

РАСЧЕТ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В. П. Селяев

Представлены модели для оценки долговечности железобетонных конструкций, работающих в условиях действия агрессивных сред. Предложены дополнительные показатели качества для бетона и арматуры, которые необходимо нормировать при расчете долговечности. Показано, что в общем случае вид модели деградации изделия не зависит от вида энергии разрушения.

Долговечность — один из важнейших показателей качества строительных конструкций. Считалось, что бетонные и железобетонные конструкции имеют неограниченную долговечность; более того, прочность бетона конструкции, следовательно, долговечность со временем увеличивается. Однако данные обследований показывают, что из-за меняющихся условий эксплуатации и нарушения технологических процессов железобетонные конструкции, запроектированные без учета требований долговечности, могут прийти в аварийное состояние в течение 5—10 лет и ранее. Известны примеры, когда железобетонные конструкции разрушались через 10 лет, а иногда через 3 года [1].

Практика эксплуатации показывает, что каждое изделие и конструкция имеют определенную долговечность, которую необходимо уметь рассчитывать. Однако до сих пор нет теоретических методов вычислений, оценки и прогнозирования долговечности строительных конструкций, работающих при совместном действии силовых факторов и агрессивных сред. В пункте 6.1.2 СНиП 52-01-2003 «Бетонные и железобетонные конструкции: основные положения» сформулировано требование: «Расчет бетонных и железобетонных конструкций по долговечности (исходя из расчетов по предельным состояниям первой и второй групп) следует производить из условия, по которому при заданных характеристиках конструкции (размерах, количестве, арматуре и других характеристиках), показателях качества бетона (прочность, морозостойкости, водонепроницаемости, коррозионной стойкости, температуростойкости и других показателях) и арматуры (прочности, коррозионной

стойкости и других показателях) с учетом влияния окружающей среды продолжительность межремонтного периода и срока службы конструкций здания или сооружения должна быть не менее установленной для конкретных типов зданий и сооружений». Однако не предложены расчетные модели, учитывающие деградацию бетона и арматуры при эксплуатации конструкций в агрессивных средах, не определены показатели качества бетона и арматуры, необходимые для этих расчетов. Поэтому проблема расчета долговечности бетонных и железобетонных конструкций является актуальной и требует незамедлительного разрешения.

В работе предпринята попытка предложить модели для оценки долговечности железобетонных конструкций при действии химически активных сред. На основании анализа расчетных моделей предложены дополнительные показатели качества бетона и арматуры, которые необходимо нормировать. Показано, что в общем случае модель деградации может быть единой, независимой от вида энергии, вызывающей деградацию.

Виды деградации бетонных и железобетонных конструкций. Деградация — процесс ухудшения эксплуатационных показателей качества строительных материалов и конструкций, интенсивность которого связана с действием силовых факторов, физических полей, химических веществ, живых организмов. Предельным состоянием деградации бетона, изделия или конструкции является разрушение. Поэтому можно считать, что деградация — это процесс разрушения материала.

На данном этапе развития теории деградации предложена нижеследующая классифи-

кация по виду агрессивного воздействия [16; 18; 19].

Физическая деградация — процесс ухудшения свойств изделий под действием полей (силовых, электрических, магнитных, температурных) и излучений.

Химическая деградация происходит под действием химически активных веществ — твердых, жидких или газообразных.

Биологическая деградация — разрушение, интенсивность которого связана с жизнедеятельностью живых организмов. Количество агрессивного вещества, его концентрация в жидкой или газовой среде определяется в данном случае биологическим процессом.

С энергетической точки зрения, ухудшение свойств и разрушение материалов и конструкций происходит под действием энергии, прикладываемой к материалу. Вид энергии (механической, физической, химической или биологической) может быть любым.

Независимо от вида энергии, природы разрушающего воздействия на материал можно выделить несколько механизмов деградации [16; 18; 19].

Первый механизм деградации характеризуется развитием процессов разрушения на границе раздела материала и агрессивной среды. Подобный механизм деградации назван **гетерогенным** и наблюдается при механическом (ударном) повреждении верхних слоев элементов железобетонных конструкций; протекании химического взаимодействия агрессивной среды с реакционно способными компонентами бетона на поверхности контакта среды и изделия; физических биоповреждениях; одностороннем действии высоких, очень низких или знакопеременных температур.

Второй механизм деградации характеризуется равномерным развитием процессов разрушения по всему объему материала. Этот механизм назван **гомогенным**. Наблюдается при равномерном по объему накоплении микрповреждений от силовых факторов (циклическое, длительное нагружение сжатых, растянутых элементов); химически активной среды, равномерно распределенной по объему материала, отрицательных или положительных температур, равных в любой точке объема; излучений (рентгеновских, магнитных, радиационных и т. д.).

