

УДК 624.014.2

д.т.н., профессор Банах В.А.,
к.т.н., доцент Скачков В.А., Воденникова О.С.,
Запорожская государственная инженерная академия

МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ АРМАТУРЫ В ПРОЦЕССЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Рассмотрена задача снижения предела прочности металлической арматуры в результате внутренней коррозии в процессе эксплуатации строительных конструкций в условиях окислительной среды. Предел прочности металлической арматуры определяется численным экспериментальным путем построения диаграммы деформирования, определение точек которой находится из решения статической краевой задачи микромеханики структурно-неоднородных сред.

Ключевые слова: диаграмма, деформирование, микроструктурные деформации и напряжения, статистическая краевая задача

Актуальность. В процессе эксплуатации строительных конструкций в условиях коррозионных сред снижение несущей способности металлической арматуры, упрочняющей железобетонной конструкции, реализуется в результате внутренней и внешней коррозии. Внешняя коррозия представляет собой слой оксидного слоя железа, который образуется и увеличивается по толщине в условиях влажной окружающей среды. Увеличивающаяся толщина оксидного слоя снижает несущее поперечное сечение арматуры. Внутренняя коррозия обуславливает процесс старения металла, что приводит к снижению модулей упругости и пределов прочности металла арматуры [1].

Целью настоящей работы является оценка влияния внутренней коррозии на изменение упругих и прочностных характеристик металлической арматуры в условиях влажной среды.

Материалы исследования. Строительные конструкции в условиях эксплуатации находятся в напряженном состоянии, которое обуславливает изменения формы структурных элементов. Структурные элементы металлов в напряженном состоянии значительно быстрее подвергаются коррозии [1].

Моделируя структуру корродируемого металла средой класса B_2 [2], полную систему уравнений статической микромеханики можно записать:

$$\xi_{i\alpha,\alpha} = 0; \quad (1)$$

$$\xi_{ij} = \theta_{ij\alpha\beta} \left(1 - \int_0^t k(\tau) \varphi(\xi_{ij}, S) d\tau\right) \varepsilon_{\alpha\beta}; \quad (2)$$

$$\varepsilon_{ij} = (\chi_{i,j} + \chi_{j,i})/2; \quad (3)$$

$$\chi_i / \Gamma = U_i^\Gamma; \quad (4)$$

где ξ_{ij} – случайное микронапряжение;
 ε_{ij} – случайные микродеформации;
 χ_i – случайные микроперемещения;
 U_i^Γ – детерминированное перемещение на границе элементов первого порядка малости [2];

τ – время процесса;

θ_{ijmm} – случайные модули упругости;

$k(\tau)$ – случайная функция, устанавливающая влияние процесса коррозии;

$\varphi(\xi_{ij}, S)$ – случайная функция, зависящая от действующих микронапряжений и предела прочности;

S – пределы прочности структурных элементов.

Усредняя уравнение (2) с учетом статической независимости, физических характеристик от микродеформации, получим:

$$\begin{aligned} \langle \xi_{ij} \rangle = & \langle \theta_{ij\alpha\beta} \rangle \left[\left(1 - \int_0^t \langle k(\tau) \rangle \langle \varphi(\xi_{ij}, S) \rangle + \right. \right. \\ & \left. \left. \langle k^o(\tau) \varphi^o(\xi_{ij}, S) \rangle d\tau - \right. \right. \\ & \left. \left. \int_0^t \langle \theta_{ij\alpha\beta}^o k^o(\tau) \rangle \langle \varphi(\xi_{ij}, S) \rangle + \right. \right. \\ & \left. \left. \langle \theta_{ij\alpha\beta}^o \varphi^o(\xi_{ij}, S) \rangle \langle k(\tau) \rangle + \right. \right. \\ & \left. \left. \langle \theta_{ij\alpha\beta}^o \varphi^o(\xi_{ij}, S) k^o(\tau) \rangle d\tau \right] \langle \varepsilon_{\alpha\beta} \rangle. \end{aligned} \quad (5)$$

где $\langle \theta^o \rangle = \theta - \langle \theta \rangle$ – пульсации случайных функций;

$\langle \dots \rangle$ – оператор статистического осреднения.

