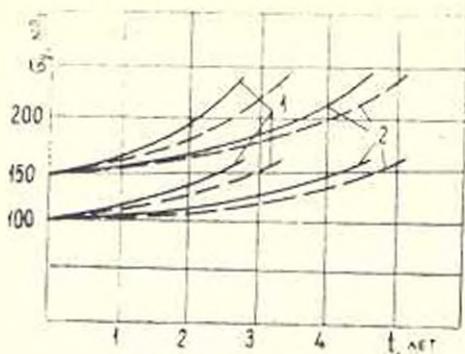
$$\Delta t^1 = \frac{h^0}{\beta v^0} \quad (3.5)$$

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

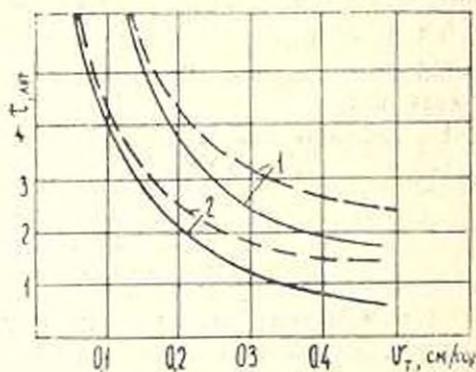
На графиках (фиг. 2 и 3) показаны зависимости напряжений в элементах конструкции от времени и долговечности конструкции от скорости коррозии в ненагруженной конструкции.

Рост напряжений в элементах конструкции в зависимости от времени контакта со средой (фиг. 2) зависит от вида среды. В правой части графика показаны кривые роста напряжений в элементе №1, в нижней — кривая роста в элементе №9. Цифрой 1 обозначена кривая при скорости коррозии $v^0 = 0,25 \text{ см/год}$, цифрой 2 — для $v^0 = 0,15 \text{ см/год}$. 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

ԱՐԱԿԱՊԱՆ ԿԱՌՈՒՅՎԱԾՔՆԵՐԻ ԵՐԱՐԱԿԱԿՆՑՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ՀԱՐՎԱԾԱՑԻՆ
ԴԵՖՈՐՄԱՑՎԱՆ ՎԻՃԱԿԻ ՎՐԱ ՔՈՒՄԻԱՊՈՆ ԱԿՏԻՎ ՄԻՋԱՎԱՅՐԻ
ԱՋԴԵՑՈՒԹՅԱՆ ՄԱՍԻՆ

Դ. Գ. ՉԵԼԵՆՏՈՎ, ՅՄԻ. Մ. ՊՈՇՏՄԱՆ

Ա Վ Փ Ո Ւ Մ

Առաջարկվում է անհամաեռ բարակապսա կառուցվածքների երկարակեցության և շարվածային 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: Метинереба, 1975, т. 1, с. 166—174.

Днепропетровский государственный
университет

Поступила в редакцию
10.XI.1988