Третий механизм деградации характеризуется неравномерным по объему накоплением повреждений. Он условно назван **диффузионным** и может проявляться при одностороннем действии температур, агрессивных сред, неравномерном распределении механических напряжений.

Подобие механизмов деградации при различных видах воздействия свидетельствует о единой природе разрушения материала на микроуровне и дает возможность создать общие модели, которые позволяют прогнозировать долговечность бетонных и железобетонных конструкций при различных видах энергетического воздействия.

Очевидно, каждый вид деградации может быть описан какой-либо моделью деградации. Для выбора модели деградации необходимо учитывать особенности взаимодействия агрессивной среды с бетоном в изделии, арматурой, а также знать, какие изменения происходят в бетоне под действием агрессивной среды; изменение каких показателей следует контролировать для аналитического описания процесса деградации изделия или конструкции.

Взаимодействие агрессивной среды с бетоном и основные показатели химического сопротивления. Длительное действие агрессивных сред на бетон сопровождается ухудшением (деградацией) структуры и свойств материала. При этом визуально и инструментально можно выделить следующие явления: изменение прочности, жесткости, набухание, пластифицирование или охрупчивание композита, уменьшение концентрации одних структурообразующих компонентов и накопление других, изменение показателей поровой структуры, изменение цвета, размеров, веса образцов [6; 15; 16; 18; 19].

Из многообразия проявлений взаимодействия материала с агрессивной средой следует выделить два основных процесса: перенос агрессивной среды в объем материала и изменение упруго-прочностных показателей качества бетона в зоне деградации. По мнению С. Н. Алексеева, Ю. М. Баженова и В. М. Москвина [1; 4; 10], скорость и полнота коррозионных процессов в бетоне под действием жидких и газообразных сред в значительной степени зависят от скорости переноса среды в объем изделия и определяются первым законом Фика:

$$j = -D (dc / dx), \quad (1)$$

где j — диффузионный поток, т. е. количество вещества, проходящего через единицу площади в единицу времени; dc / dx — градиент концентрации вещества в растворе; D — коэффициент диффузии агрессивной среды.

В том случае, когда количество вещества, поступающего извне вглубь материала, не соответствует количеству отводимого вещества, для описания процесса изменения концентрации агрессивной среды по толщине изделия используют второй закон Фика:

$$\frac{dc}{dt} = D(d^2c / dx^2), \quad (2)$$

где t — длительность действия агрессивной среды на бетон.

При наличии градиента гидростатического давления скорость подвода агрессивной среды и отвода продуктов описывается уравнением Дарси:

$$\frac{dQ}{dt} = -D_\phi \frac{\Delta P}{\Delta e}, \quad (3)$$

где D_ϕ — коэффициент фильтрации; ΔP — перепад давления на единицу длины; Q — количество фильтра.

С учетом капиллярно-пористого строения структуры бетона предложено [13] процесс переноса агрессивной среды вглубь изделия описывать уравнением вида:

$$\Pi(1-\omega) \frac{\partial c}{\partial t} = D_s \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - K_1 S_1 C, \quad (4)$$

где Π — пористость бетона; ω — доля пор, заполненных водой; C — концентрация агрессивного компонента; D_s — эффективный коэффициент диффузии; K_1 — константа скорости растворения агрессивного компонента в поровой жидкости бетона; S_1 — поверхность раздела агрессивной среды и поровой жидкости; t — время; x — координата, направленная от поверхности изделия вглубь бетона.

Для описания процесса влагопередачи через элементарный объем капиллярно-пористого тела С. В. Александровским [2] предложено дифференциальное уравнение теплопроводности бетона следующего вида:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \nabla^2 C - \frac{1}{\gamma} \frac{\partial H}{\partial t},$$

где C — влажность материала на поверхности; γ — плотность материала; H — функция гидратации бетона, определяющая собой количество химически связываемой влаги (кг) при гидратации цемента в единице объема бетона (м^3).

Решения приведенных уравнений переноса (1—4) дают возможность определить координату продвижения агрессивной среды в бетон, следовательно, и ширину зоны, в которой происходит взаимодействие агрессивных компонентов среды с реакционноспособными компонентами бетона. Это одна из важнейших характеристик в теории сопротивления материалов агрессивным воздействиям. В литературе ее часто называют глубинным показателем [9].

В общем случае глубинный показатель a определяется формулой вида:

$$a = \kappa \cdot t^\gamma, \quad (5)$$

где κ — константа скорости деградации; для неагрессивной среды. А. И. Минас предлагает [9] принимать ее равной 0,1 мм в год; γ — показатель степени, который может быть меньше, равным или больше единицы. Теоретически показатель γ получается равным 0,5 [16; 18; 19].

