МЕТОДИКА РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОЛОГОЙ НЕСОВЕРШЕННОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ЛОКАЛЬНО ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩЕЙ С АГРЕССИВНОЙ СРЕДОЙ

Коломийчук Г.П. *(Одесская государственная академия строительства и архитектуры)*

Внешняя агрессивная среда вызывает коррозионное разрушение поверхности элементов конструкций. Разрушение в этом случае представляет собой процесс, идущий за счет накопления повреждений в материале и изменения его свойств. Микроструктурная картина разрушений показывает, что под действием агрессивной среды и напряжений на границах зерен возникает система микротрещин с преимущественной ориентацией в плоскостях, нормальных к направлению растяжения. Удельная концентрация таких трещин в материале постепенно увеличивается, нарушая однородность поля напряжений и уменьшая вероятность появления пластических деформаций.

Степень поврежденности материала оболочки в точке вследствие коррозийного воздействия среды характеризуется параметром коррозийной поврежденности ψ, изменяющимся от 1 в начальный момент времени до ψ_p в момент разрушения. Коррозионное разрушение начинается с поверхности и приводит к постепенному ослаблению сечения, вызывая в конечном счете изменение напряженно-деформированного состояния. Влияние коррозионного разрушения на поведение оболочки можно учесть, если интерпретировать ψ как сплошность материала в точке конструкции.

Разрушение – необратимый процесс, часть работы которого идет на повышение потенциала тела в связи со всевозможными искажениями внутренней структуры. А так как в конечном счете все дефекты приводят к образованию трещин, то можно считать всю скрытую накопленную в теле энергию как энергию, связанную с подготовкой к разрушению тела. Поэтому предполагается, что скорость накопления повреждений пропорциональна удельной энергии деформирования разрушаемого слоя поверхности:

$$\frac{d\delta}{dt} = \alpha\varepsilon_i\left(\sigma_i - \sigma_n\right) + \beta , \qquad (1)$$

где σ_i, ε_i – интенсивность напряжений и деформаций;

σ_n – пороговый уровень напряжений; β – учитывает разрушение материала от коррозии в ненапряженной конструкции; α – коэффициент, характеризующий влияние агрессивной среды.

Как известно, существует два типа предельных состояний материала – хрупкое разрушение и текучесть. Причем, в зависимости от условий работы оболочки один и тот же материал, в разных участках конструкции, может вести себя и как пластичный и как хрупкий. В случае коррозионного разрушения критерий предельного состояния учитывает происходящее охрупчивание материала. Поэтому условие локального разрушения принимается в виде

$$\sigma_i \geq \sigma_p = \sigma_m \left(1 - \frac{\sigma_0}{s}\right)^m, \tag{2}$$

где σ_m – предел текучести; s – сопротивление материала всестороннему отрыву (можно принять $s = \sigma_B$); σ_0 – среднее нормальное напряжение; m – показатель охрупчивания материала.

Как видно, условие (2) отражает происходящее охрупчивание материала через изменение предельного напряжения.

Запишем уравнения, описывающие коррозионный износ физически и геометрически нелинейных пологих несовершенных металлических оболочек с переменной толщиной, несимметричной относительно поверхности приведения. Для этого рассмотрим прямоугольную в плане пологую оболочку с размерами $2a \times 2b \times h$. Начало координат поместим в центре, а оси координат x, y направим параллельно сторонам. Ось z направим по внутренней нормали к поверхности приведения ($z = 0$). Считаем, что в общем случае поверхность приведения не совпадает со срединной поверхностью.

Поверхности оболочки, контактирующие с агрессивной средой, описываются уравнениями $h_1 = h_1(x, y)$, $h_2 = h_2(x, y)$, причем $-h_1 \leq z \leq h_2$, $h_1 + h_2 = h$. Уравнения, описывающие воздействие агрессивной среды на гибкую металлическую оболочку, примем в виде [1]

$$\frac{\partial \delta_1}{\partial t} = -\varphi_1(t)\left(\alpha_1 + \beta_1\, \sigma_i^B\right),\ \delta_1(x, y, 0) = 0, \tag{3}$$

$$\frac{\partial \delta_2}{\partial t} = -\varphi_2(t)\left(\alpha_2 + \beta_2\, \sigma_i^H\right),\ \delta_2(x, y, 0) = 0. \tag{4}$$

Здесь уравнение (3) относится к верхней, а уравнение (4) к нижней поверхности оболочки, и поэтому σ_i^B – интенсивность напряжений в точках верхней, а σ_i^H – в точках нижней поверхности оболочки. Составляющие $h_1(x, y, t)$, $h_2(x, y, t)$ – толщины оболочки в произвольный момент времени – связаны с глубинами коррозионного повреждения δ_1 и δ_2, играющими роль параметров поврежденности, уравнениями

$$h_1(x,y,t) = h_1^0(x,y) - \delta_1(x,y,t), \tag{5}$$

$$h_2(x,y,t) = h_2^0(x,y) - \delta_2(x,y,t), \tag{6}$$

где $h_1^0(x,y)$, $h_2^0(x,y)$ – начальные функции толщины.

