

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-1-117-127

^{1,2}Римшин В.И., ³Сулейманова Л.А., ^{3,*}Амелин П.А¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»²Научно-исследовательский институт строительной физики
Российской академии архитектуры и строительных наук³Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: p.amelin@inbox.ru

ПРОЧНОСТЬ НОРМАЛЬНЫХ И НАКЛОННЫХ СЕЧЕНИЙ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, ПОВРЕЖДЕННЫХ КОРРОЗИЕЙ И УСИЛЕННЫХ ВНЕШНИМ КОМПОЗИТНЫМ АРМИРОВАНИЕМ

Аннотация. Исследование сосредоточено на разработке методики расчета прочности нормальных и наклонных сечений изгибаемых железобетонных элементов, которые подверглись воздействию коррозии и были усилены внешним композитным армированием. В ходе исследования были изучены бетонные конструкции, подверженные воздействию хлоридной агрессивной среды, вызывающей коррозию. Использование диахронной модели деформирования коррозионно-поврежденных элементов позволило учесть изменения механических характеристик материалов в процессе коррозии и произвести расчеты на основе аналитических зависимостей. Учет внешнего полимеркомпозитного армирования помог улучшить прочностные характеристики поврежденных элементов. Применение итерационного метода Пикара обеспечило точность расчетов. Результаты исследования показали, что предложенная методика эффективно оценивает прочность изгибаемых железобетонных элементов, поврежденных коррозией. Учет изменений характеристик материалов и воздействия агрессивной среды обеспечивает высокую точность и надежность расчетов. Применение внешнего армирования помогает увеличить устойчивость и долговечность конструкций. Разработанная методика представляет собой важный инструмент для улучшения эксплуатационной надежности и продления срока службы железобетонных конструкций, подвергающихся агрессивным средам.

Ключевые слова: прочность, железобетон, хлоридная коррозия, композитные материалы, усиленные строительных конструкций.

Введение. Изгибаемые железобетонные элементы зданий и сооружений подвергаются воздействию агрессивных несилловых нагрузок, что приводит к развитию коррозионных процессов в бетоне и арматуре, вызывая преждевременное наступление предельных состояний в конструкциях [1–4]. Коррозия железобетона – это сложный комплекс химических процессов, в результате развития которых существенно изменяются его прочностные и деформативные свойства [5–7].

Одной из ключевых проблем в строительстве является воздействие хлоридной среды, которое признано опасным и широко распространено на практике. Исследования, проведенные различными методами, включая опросы экспертов, анализ проектной документации и полевые наблюдения, показывают, что около 3/4 предприятий химической, металлургической и других отраслей промышленности, а также в сфере транспортного строительства и в прибрежных зонах подвержены влиянию агрессивных сред, содержащих хлориды [8–10].

На данный момент достаточно исследованы процессы определения НДС (напряженно-деформированного состояния) конструкций,

поврежденных коррозией при совместном действии эксплуатационных и средовых нагрузок, этой теме исследования посвящены работы Бондаренко В.М., Римшина В.И., Розенталя Н.К., Попеско А.И., Овчинникова И.Г., Смоляго Г.А., Селяева В.П., Леоновича С.Н., Чиркова В.П., Mangat P.S., Gaal G.C., Al-Hammoud R., Andrade C. и др. [11–14].

В модели коррозионного поражения бетона можно применить часть диссипативной теории сопротивления В.М. Бондаренко [5], согласно которой поперечное сечение элемента делится на три зоны. Первая зона представляет собой область полного разрушения материала толщиной z^* . Вторая зона – это переходная зона частичного поражения бетона толщиной δ . Третья зона представляет собой область неповрежденного коррозией бетона толщиной r (рис. 1).

Влияние агрессивной среды на силовое сопротивление бетона учитывается функцией повреждения слоя $K(z)$:

$$\sigma_{b,cor} = \sigma_b(t) \cdot K(z), \quad (1)$$

$$E_{b,cor}^H = E_b^H(t) \cdot K(z), \quad (2)$$

где $\sigma_b(t)$ – модель деформирования обычного бетона; $E_b^H(t)$ – модель изменения интегрального

модуля деформаций; $K(z)$ – функция повреждения для слоя толщиной z .