Учитывая статистическую независимость θ_{ijmm} , $k(\tau)$ и $\varphi(\xi_{ij}, S)$, получим:

$$\langle \xi_{ij} \rangle = \langle \theta_{ij\alpha\beta} \rangle \left[1 - \int_0^t \langle k(\tau) \rangle \langle \varphi(\xi_{ij}, S) \rangle d\tau \right] \quad (6)$$

В уравнении (2) функция $\varphi(\xi_{ij}, S)$ представлена в виде

$$\varphi(\xi_{ij}, S) = \frac{\omega^{\text{II}}(\xi_{ij}, S)}{d^{\text{II}}V}; \quad (7)$$

где $d^{\text{II}}V$ – структурный элемент второго порядка малости;

$$\omega^{\text{II}}(\xi_{ij}, S) = \{d^{\text{II}}V \text{ с вероятностью } P_1^{\text{II}}(\xi_{ij}, S) \text{ и } 0 \text{ с вероятностью } 0\},$$

где $P_1^{\text{II}}(\xi_{ij}, S)$ – вероятность разрушения элементов микроструктуры.

Плотность распределения функции $\omega^{\text{II}}(\xi_{ij}, S)$ запишется в виде:

$$\Psi(x) = P_1^{\text{II}}(\xi_{ij}, S)\delta(x - d^{\text{II}}V) + (1 - P_1^{\text{II}}(\xi_{ij}, S))\delta(x - 0), \quad (8)$$

где $\delta(x)$ – функции Дирака.

Первый и второй центральный моменты распределений $\omega^{\text{II}}(\xi_{ij}, S)$ запишутся в виде

$$\langle \omega^{\text{II}} \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(x) x dx = P_1^{\text{II}} d^{\text{II}}V, \quad (9)$$

$$\langle (\omega^{\text{II}})^2 \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 \Psi(x) dx = P_1^{\text{II}}(1 - P_1^{\text{II}})(d^{\text{II}}V)^2. \quad (10)$$

В формулах (8) вероятность разрушения элементов микроструктуры определяется:

$$P_1^{\text{II}}(\xi_{ij}, S) = 1 - \int_S \eta(\xi, D_\xi, x) dx, \quad (11)$$

где $\eta(\xi, D_\xi, X)$ – плотность распределения микроструктурных напряжений, D_ξ – дисперсия микроструктурных напряжений.

Функцию $k(t)$ можно задать моментальными функциями в виде

$$\langle k(t) \rangle = A_1 \exp(-A_2 t); \quad (12)$$

$$\langle (k^o(t))^2 \rangle = A_3 \exp(-A_4 t), \quad (13)$$

где A_i ($i = 1, 4$) – постоянные материала, определяемые расчетно-экспериментальным методом по опытам на внутреннюю коррозию.

Для определения дисперсии микроструктурных напряжений задачу (1)...(4) преобразуем к виду:

$$C_{i\alpha\beta\gamma} x_{\beta, \alpha\gamma}^o = -P_{i\alpha, \alpha}, \quad (14)$$

где $P_{i\alpha, \alpha} = \theta_{i\alpha\beta\gamma, \alpha} (1 - \aleph)(e_{\beta\gamma} + \varepsilon_{\beta\gamma}^o) + \theta_{i\alpha\beta\gamma} (1 - \aleph)e_{\beta\gamma, \alpha} + C_{i\alpha\beta\gamma} \varepsilon_{\beta\gamma, \alpha}^o$;

$$\aleph = \int_0^t k(\tau) \varphi(\xi_{ij}, S) d\tau;$$

$$e_{ij} = \langle \varepsilon_{ij} \rangle.$$

Решение задачи (14) относительно пульсаций деформаций находится в виде:

$$\varepsilon_{ij}^o = \phi_{ij\alpha\beta} e_{\alpha\beta}. \quad (15)$$

Функционал $\phi_{ij\alpha\beta}$ в коррекционном приближении находится в виде:

$$\phi_{ijmn} = \frac{1}{2}(\rho_{imn,j} + \rho_{jmn,i}) \quad (16)$$

где

$$\rho_{imn,j} = \int_V G_{i\alpha,\gamma} \theta^o_{\alpha\beta mn,\beta} dV;$$

G_{ij} – тензор Грина для тела V .