При диффузионном переносе среды предлагается [18] константу κ определять по формуле вида:

$$\kappa = \kappa(\xi) \sqrt{D}, \quad (6)$$

где $\kappa(\xi)$ — коэффициент, величина которого зависит от точности инструментального определения изменения прочности бетона в зоне деградации.

Большинство исследователей считают, что зависимость типа 5 хорошо описывает изменение глубинного показателя при действии солей хлора. Предлагается значения констант κ и γ принимать равными соответственно $\kappa = (3,3 \div 4,1)$; $\gamma = (0,45 \div 0,55)$ [3].

В ряде литературных источников для определения координаты фронта карбонизации предлагается принять линейный закон изменения агрессивной среды от C_0 на поверхности бетона до фронта химического взаимодействия и константу k определять по формуле:

$$\kappa = \sqrt{2D C_0 / m_0}, \quad (7)$$

где m_0 — концентрация гидроксида кальция в объеме цементного камня; C_0 — концентрация углекислого газа; D — эффективный коэффициент диффузии.

Финские исследователи [3] при определении глубины карбонизации подтверждают возможность применения формулы (7), но уточняют ее поправкой Бейкера, которая учи-

тывает эффективную длительность $t_{эф}$ процесса карбонизации:

$$t_{эф} = \sum_{i=1}^n t_{di} - \sum_{i=2}^n \left(\frac{x_{i-1}}{B} \right)^2, \quad (8)$$

где $B = \left[\frac{2D'(C_1 - C_2)}{\epsilon} \right]^{0.5}$, x_n — глубина карбонизации после n -го цикла увлажнения высыхания; t_{di} — продолжительность i -го периода с условиями, благоприятными для развития процесса карбонизации; C_1 , C_2 — соответственно влажность воздуха на поверхности изделия и объеме пор; ϵ — количество влаги в парах. Поправка Бейкера позволяет учитывать те периоды, когда процесс карбонизации приостанавливается.

Хаккиненом [3] на основании экспериментального исследования глубины карбонизации предложено константу скорости деградации κ определять зависимостью вида:

$$\kappa = C_{env} C_{air} a B^a, \quad (9)$$

где C_{env} — коэффициент, характеризующий окружающую среду, принимаемый равным 1 и 0,5 для конструкций, соответственно закрытых от дождя и открытых; C_{air} — коэффициент, учитывающий воздухообмен, равный (1÷0,7); B — класс бетона; a , b — параметры, зависящие от вида наполнителя.

Паррот [3] предложил глубину карбонизации определять на основе кислородной проницаемости бетона. Выражение для определения κ имеет вид:

$$\kappa = \frac{64 \Pi^{0.4}}{m_0^{0.5}}, \quad (10)$$

где Π — проницаемость бетона для кислорода при 60 % относительной влажности; m_0 — концентрация гидроксида кальция в объеме цементного камня.

Де Ситтер и Киштитиани [3] предложили для определения глубины карбонизации константу κ определять в зависимости от B / α по формулам типа:

$$\begin{aligned} \text{при } B / \alpha > 0,6; \kappa &= 26 (B / \alpha - 0,3)^2 + 1,6; \\ \text{при } B / \alpha < 0,65; \kappa &= (46 B / \alpha - 17,6) / 2,7. \end{aligned} \quad (11)$$

При гидростатическом давлении процесс переноса среды происходит преимущественно за счет фильтрации; предложено константу κ определять по формуле вида:

$$\kappa = \sqrt{2D_{\phi} P_0 \eta}, \quad (12)$$

где η — вязкость жидкости.

При переносе жидкости за счет капиллярного всасывания предлагается [18] κ определять по формуле:

$$\kappa = \sqrt{2\sigma \cos \Theta / 2\eta}. \quad (13)$$

При сочетании внешнего давления и капиллярных сил для определения κ имеем:

$$\kappa = \frac{r}{2\eta} \sqrt{P_0 + \frac{2\sigma \cos \Theta}{r}}, \quad (14)$$

где r — радиус капилляра; σ — поверхностное натяжение; Θ — угол смачивания.

В. М. Бондаренко и В. И. Колчуновым предложено [5] глубинный показатель определять на основе энтропийной модели Гульдберга — Вааге зависимостью вида:

$$a = a_0 (1 - e^{-2t}),$$

где a_0 — предельная величина глубины повреждения; a — некоторая эмпирическая характеристика скорости, зависящая от вида среды бетона.

Экспериментальные исследования изменения глубинного показателя от длительности действия агрессивной среды на бетон проводились методом микротвердости. Методика исследований и полученные экспериментальные данные описаны в работах ученых кафедры строительных конструкций Мордовского государственного университета [1—3; 8; 16—19].

Впервые получены данные, которые показывают, как продвигается под действием агрессивных сред граница области разрушения вглубь объема образца (рис. 1).