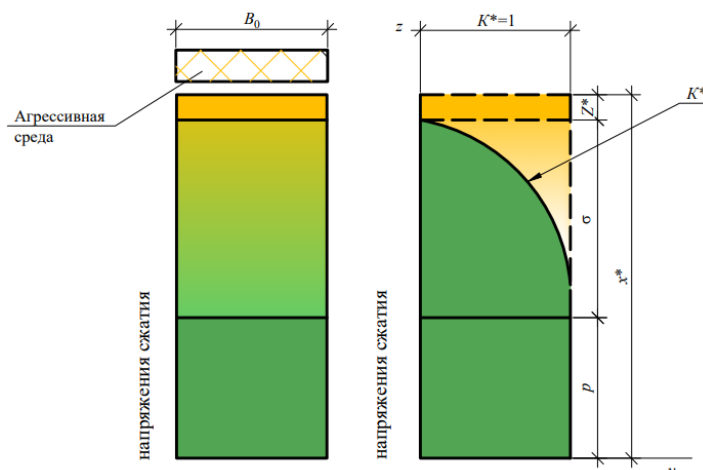


Рис. 1. Схема изменения прочностных характеристик бетона по поперечному сечению и зависимости глубины коррозии от напряжений

Коэффициент K находится в пределах от 0 до 1 и в общем виде определяется зависимостью:

$$K(z) = \sum_{i=0}^3 a_i \cdot z^i, \quad (3)$$

где z – ордината, отсчитываемая от оси силовых напряжений поврежденного коррозией бетонного элемента; a_i – коэффициенты степенного ряда, которые находят при фиксированных значениях K_i .

Согласно модели, условия для определения параметров a_i выглядят таким образом:

$$\text{при } z = p \quad K(p) = 1 \frac{dk^*}{dz} \Big|_{z=p} = 0, \quad (4)$$

$$\text{при } z > p \quad K^*(p + \delta) = K_1. \quad (5)$$

При условии что, $z = p + \sigma \rightarrow K(p + \sigma) = 0$, коэффициенты a_0, a_1, a_2 равны:

$$a_0 = 1 - \left(\frac{p}{\delta}\right)^2, \quad (6)$$

$$a_1 = 2 \frac{p}{\delta^2}, \quad (7)$$

$$E_b^H(t, t_0) = \left[\frac{S_m^0(t)}{E_m^0(t)} + S_n^0(t) \cdot C^*(t, t_0) - \int_{t_0}^t S_n^0(t) \frac{\sigma(\tau)}{\sigma(t)} \frac{\partial}{\partial \tau} C^*(t, \tau) d\tau \right]^{-1}. \quad (10)$$

В общем виде, функция напряжений для мгновенных и запаздывающих деформаций определяется по формуле:

$$S^0 = 1 + V \left(\frac{\sigma}{R}\right)^m \quad (11)$$

где m и V – эмпирические константы деформирования для различных классов бетона по прочности в диапазоне от В15 до В60, которые представлены в табл. 1.

Коррозия арматуры в большей степени изменяет геометрические характеристики

$$a_2 = -\frac{1}{\delta^2}. \quad (8)$$

В качестве исходной модели поведения бетона при расчете прочности изгибаемых элементов принята диссипативная теория силового сопротивления В.М. Бондаренко [4, 5], в которой зависимость напряжения сжатия бетона описываются зависимостью:

$$\sigma_b(t) = \frac{k\varepsilon(t) e^{m(t)\varepsilon(t)}}{\left[\frac{1}{E_m^0(t)} + C^*(t, t_0) - \int_{t_0}^t \frac{\sigma(\tau)}{\sigma(t)} \frac{\partial}{\partial \tau} C^*(t, \tau) d\tau \right]}, \quad (9)$$

где k – эмпирический параметр деформирования; m – параметр нелинейности; E_m^0 – модуль мгновенной деформации; t_0 – начало наблюдения; t – окончание наблюдения; ε – полные деформации бетона.

Для дальнейшего использования в уравнениях равновесия и определения изгибных жесткостей железобетонного сечения, используется функция для определения временного нелинейного модуля деформаций:

арматуры, нежели физико-механические характеристики стали. Расчетная площадь поперечного сечения поврежденной стальной арматуры представляется как [15]:

$$A_s^* = A_s - A_s^{cor}, \quad (12)$$

где A_s – площадь поперечного сечения стальной арматуры до коррозии; A_s^{cor} – расчетная площадь коррозионных повреждений поперечного сечения стальной арматуры.

Таблица 1

Физико-механические характеристики применяемого бетона

Наименование параметров	Значения параметров для классов бетона В						
	15	20	30	40	50	60	
$R = 28$ МПа	11,0	15,0	22,0	29,0	36,0	43,0	
$E_m^0 = 28 \cdot 10^3$ МПа	25,5	29,0	33,5	36,5	38,5	39,0	
$C = 28 \cdot 10^6$ МПа ⁻¹	128	102	74	59	50	45	
Параметры нелинейности	V_m	2,6	2,0	1,3	1,0	0,8	0,7
	m_m	5,0	4,7	4,3	3,8	3,4	3,0
	V_3	3,11	2,35	1,6	1,22	1,22	1,22
	m_3	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0

Глубина коррозии стальной арматуры в работах Овчинникова И.Г. определяется зависимостью [16]:

$$\delta_s = \begin{cases} 0, & t \leq t_{inc} \\ \frac{\delta_{s,0} \cdot (t - t_{inc})}{T + (t - t_{inc})}, & t > t_{inc} \end{cases}, \quad (13)$$

где: $\delta_{s,0}$, T – константы развития повреждений, устанавливаемые из экспериментальных данных; t_{inc} – время иницирования коррозии арматуры, определяемое из выражения (14), при значении глубины коррозионных повреждений бетона $\delta(t) = a_s - d/2$, т.е. когда агрессивная среда достигнет поверхности стержня.