Подставляя выражения для δ_1 и δ_2 в (3) и (4), полученные из (5), (6), найдем:

$$\partial h_1/\partial t = -\varphi_1(t)\left(\alpha_1 + \beta_1\,\sigma_i^B\right),\ h_1(x,y,t) = h_1^0(x,y), \tag{7}$$

$$\partial h_2/\partial t = -\varphi_2(t)\left(\alpha_2 + \beta_2\,\sigma_i^H\right),\ h_2(x,y,t) = h_2^0(x,y), \tag{8}$$

Эти уравнения отражают закон изменения толщины оболочки во времени под действием агрессивной среды.

К уравнениям коррозии (7), (8) необходимо добавить уравнения, описывающие поведение оболочки с учетом изменения его размеров и свойств от коррозии. Будем считать справедливыми следующие допущения:

– прогибы оболочки соизмеримы с ее толщиной и находятся в переделах применимости геометрически нелинейной теории оболочек;

– применима гипотеза Кирхгофа-Лява;

– нагружение простое, что позволяет использовать соотношения теории малых упруго-пластических деформаций (деформационной теории А.А. Ильюшина). Согласно деформационной теории, связь между напряжениями и деформациями в случае активного нагружения имеет вид

$$\begin{gathered}\sigma_x - \sigma_0 = 2\sigma_i\left(\varepsilon_x - \varepsilon_0\right)/3\varepsilon_i,\ \sigma_y - \sigma_0 = 2\sigma_i\left(\varepsilon_y - \varepsilon_0\right)/3\varepsilon_i,\\ \sigma_z - \sigma_0 = 2\sigma_i\left(\varepsilon_z - \varepsilon_0\right)/3\varepsilon_i,\ \tau_{xy} = \sigma_i\cdot\gamma_{yx}/3\varepsilon_i,\\ \tau_{yz} = \sigma_i\cdot\gamma_{yz}/3\varepsilon_i,\ \tau_{zx} = \sigma_i\cdot\gamma_{zx}/3\varepsilon_i,\end{gathered} \tag{9}$$

где σ_i и ε_i – интенсивности напряжений и деформаций, связанные между собой соотношением

$$\sigma_i = 3G(1-\omega)\,\varepsilon_i, \tag{10}$$

в котором G – модуль сдвига, $\omega = \omega(\varepsilon_i)$ – функция пластичности, отличная от нуля только за пределом упругости. Вид этой функции определяется при обработке экспериментально полученных диаграмм деформирования образцов материала оболочки. Среднее напряжение связано со средней деформацией соотношением

$$\sigma_0 = 2K\varepsilon_0, \tag{11}$$

где K – модуль объемной деформации, причем

$$K = E/3\,(1-2\mu). \tag{12}$$

Используя допущения теории тонких пологих оболочек и уравнения деформационной теории (9), после некоторых преобразований получим:

$$
\begin{aligned}
N_x &= Eh\left(1-\mu^2\right)^{-1}\left[\varepsilon_x + \mu\varepsilon_y + \left(h_2 - h_1\right)\left(\chi_x + \mu\chi_y\right)\right] + \Delta N_x, \\
N_y &= Eh\left(1-\mu^2\right)^{-1}\left[\varepsilon_y + \mu\varepsilon_x + \left(h_2 - h_1\right)\left(\chi_y + \mu\chi_x\right)\right] + \Delta N_y, \\
N_{xy} &= 0{,}5Eh\left(1+\mu\right)^{-1}\left[\gamma_{xy} - \left(h_2 - h_1\right)\chi\right] + \Delta N_{xy}, \\
M_x &= E\left(1-\mu^2\right)^{-1}\left[\left(h_1^3 + h_2^3\right)\left(\chi_x + \mu\chi_y\right)/3 + \right. \\
&\left. + \left(h_2^2 + h_1^2\right)\left(\varepsilon_x + \mu\varepsilon_y\right)\cdot 0{,}5\right] + \Delta M_x, \\
M_y &= E\left(1-\mu^2\right)^{-1}\left[\left(h_1^3 + h_2^3\right)\left(\chi_y + \mu\chi_x\right)/3 + \right. \\
&\left. + \left(h_2^2 + h_1^2\right)\left(\varepsilon_y + \mu\varepsilon_x\right)\cdot 0{,}5\right] + \Delta M_y, \\
M_{xy} &= E\left(1+\mu\right)^{-1}\left[\chi\left(h_1^3 + h_2^3\right)/3 + \gamma_{xy}\left(h_2^2 - h_1^2\right)\cdot 0{,}25\right] + \Delta M_{xy}.
\end{aligned}
\qquad (13)
$$

Выражения, связывающие усилия и деформации, содержат две группы слагаемых. Первая группа – слагаемые, обусловленные несимметричностью толщины оболочки относительно поверхности приведения; вторая группа – слагаемые, обусловленные физической нелинейностью материала оболочки.

Дополняя физические соотношения геометрическими и уравнениями равновесия несовершенной пологой оболочки [2], а также учитывая условия на контуре получаем окончательную систему нелинейных алгебраических уравнений.

Для решения этих уравнений применялся метод конечных разностей в сочетании с методом Рунге-Кутта.

Литература

1. Карпунин В.Г. Исследование изгиба на устойчивость пластин и оболочек с учетом сплошной коррозии: Автореф. дис... канд. техн. наук. – Свердловск, 1977. – 20 с.

2. Коломийчук Г.П. Устойчивость несовершенных пологих железобетонных оболочек // Резервы прочности бетонных и железобетонных конструкций. – К.: УМК ВО. – 1989. – С. 111 – 115.