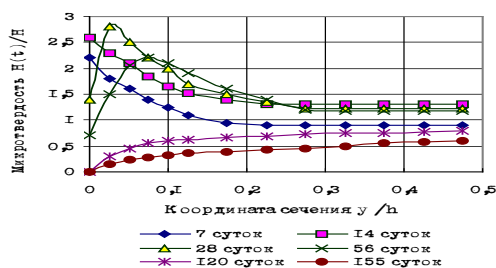


Рисунок 1

Изменение микротвердости цементного камня (наполнение — шлак) в 2 % растворе H_2SO_4

Анализ экспериментальных данных подтверждает, что зависимость (5) при $\gamma = 0,5$ с достаточной точностью описывает кинетику изменения глубинного показателя.

Второй важной характеристикой химического сопротивления бетонов является показатель интенсивности химического взаимодействия агрессивной среды с бетоном. В наших

работах предложено показатель интенсивности химического взаимодействия определять методом микротвердости. Относительное изменение микротвердости бетона под действием агрессивной среды дает возможность оценить изменение свойств материала в микрообъеме, проследить изменение свойств по высоте поперечного сечения образца. Существует прямая корреляционная зависимость между прочностью, модулем деформаций и микротвердостью.

Химическое взаимодействие среды и бетона происходит между реакционноспособными группами. Скорость распада химических связей под действием агрессивной среды описывается функцией вида:

$$\frac{dc}{dt} = -k_x c_s^m c_c^n, \quad (15)$$

где c_c и c_s — концентрация реакционноспособных компонентов в среде и материале; k_x — константа химической активности.

Если предположить, что показатели n и m в уравнении (15) равны единице и перенос среды обеспечивает концентрацию среды c_c на одном уровне, то, решая уравнение (15) относительно c_s , получаем функцию изменения во времени в виде:

$$c_s = c_{s0} \exp\{-k_x c_c t\}. \quad (16)$$

Предполагая, что работоспособная площадь A_s поперечного сечения в бетоне пропорциональна концентрации реакционноспособных связей C_s , можно записать:

$$A_s = A_{s0} \exp\{-k_x c_c t\}. \quad (17)$$

Тогда предел прочности σ_s и модуль упругости бетона E_s можно определить по формулам:

$$\begin{aligned} R_s(t) &= R_{s0} \exp\{-k_x c_c t\}; \\ E_s(t) &= E_{s0} \exp\{-k_x c_c t\}. \end{aligned} \quad (18)$$

Экспериментальные данные, полученные путем измерений микротвердости, подтвердили возможность достоверного описания изменения предела прочности и модуля упругости экспоненциальными функциями вида (18).

С учетом выражения (18) коэффициент химической стойкости будет иметь вид:

$$\kappa_{xc} = \frac{R_{s(t)}}{R_{s0}} = \exp\{-k_x c_c t\}. \quad (19)$$

Экспоненциальная зависимость коэффициента химической стойкости от длительности действия среды была впервые экспериментально обоснована в работах И. Е. Пуляева [20]. В наших работах предлагается коэффициент хи-

мической стойкости заменить на коэффициент химической активности κ_{xa} , под которым понимается относительное изменение предела прочности, определенное методом микротвердости для микрообъема на поверхности образца из условия $\kappa_{xc} + \kappa_{xa} = 1$. На основании анализа перколяционной модели твердого тела [17] для описания изменений коэффициента стойкости и активности во времени предложена функция вида:

$$\kappa_{xc} = 1 - \alpha t^b, \kappa_{xa} = 1 - \kappa_{xc} = \alpha t^b. \quad (20)$$

Анализ литературных данных показывает, что для описания изменения относительной прочности во времени можно использовать как экспоненциальную (19) зависимость, так и степенную (20). Но в каждом конкретном случае необходимо проверять, какая из них предпочтительнее. Так, обработка экспериментальных данных, приведенных в ГОСТе 25881-83, показывает, что степенная функция в данном случае более точно описывает результаты эксперимента.

Представленные показатели химического сопротивления a и κ_{xa} дают возможность рассчитывать долговечность изделий из бетонов, работающих в агрессивных средах. При этом модель деградации строится с учетом изохрон деградации, определенных экспериментально [16; 18; 19].