Из уравнения (2) находим пульсации микронапряжений

$$\xi_{ij}^o = C_{ij\alpha\beta} (1 - \langle \aleph \rangle) \varepsilon_{\alpha\beta}^o + \theta_{ij\alpha\beta} (1 - \langle \aleph \rangle) (e_{\alpha\beta} + \varepsilon_{\alpha\beta}^o). \quad (17)$$

Дисперсия микроструктурных напряжений с учетом статической независимости θ_{ijmn} и ε_{mn} , θ_{ijmn} , $\varepsilon_{\alpha\beta}$ и \aleph получим:

$$D_{ij}^{mn} = \langle \xi_{ij}^o \xi_{mn}^o \rangle = C_{ij\alpha\beta} \delta_{\alpha\beta} \langle \varepsilon_{\alpha\beta}^o \varepsilon_{\gamma\delta}^o \rangle + [(1 - \langle \aleph \rangle)^2 + \langle (\aleph^o)^2 \rangle] + K_{ij\alpha\beta}^{mn\gamma\delta} (1 - \langle \aleph \rangle)^2 (e_{\alpha\beta} e_{\gamma\delta} + \langle \varepsilon_{\alpha\beta}^o \varepsilon_{\gamma\delta}^o \rangle), \quad (18)$$

где

$$K_{ij\alpha\beta}^{mn\gamma\delta} = \langle \theta_{ij\alpha\beta}^o \theta_{mn\gamma\delta}^o \rangle.$$

В случае распределения микроструктурных напряжений по закону Гаусса, вероятность разрушения элементов второго порядка малости определяется

$$P_1^{\text{II}} = 1 - \int_{-S}^{+S} \frac{1}{\sqrt{2\pi D_{ij}^{mn}}} e^{-\frac{(x - \langle \xi_{ij} \rangle)^2}{2 D_{ij}^{mn}}} dx, \quad (19)$$

где $+S$ и $-S$ – пределы прочности на растяжение и сжатие.

Для определения пределов прочности на момент времени эксплуатации t металлической арматуры необходимо построить расчетным путем кривую деформирования в осях $\langle \xi_{ij} \rangle - e_{mn}$.

С этой целью используется алгоритм, предполагающий жесткие условия деформирования. Задается величина макроскопической деформации e_{ij}^I . Для этой деформации по формулам (6) вычисляется макроскопическое напряжение с учетом формул (19), (7) и (9). Получается первая точка на кривой «напряжение–деформация».

Величине деформации e_{mn}^l задается приращение Δe_{mn} и получается новое значение e_{mn}^i . Значение i задает номер точки на кривой деформирования. Для e_{mn}^i определяется величина $\langle \xi_{mn}^i \rangle$. Сравниваются значения $\langle \xi_{mn}^{i-1} \rangle$ и $\langle \xi_{mn}^i \rangle$. Если значение в точке i больше значения напряжения в точке $(i-1)$, то процесс вычислений продолжается.

Если $\langle \xi_{mn}^{i-1} \rangle > \langle \xi_{mn}^i \rangle$, то значение $\langle \xi_{mn}^{i-1} \rangle$ соответствует пределу прочности металлической арматуры на момент времени t .

Выводы. Построена модель оценки пределов прочности металлической арматуры в строительных конструкциях, эксплуатируемых в условиях агрессивной среды. Модель основана на представлении структуры металла средой класса B_2 , для которой решается статическая задача деформирования микронеоднородной среды с учетом внутренней коррозии.

Литература:

1. Гурский Л.И. Структура и кинетика взаимодействия металла с окисляющими средами / Л.И. Гурский, В.А. Зеленин // Минск: Наука и техника, 1982. – 192 с.
2. Богачев И.Н. Статистическое металловедение / И.Н. Богачев, А.А. Вайнштейн, С.Д. Волков // М.: Металлургия, 1984. – 176 с.

АНОТАЦІЯ

Розглянуто задачу зниження межі міцності металевої арматури в результаті внутрішньої корозії в процесі експлуатації будівельних конструкцій в умовах окисного середовища. Межа міцності металевої арматури визначається чисельним експериментальним шляхом побудови діаграми деформування, визначення точок якої знаходиться з рішення статичної крайової задачі мікромеханіки структурно-неоднорідних середовищ.

Ключові слова: *діаграма, деформування, мікроструктурні деформації і напруження, статистична крайова задача*

ANNOTATION

The problem of reducing the tensile strength of the metal reinforcement as a result of internal corrosion in the operation of building structures under an oxidizing environment. Tensile strength of the metal reinforcement is determined by numerical experiment by constructing diagrams of deformation, which is the definition of the points of the boundary value problem solving static micromechanics of heterogeneous media.

Keywords: *diagram, deformation, microstructural deformation and stress, statistical boundary value problem*