

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ДЕГРАДАЦИОННЫХ ФУНКЦИЙ
ДЛЯ ОЦЕНКИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ
КОНСТРУКЦИЙ, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ
СУЛЬФАТНОЙ КОРРОЗИИ***

Селяев В. П., академик РААСН, д.т.н., проф.,
Низина Т. А., советник РААСН, д.т.н., проф.,
Селяев П. В., к.т.н., доц., **Сорокин Е. В.**, препод.

*Мордовский государственный университет имени Н.П. Огарева,
Саранск, Россия*

Многолетними исследованиями процессов взаимодействия композиционных строительных материалов с агрессивными средами [1–8] установлено, что для теоретического описания процессов деформирования и разрушения, оценки сопротивления композитов можно разработать единую модель деградации, параметры которой можно определить по физико-механическим характеристикам.

Общий вид деградационной функции можно представить выражением:

$$D = B(t) / B(0) = f(t, T, \sigma, c, h, \alpha, a), \quad (1)$$

где t – время; T – температура; σ – напряжение; c – концентрация агрессивной среды; h – геометрическая характеристика; α и a – параметры деградации.

Вид деградационной функции выбирают, исходя из характера распределения агрессивной среды, напряжений по площади поперечного сечения и учитывая связь между различными деградационными функциями:

$$D(N) = f\{D(W)\}; D(M) = f\{D(N)\}; D(M) = f\{D(W)\}. \quad (2)$$

Для выделения основных типов деградации целесообразно представить их в виде феноменологических моделей [1–3]. Феноменологические модели, представляющие эпюры модуля упругости и прочности по высоте поперечного сечения, в зависимости от вида изохрон деградации могут быть линейными и нелинейными, симметричными и несимметричными. В линейных моделях деградации положение изохрон характеризуется двумя параметрами a и α , где a – ордината фронта деструкции, характеризующая скорость деградации под действием напряжений и агрессивной среды; α – характеристика механизма деградации, определяемая как угол наклона прямолинейной изохроны к

оси абсцисс (рис. 1, а). Если угол α – равен нулю, то наблюдается деградация гетерогенного типа, применяемая для материалов, скорость взаимодействия которых с агрессивной средой значительно выше скорости ее переноса в объем элемента. Если угол α равен $\pi/2$, то деградация происходит по гомогенному механизму и характеризуется большой скоростью насыщения материала агрессивной средой и малой скоростью химического взаимодействия. Если скорость насыщения соизмерима со скоростью химического взаимодействия, то наблюдается диффузионный тип деградации и угол α изменяется в пределах от 0 до $\pi/2$.

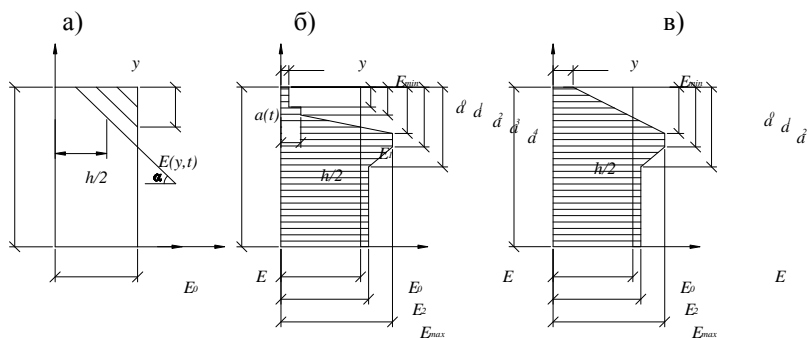


Рис. 1. Феноменологические модели деградации

Для описания деградации цементных композитов в водных растворах серной кислоты малой концентрации из анализа экспериментальных изохрон деградации предлагается модель, представленная на рис. 1, б. Она применима для материалов, у которых на изохроне деградации можно выделить 3 зоны: 1) латентной деградации; 2) активной деструкции; 3) нулевой деградации.

В процессе эксплуатации конструкции в условиях действия агрессивной сред обычно удобнее в качестве параметров деградации использовать глубинный показатель (a) и изменение свойств на поверхности элемента (σ , H , E). Если в качестве упруго-прочностной характеристики принять модуль упругости, то с учетом модели, представленной на рис. 1, в деградационная функция жесткости элемента прямоугольного сечения с размерами $b \times h$ при сжатии ($D(W_c)$) определяется выражением:

$$D(W_c) = \frac{E_2}{E_0} - \frac{E_1}{E_0} \left(\frac{2a_0 - a_1 - a_2}{h} \right) - \frac{E_2}{E_0} \left(\frac{a_3 + a_4}{h} \right) +$$

$$+ 2 \frac{E_{\min} a_0}{E_0 h} - \frac{E_{\max}}{E_0} \left(\frac{a_1 + a_2 - a_3 - a_4}{h} \right). \quad (3)$$