Модели деградации для прогнозирования долговечности бетонных изделий. Каждому механизму деградации соответствуют определенные модели деградации. Общий вид деградационной функции можно представить выражением:

$$D = B(t) / B(0) = f(t, T, \sigma, c, h, a, \alpha), \quad (21)$$

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

Для элементов конструкций, работающих на осевое сжатие или растяжение, деградационные функции жесткости и несущей способности равны:

$$D(W_c) = \iint_{F(t)} E(t, y, x) dx dy / \iint_{F(0)} E(t_0, y, x) dx dy; \quad (22)$$

$$D(N_p) = \iint_{F(t)} \varepsilon(t, x, y) E(t, y, x) dx dy / \iint_{F(0)} \varepsilon(t_0, x, y) E(t_0, y, x) dx dy; \quad (23)$$

$$D(N) = \iint_{F(t)} \sigma(t, y, x) dx dy / \iint_{F(0)} \sigma(t_0, y, x) dx dy. \quad (24)$$

Для изгибаемых элементов деградационные функции жесткости и несущей способности имеют вид:

$$D(Wu) = \iint_{F(t)} E(t, y, x) y^2 dx dy / \iint_{F(0)} E(t_0, y, x) y^2 dx dy; \quad (25)$$

$$D(M_p) = \iint_{F(t)} \varepsilon(t, x, y) E(t, y, x) y dx dy / \iint_{F(0)} \varepsilon(t_0, x, y) E(t_0, y, x) y dx dy; \quad (26)$$

$$D(M) = \iint_{F(t)} \sigma(t, y, x) y dx dy / \iint_{F(0)} \sigma(t_0, y, x) y dx dy. \quad (27)$$

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

$$D(N) = f\{D(W)\}; D(M) = f\{D(N)\}; \quad (28)$$

$$D(M) = f\{D(W)\}.$$

Предлагается [18] выделить основные типы деградации и представить их в виде феноменологических моделей. Феноменологические модели, представляющие собой эпюры модуля упругости или 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 α и a , 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. 2 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 химических взаимодействий, то наблюдается диффузионный тип деградации и угол α изменяется в пределах от 0 до $\pi/2$.

Для описания деградации цементных композитов в кислых растворах малой концентрации в работе [17] предлагается модель, представленная на рис. 2 в. Она применима для материалов, у которых на изохроне деградации можно выделить три зоны: 1) деструкции; 2) латентной деградации; 3) естественного твердения.

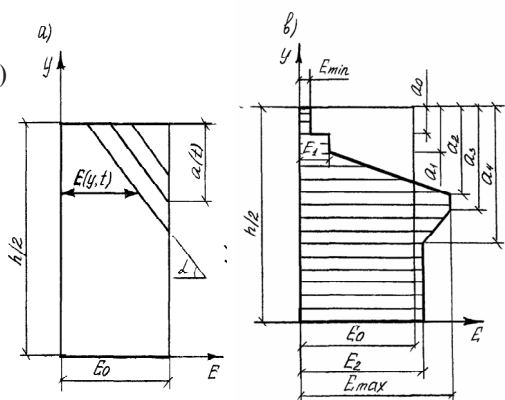


Рисунок 2

Феноменологические модели деградации

В процессе эксплуатации конструкции в условиях действия агрессивных 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. 2 в, закон изменения E по высоте поперечного сечения h имеет вид:

$$E(y) = E_{\min} \text{ при } (h/2 - a_0) \leq y \leq h/2;$$

$$E(y) = E_1 \text{ при } (h/2 - a_1) \leq y \leq (h/2 - a_0);$$

$$E(y) = E_1 + (E_{\max} - E_1) \frac{h/2 - a_1 - y}{a_2 - a_1} \text{ при } (h/2 - a_2) \leq y \leq (h/2 - a_1);$$

$$E(y) = E_{\max} \text{ при } (h/2 - a_3) \leq y \leq (h/2 - a_2); \quad (29)$$

$$E(y) = E_{\max} - (E_{\max} - E_2) \frac{h/2 - a_3 - y}{a_4 - a_3} \text{ при } (h/2 - a_4) \leq y \leq (h/2 - a_3);$$

$$E(y) = E_2 \text{ при } 0 \leq y \leq (h/2 - a_4).$$

Деградационная функция жесткости элемента прямоугольного сечения с размерами $b \times h$ при сжатии ($D(W_c)$) определяется выражением:

$$D(W_c) = \frac{W_c(t)}{W_o(t)} = 2 \int_0^{h/2} E(y) b dy / (E_o b h). \quad (30)$$

Интегрируя (30), с учетом (29) получаем:

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

$$+ 2 \frac{E_{\min} a_0}{E_o h} - \frac{E_{\max}}{E_o} \left(\frac{a_1 + a_2 - a_3 - a_4}{h} \right). \quad (31)$$

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

$$D(W_c) = 1 - 2a_1 (1 - E_1 / E_0) / h. \quad (32)$$

Принимая $a_0 = 0$, $a_1 = 0$, $a_3 = a_2$, $a_4 = a_2$, $E_{max} = E_0$ и $E_2 = E_0$, получаем линейную модель, представленную на рис. 2 а. Деградационная функция для этой модели имеет вид:

$$D(W_c) = 1 - a_2 (1 - E_1 / E_0) / h. \quad (33)$$

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

$$D(W_c) = 1 - 2a_0 / h. \quad (34)$$

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

$$D(W_c) = E_i / E_0. \quad (35)$$

Функции деградации дают возможность описать изменение несущей способности при сжатии, изгибе, растяжении и жесткости конструктивного элемента или изделия во времени. Переменные во времени являются параметры a_i и E_i , входящие в деградационные функции. Функции деградации учитывают влияние на долговечность размеров поперечного сечения, вида напряженно-деформированного состояния.