Если $a_0=0$, $a_1=0$, $a_2=a_1$, $a_3=a_1$, $a_4=a_1$, $E_{\max}=E_0$ и $E_2=E_0$, то получаем ступенчатую модель, деградационная функция которой имеет вид:

$$D(W_c) = 1 - 2a_1(1 - E_1/E_0)/h. \quad (4)$$

Если $a_0=0$, $a_1=0$, $a_3=a_2$, $a_4=a_2$, $E_{\max}=E_0$ и $E_2=E_0$, то получаем линейную модель. Деградационная функция для этой модели имеет вид:

$$D(W_c) = 1 - 2a_2(1 - E_1/E_0)/h. \quad (5)$$

Если $a_1=a_0$, $a_2=a_0$, $a_3=a_0$, $a_4=a_0$, $E_{\max}=E_0$, $E_1=E_0$, $E_2=E_0$, $E_{\min}=0$, то имеем модель гетерогенной деградации:

$$D(W_c) = 1 - 2a_0/h. \quad (6)$$

Модель гомогенной деградации также является частным случаем обобщенной модели при $a_0=0$, $a_1=a_2=a_3=a_4=h/2$, $E_{\max}=E_1$, $E_2=E_1$:

$$D(W_c) = E_1/E_0. \quad (7)$$

Функции деградации дают возможность описать изменение несущей способности при сжатии, изгибе, растяжении и жесткости конструктивного элемента или изделия во времени, учитывая при этом размеры поперечного сечения и вид напряженно-деформированного состояния.

Рассмотрим изгибаемый элемент с прямоугольной формой поперечного сечения и одиночной арматурой (например, плита с арматурой в растянутой зоне). Предположим, что деградация бетона плиты вызвана жидкими сульфатными средами, действие которых обусловлено технологической линией, расположенной на вышележащих этажах. Тогда возможные расчетные схемы прочности поперечного сечения, нормального к оси изгибаемого элемента будут иметь вид (рис. 2).

На расчетных схемах показано, что: зона деградации (x_{ij}) находится в пределах сжатой зоны ($x_{ij} \leq x_i$); расчетное сопротивление, модуль деформаций в пределах зоны деградации могут изменяться по различным законам. На рисунке 2 приняты обозначения: R_s , R_b – расчетные сопротивления арматуры и бетона; x_i – высота сжатой зоны; h , h_0 – полная и рабочая высота сечения; A_s – площадь поперечного сечения арматуры; b – ширина поперечного сечения элемента; x_{ij} – высота зоны деградации.

Введем обозначение: $\zeta_0 = x/h_0$; $\zeta_{ij} = x_{ij}/h_0$; $\mu = A_s/bh_0$. Тогда условие прочности можно записать в виде неравенства:

$$M \leq M_{ui}, \quad (8)$$

где M_{ui} – момент воспринимаемый сечением и определяемый по соответствующей расчетной модели $i=0, 1, 2, 3, 4$.

Для расчетной модели при $i=0$ можно записать:

$$M_{u0} = R_b b x_0 (h_0 - 0,5x_0), \quad (9)$$

так как $R_b b x_0 = R_s A_s$, то обозначив $\xi_0 = x_0/h_0$, получим $\xi_0 = \mu(R_s/R_b)$. Тогда формула примет вид:

$$M_{u0} = \xi_0 (1 - 0,5\xi_0) R_b b h_0^2 = \alpha_m R_b b h_0^2. \quad (10)$$

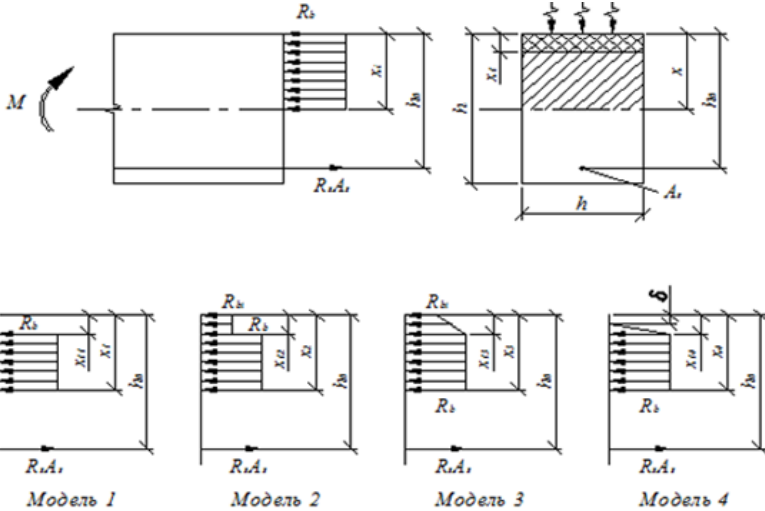


Рис. 2. К расчету изгибаемого элемента

Рассмотрим расчетную модель 1, анализ которой дает возможность получить два уравнения:

$$M_{u1} = R_b b (x_1 - x_{11}) [h_0 - 0,5(x_1 - x_{11}) - x_{11}], \quad (11)$$

$$R_b b (x_1 - x_{11}) = R_s A_s. \quad (12)$$

Так как $\frac{x_1}{h_0} = \xi_1$; $\frac{x_{11}}{h_0} = \xi_{11}$; $\frac{R_s}{R_b} \mu = \xi_0$, то $\xi_0 = \xi_1 - \xi_{11}$.

С учетом сделанных преобразований получаем формулу определения M_{u1} в следующем виде:

$$M_{u1} = M_{u0} \left(1 - \frac{\xi_{11}}{1 - 0,5\xi_0} \right). \quad (13)$$

Для расчетной модели 2, решая совместно уравнения, определяющие M_{u2} и ξ_2 , получаем:

$$M_{u2} = M_{u0} \left(1 - \frac{\xi_{12}(1 - R_{b2}/R_b)}{1 - 0,5\xi_0} + \frac{0,5\xi_{12}^2 R_{b2}/R_{b0}(1 - R_{b2}/R_{b0})}{\xi_0(1 - 0,5\xi_0)} \right), \quad (14)$$

$$\xi_0 = \xi_2 - \xi_{12}(1 - R_{b2}/R_b).$$

Анализ модели 3 позволяет получить следующее выражение для определения прочности нормальных сечений:

$$M_{u3} = M_{u0} \left(1 - \frac{0,5\xi_{13}(1 - R_{b3}/R_b)}{1 - 0,5\xi_0} + \frac{\xi_{13}^2(1 - R_{b3}/R_b) \left[0,125(1 - R_{b3}/R_b) - \frac{1}{6} \right]}{\xi_0(1 - 0,5\xi_0)} \right), \quad (15)$$

$$\xi_0 = \xi_3 - 0,5\xi_{13}(1 - R_{b3}/R_b) = \frac{R_s}{R_b} \mu. \quad (16)$$

Четвертая модель дает возможность получить формулу для определения M_{u4} вида:

$$M_{u4} = M_{u0} \left(1 - \frac{(\xi_{14} + \delta/h_0)0,5}{1 - 0,5\xi_0} + \frac{(0,5\xi_{14} + 0,5\delta/h_0)^2 \frac{1}{6} - \frac{1}{3}\xi_{14}^2 \delta/h_0}{\xi_0(1 - 0,5\xi_0)} \right), \quad (17)$$

$$\xi_0 = \xi_4 - 0,5\xi_{14} - 0,5\delta/h_0 = \frac{R_s}{R_b} \mu. \quad (18)$$

Полученные выражения M_{ui} дают возможность определить деградационные функции. Действие агрессивной среды в расчетных моделях учитывается: относительным изменением прочности слоев бетона R_{bi}/R_b , контактирующих с агрессивной средой; координатой границы области деградации ξ_{ij} ; видом изохрон деградации.

На рисунке 3 показаны графики изменения величины $K_{x.c.} = R_{bi}/R_b$ во времени. Из анализа графиков следует, что прочность бетона, контактирующего с агрессивной средой, после 150 суток воздействия приближается к нулю. Следовательно эффект латентной деградации, временное повышение прочности бетона в зоне контакта с сульфатной средой при оценке долговечности железобетонных конструкций можно не учитывать. Из анализа изохрон деградации предлагается изменение относительной прочности бетона внешних слоев оценивать функцией вида:

$$K_{x.c.} = \frac{K_a}{t/t_a}, \quad (19)$$

где t_a – длительность воздействия среды, после которого наступает необратимое ухудшение свойств; K_a – величина коэффициента $K_{x.c.}$ при $t=t_a$, определяемая по графику на рис. 3.

Доказано (рис. 4), что предлагаемая аппроксимация адекватно отображает экспериментальные данные. Экспериментально установле-

но, что после 150-200 суток экспонирования цементного бетона в водном растворе, содержащем сульфат-ионы, его прочность снижается и составляет 10-15% от первоначальной (рис. 4). Следовательно, оценивая долговечность железобетонных конструкций, нормативный срок эксплуатации которых составляет несколько десятков лет, в моделях деградации можно принять $R_{bt}/R_b=0$.