Функции деградации могут быть выражены через одну базовую деградационную функцию, определение которой наиболее доступно и достоверно. Параметры деградации a_i и E_i могут определяться экспериментально или теоретически.

Применение метода деградационных функций для оценки долговечности железобетонных конструкций. Прогнозирование долговечности железобетонных конструкций предлагается производить с применением метода деградационных функций [17]. В качестве примера 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 агрессивными 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. 3).

На расчетных схемах показано, что зона деградации (x_1) находится в пределах сжатой зоны ($x_1 \leq x$); расчетное сопротивление, модуль деформации в пределах зоны деградации могут изменяться по различным законам.

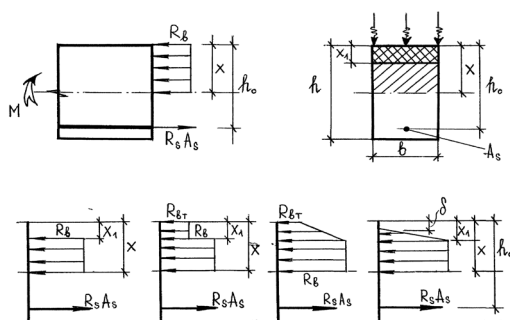


Рисунок 3

Расчетные схемы нормального сечения изгибаемого элемента

На рис. 3 приняты обозначения: R_s , R_b — расчетные сопротивления арматуры и бетона; x — высота сжатой зоны; h , h_0 — полная и рабочая высота сечения; A_s — площадь поперечного сечения; b — ширина поперечного сечения элемента; x_1 — высота зоны деградации.

Введем обозначения: $\xi = x / h_0$; $\xi_{11} = x_1 / h_0$; $\alpha_{mt} = \xi (1 - 0,5 \xi)$; $\mu = A_s / b h_0$. Тогда условие прочности можно записать в виде неравенства:

$$M \leq (\alpha_{mt} - \alpha_{mti}) R_b b h_0^2. \quad (36)$$

Выражения для определения ξ и α_{mt} , соответствующие данной расчетной схеме, приведены в табл.

Обозначим выражение в правой части неравенства (36) как M_{ui} , где i — номер расчетной схемы. Тогда отношение M_{ui} / M_{u0} будет показывать относительные изменения несущей способности нормального поперечного сечения изгибаемого элемента под совместным действием силовых факторов и агрессивной среды. Так, например, делением функции M_{ui} и M_{u2} на функцию M_{u0} получаем:

$$D(M_1) = \frac{M_{u1}}{M_{u0}} = 1 - \frac{\xi_{11}}{1 - 0,5 \xi_{11}} \frac{R_s}{R_b \mu} = 1 - \frac{\xi_{11}}{1 - 0,5 \xi_{11}}; \quad (37)$$

$$D(M_2) = \frac{M_{u2}}{M_{u0}} = 1 - \frac{\xi_{11} (1 - R_s / R_b)}{1 - 0,5 \xi_{11} R_s / R_b \mu} + \frac{0,5 \xi_{11}^2 R_s / R_b (1 - R_s / R_b)}{R_s / R_b \mu (1 - 0,5 \xi_{11} R_s / R_b \mu)}. \quad (38)$$

Выражения в правой части формул (37) и (38) являются деградационными функциями $D(M)$, несущей способности изгибаемых элементов с одиночной арматурой. Тогда момент, воспринимаемый сечением изгибаемого элемента, через деградационную функцию можно записать в виде:

$$M_{ui} = D(M)_i M_{u0}. \quad (39)$$

Таблица
Выражения для определения ξ и α_{mti}

Расчетная схема i	Параметр		
	α_{mti}	$\xi_i = x / h_0 \leq \xi_R$	D_i
0	0	$\xi_0 = \frac{R_s}{R_b} \mu$	1
1	$\xi_1 (1 - 0,5 \xi_{11})$	$\xi_0 + \xi_{11}$	$1 - \frac{\xi_{11}}{1 - 0,5 \xi_0}$
2	$\left(1 - \frac{R_{bt}}{R_b}\right) \xi_{11} (1 - 0,5 \xi_{11})$	$\xi_0 + \xi_{11} \left(1 - \frac{R_{bt}}{R_b}\right)$	$1 - \frac{\xi_{11} \left(1 - \frac{R_{bt}}{R_b}\right)}{1 - 0,5 \xi_0}$
3	$0,5 \left(1 - \frac{R_{bt}}{R_b}\right) \xi_{11} \left(1 - \frac{1}{3} \xi_{11}\right)$	$\xi_0 + \xi_{11} \left(1 - \frac{R_{bt}}{R_b}\right)$	$1 - \frac{0,5 \xi_{11} \left(1 - \frac{R_{bt}}{R_b}\right)}{1 - 0,5 \xi_0}$
4	—	$\xi_0 + 0,5 (\xi_{11} + \xi_b)$	$1 - \frac{\xi_{11} \left(1 - \frac{R_{bt}}{R_b}\right)}{1 - 0,5 \xi_0}$

В формулах (37) и (38) величины двух параметров ξ_{11} и R_{bt} зависят от длительности действия агрессивной среды.

Относительную высоту зоны деградации можно определить, если известна марка бетона по водонепроницаемости. ГОСТом 12730.5-84 допускается марку бетона по водонепроницаемости определять по коэффициенту фильтрации — K_ϕ , величина которого нормируется и является оценкой скорости переноса жидкости в пористом материале.

Координата x_i определяет границы зоны деградации. Но, как следует из экспериментальных данных, свойства материала в этой области могут изменяться неравномерно. Формулами (37) и (38) рассматриваются предельные и наиболее простые случаи. Формула (37) получена из предположения, что бетон в деградированной зоне не работает, а формулу (38) можно записать с учетом усредненных значений прочности бетона R_{bt} в зоне деградации в виде:

$$\frac{M_{u_2}}{M_{u_0}} = 1 - \frac{\xi_{11} \omega \left(1 - \frac{R_{bt}}{R_b}\right)}{1 - 0,5 \frac{R_s}{R_b} \mu} = 1 - \frac{\xi_{11} \omega \left(1 - \frac{R_{bt}}{R_b}\right)}{1 - 0,5 \xi_0}, \quad (40)$$

где ω — коэффициент, учитывающий распределение прочности бетона по высоте зоны деградации. Для расчетной схемы 2 на рис. 3 $\omega = 1$, для схемы 3 $\omega = 0,5$. При нелинейной изохроне деградации коэффициент ω можно найти из условия $N_{red} = N_{real}$, где N — усилие,

воспринимаемое бетоном деградированной зоны. Формулы (37)—(40) можно применить для расчета долговечности железобетонных изгибаемых элементов.

Так как $\xi_{11} = x_i / h_0$, $x_i = k_\phi t^\alpha$, и предполагая, что известно допустимое снижение прочности нормального поперечного сечения изгибаемого элемента, из формулы (37) получаем в линейном приближении:

$$t = \left(1 - \frac{M_{u_2}}{M_{u_0}}\right) \left(1 - 0,5 \frac{R_s}{R_b} \mu\right) k_\phi^{-1} h_0. \quad (41)$$

По аналогии из формулы (38) получаем:

$$\left(1 - \frac{R_{bt}}{R_b}\right) t = \left(1 - \frac{M_{u_2}}{M_{u_0}}\right) \frac{1 - 0,5 \frac{R_s}{R_b} \mu}{\omega} k_\phi^{-1} h_0. \quad (42)$$

Предположим, что изгибаемый элемент с высотой поперечного сечения $h_0 = 40$ см выполнен из бетона марки W4 класса B30 и армируется проволокой Вр-II диаметром 4 мм. Тогда $R_b = 17$ МПа, $R_s = 1$ 145 МПа. Пусть коэффициент армирования равен 0,01. Полагая, что снижение прочности сечения составило 20 %, рассчитывая долговечность изгибаемого элемента по формуле (41), получаем, что она равна 6—20 годам. Для расчета долговечности по формуле (42), следуя работе [17], выразим отношение R_{bt} / R_b в виде функции:

$$R_{bt} / R_b = 1 - \lambda_0 u (t) t^\alpha, \quad (43)$$

где $\alpha < 1$ для стареющих элементов, $\alpha > 1$ для элементов со скрытыми дефектами, λ_0 — уровень дефектности структуры; $u(t)$ — уровень

энергетического воздействия. Обозначим произведение $\lambda_0 u(t)$ через β и подставим выражение (43) в формулу (42). Тогда долговечность элемента будет определяться из формулы:

$$t^{1+\alpha} = \left(1 - \frac{M_{a2}}{M_{a0}}\right) \frac{1 - 0,5 \frac{R_s}{R_b} \mu}{\omega \cdot \beta} \cdot k_{\phi}^{-1} \cdot h_0. \quad (44)$$

Параметры α и β определяются экспериментально и, очевидно, должны нормироваться для каждой марки бетона.