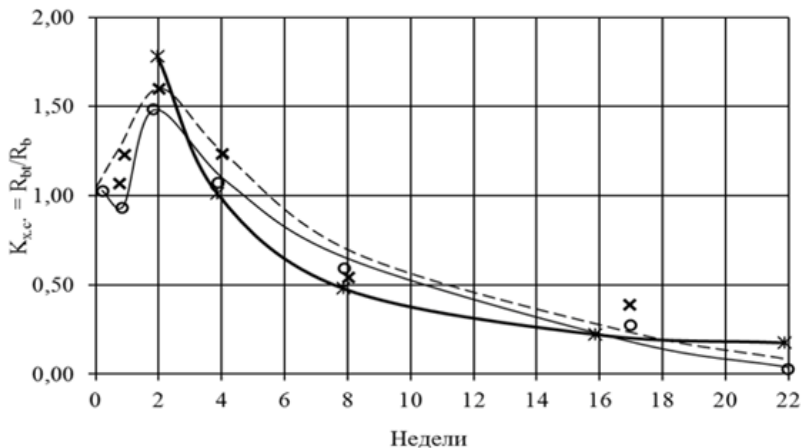


Рис. 3. Изменение $K_{x.c.} = R_{bt}/R_b$ во времени

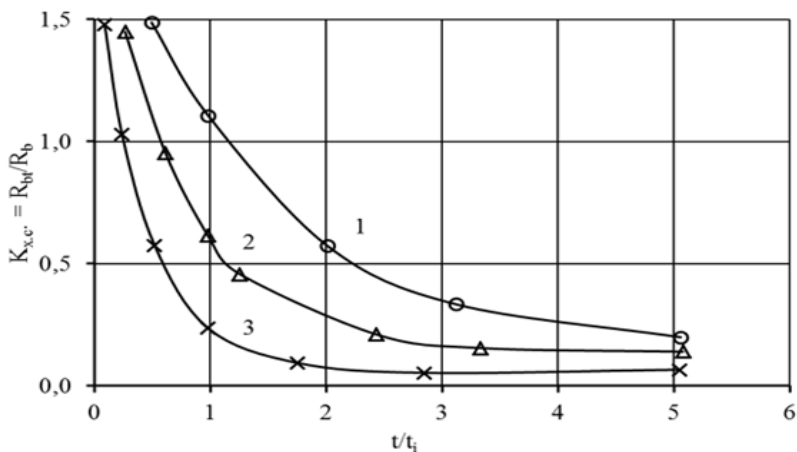


Рис. 4. Аппроксимация экспериментальных данных

Выводы

1. Основными параметрами деградации являются: координата фронта области деградации (глубинный показатель), коэффициент химического сопротивления внешних слоев бетона действию агрессивных сред и вид изохрон деградации;

2. Параметры деградации можно определить экспериментально-теоретическим методом по изохронам деградации;

3. При оценке долговечности железобетонного элемента можно не учитывать этап латентной деградации и использовать в расчетах линейные модели деградации.

Summary

The article shows the possibility of using degradation functions to evaluate the durability of reinforced concrete structures, operating in sulfate corrosion conditions. Identified the main parameters of degradation.

Литература

1. Соломатов В. И. Химическое сопротивление композиционных строительных материалов / В. И. Соломатов, В. П. Селяев. М. : Стройиздат, 1987. 264 с.

2. Химическое сопротивление и долговечность строительных материалов, изделий, конструкций : учеб. пособие / В.П. Селяев, Т.А. Низина, В.Н. Уткина. Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2003. 48 с.

3. Соломатов В.И. Химическое сопротивление материалов / В.И. Соломатов, В.П. Селяев, Ю.А. Соколова. М: РААСН, 2001. 284 с.

4. Низина Т.А. Защитно-декоративные покрытия на основе эпоксидных и акриловых связующих / Т.А. Низина. Саранск : Изд-во Мордов. Ун-та, 2007. 260 с.

5. Селяев В.П. Модели деградации строительных композиционных материалов / В.П. Селяев, Т.А. Низина // Предотвращение аварий зда-

ний и сооружений : межвуз. Сб. науч. Работ. Магнитогорск, 2002. С. 192-201.

6. Селяев В.П. Методика оценки долговечности строительных материалов и конструкций методом деградационных функций / В.П. Селяев, Т.А. Низина // Надежность и долговечность строительных материалов, конструкций и оснований фундаментов: материалы IV Междунар. науч.-техн. конф. в 4-х ч. – ВолгГАСу. Волгоград, 2005, ч.II. С.125-130.

7. Селяев, В.П. Химическое сопротивление наполненных цементных композитов / В.П. Селяев, В.И. Соломатов, Л.М. Ошкина // Рос. акад. архитектуры и строит. наук. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2001. 150 с.

8. Селяев В.П. Исследование химической стойкости цементных бетонов с учетом сульфатной коррозии / В.П. Селяев, Л.М. Ошкина, П.В. Селяев, Е.В. Сорокин // Региональная архитектура и строительство. 2013. №1 . С. 4–11.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 13-08-97172.