В работе [17] предполагается, что структурные элементы имеют скрытые дефекты и являются стареющими, и значение параметра α в первом приближении принято равным 1. Параметр β , по экспериментальным данным [18], может изменяться в пределах от 0,20 до 0,70. Тогда долговечность конструкционного элемента, определенная по формуле (44), мо-

жет меняться при $\omega = 1$ в пределах 6—17 лет, при $\omega = 0,5$ — от 8 до 24 лет.

Очевидно, что для более точного определения долговечности необходимо усовершенствовать методы определения глубинного показателя через коэффициент фильтрации и параметр β ; нормировать значения коэффициента химической активности бетонов; уточнить корреляцию между скоростями переноса жидкости и дефектами структуры в композите; уточнить расчетные схемы для предельных состояний первой и второй группы.

Вместе с тем, используя приведенную методику, можно с достаточной достоверностью определять гарантийный срок службы железобетонных конструкций в условиях совместного действия силовых факторов и агрессивных сред.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Агаджанов В. И. Экономика повышения долговечности и коррозионной стойкости строительных конструкций / В. И. Агаджанов. — М. : Стройиздат, 1976. — 112 с.
2. Александровский С. В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на изменение температуры и влажности с учетом ползучести / С. В. Александровский. — М. : Стройиздат, 1973. — 432 с.
3. Анисимов А. В. Деградационные процессы в железобетоне мостовых конструкций. Методы оценки и прогнозирования : дис. ... канд. техн. наук / А. В. Анисимов. — Саранск, 2003. — 185 с.
4. Баженов Ю. М. Бетонполимеры / Ю. М. Баженов. — М. : Стройиздат, 1983. — 472 с.
5. Бондаренко В. М. Расчетные модели силового сопротивления железобетона / В. М. Бондаренко, В. И. Колчунов. — М. : Изд-во АСВ, 2004. — 472 с.
6. Долговечность бетона и железобетона / П. Г. Комохов, В. М. Лотыпов, Т. В. Лотыпов, Р. Ф. Вагапов. — Уфа, Белая река, 1988. — 216 с.
7. Коррозия бетона и железобетона, методы защиты / В. М. Москвин, Ф. М. Иванов, С. Н. Алексеев, Е. А. Гузеев. — М. : Стройиздат, 1980. — 187 с.
8. Куприяшкина Л. И. Наполненные цементные композиции / Л. И. Куприяшкина. — Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2007. — 179 с.
9. Минас А. И. Границы безопасной скорости коррозии бетона железобетонных конструкций / А. И. Минас // Изв. СКНЦ ВШ. Техн. науки. — 1974. — № 4. — С. 72—84.
10. Москвин В. М. Коррозия бетона / В. М. Москвин. — М. : Госстройиздат, 1952. — 337 с.
11. Мощанский Н. А. Прочность и стойкость бетона / Н. А. Мощанский. — М. : Госстройиздат, 1951. — 175 с.
12. Низина Т. А. Защитно-декоративные покрытия на основе эпоксидных и акриловых связующих / Т. А. Низина. — Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2007. — 260 с.
13. Полак А. Ф. Коррозия железобетонных конструкций зданий нефтехимической промышленности / А. Ф. Полак, В. Б. Ратинов, Г. Н. Гельфман. — М. : Стройиздат, 1971. — 120 с.
14. Рекомендации по обеспечению надежности и долговечности железобетонных конструкций промышленных зданий и сооружений при их реконструкции и восстановлении. — Харьков : ПромстройНИИпроект. — М. : Стройиздат, 1990. — 176 с.
15. Рояк Г. С. Внутренняя коррозия бетона / Г. С. Рояк. — М. : Изд-во УНИИС. — 2002. — 156 с.
16. Селяев В. П. Химическое сопротивление наполненных цементных композитов / В. П. Селяев, В. И. Соломатов, Л. М. Ошкина. — Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2001. — 152 с.
17. Селяев В. П. Химическое сопротивление и долговечность строительных материалов изделий и конструкций : учеб. пособие / В. П. Селяев, Т. А. Низина, В. Н. Уткина. — Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2003. — 48 с.
18. Соломатов В. И. Химическое сопротивление композиционных строительных материалов / В. И. Соломатов, В. П. Селяев. — М. : Стройиздат, 1987. — 264 с.

19. **Соломатов В. И.** Химическое сопротивление материалов / В. И. Соломатов, В. П. Селяев, Ю. А. Соколова. — М. : Изд-во РААСН, 2001. — 274 с.
20. Химическая стойкость композиций на основе эпоксидно-аминоальдегидных композитов / И. Е. Путляев, А. Ф. Тихомирова, Ж. М. Сулейманова, М. А. Харьковская // Тр. НИИЖБ. — М. : Стройиздат, 1974. — С. 17—29.
21. **Шестоперов С. В.** Долговечность бетона / С. В. Шестоперов. — М. : Автотрансиздат, 1966. — 500 с.

Поступила 16.09.08.