Время продолжительности инкубационного периода определяется на основе закона Фика при известном значении критической концентрации хлоридов в бетоне $C_{кр}$ [16]:

$$t_{inc} = \frac{l}{12D} \left(\frac{a}{1 - \left(\frac{C_{кр}}{C_s} \right)^{0,5}} \right)^2, \quad (14)$$

где D – коэффициент диффузии хлорида, a – толщина защитного слоя бетона, C_s – концентрация хлоридов на расстоянии x от поверхности бетона в момент времени.

В исследовании [22] зависимость деформирования стали представлена в виде диаграммы Прандтля:

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon, & 0 < \varepsilon \leq \varepsilon_{упр} \\ \sigma_m, & \varepsilon > \varepsilon_{упр} \end{cases}. \quad (15)$$

Актуальным вопросом при длительной эксплуатации зданий и сооружений является продление остаточного срока службы их поврежденных железобетонных элементов. В практике строительства процесс обследования технического состояния железобетонных конструкций происходит одновременно с целью увеличить несущую способность элементов для восприятия больших значений нагрузок.

Наряду с существующими методами усиления конструкций, такими как наращивание поперечного сечения и армирования, применение стальных обойм, используется метод

внешнего полимеркомпозитного усиления [17-20]. Развитие и применение методов усиления неповрежденных железобетонных конструкций внешним композитным армированием стало возможным благодаря теоретическим и экспериментальным работам Римшина В.И., Маиляна Д.Р., Морозова В.И., Меркулова С.И., Польского П.П., Bonacci J.F., Tamer E.M., Al-Saidy A.H., Elghazy M. и др.

Особенностью работы композитных материалов на растяжение является их упругое вплоть до разрушения деформирование. Композитные волокна отличаются от стали тем, что они не обладают пластичностью, а их разрушение происходит хрупко [21–23]. Напряжение композитных материалов зависит от их деформации согласно уравнению Гука:

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_f, \quad (16)$$

где: E_f – модуль упругости композитного материала; ε_f – деформация волокон в определенный момент времени.

Это влияет на проектирование усиления железобетонных конструкций внешним армированием из композитов, так как накладываются ограничения на величину упругих деформаций бетона и стали.

Методика расчета прочности изгибаемых железобетонных элементов, усиленных полимеркомпозитным армированием, основана на ряде предположений и гипотез, включая предположение о постоянстве внешней нагрузки на элемент и концентрации агрессивной среды вокруг сечения на протяжении всего периода наблюдений. Также учитывается коррозия арматуры посредством уменьшения сечения, полиномиальная связь между напряжением и деформацией бетона, прочность системы усиления и характеристики материала усиления, такие как толщина, модули упругости, коэффициенты Пуассона и др.

Методы. В данной работе для получения искомых величин используется математический итерационный метод, который сводится к последовательному применению метода Пикара.

Метод Пикара как инструмент для разбиения поперечного сечения железобетонного элемента является итерационным подходом, используемым для анализа и моделирования поврежденных конструкций. Он предполагает последовательное уточнение характеристик сечения путем деления его на подэлементы и итерационного расчета их свойств. В общем виде формула итерационного метода Пикара определяется зависимостью:

$$y(t) = y_0 + \int_{t_0}^t f(x, y(x)) dx. \quad (17)$$

Ниже представлен пошаговый алгоритм для решения:

- задаются начальные условия, такие как конфигурации поперечного сечения железобетонного элемента, включая размеры, форму, расположение и количество арматуры, геометрические параметры повреждений, такие как глубина и протяженность трещин;

- разбивается поперечное сечение на несколько зон (подэлементов), учитывая как поврежденные, так и неповрежденные области

- выбирается начальное приближение приблизительное значение y (принимаемое сначала за константу) подставляется в правую часть дифференциального уравнения:

$$\frac{dy}{dx} = f(x, y). \quad (18)$$

- уравнение интегрируется относительно x , давая y в терминах x во втором приближении, в которое подставляются заданные числовые значения, а результат округляется до заданного количества знаков после запятой или значащих цифр. Первоначально оцениваются механические свойства каждого подэлемента. Итерационный расчет напряженно-деформированного состояния проводится для каждого подэлемента, учитывая взаимодействие между ними. Обновляются характеристики подэлементов на основе результатов расчетов, постепенно уточняя модель.

- итерационный процесс повторяется до достижения сходимости, когда изменения характеристик становятся незначительными. Проводится проверка полученных результатов, чтобы убедиться в адекватности модели и правильности расчетов

$$N_{cor} = b \cdot \int_{h/2}^{\delta_1} \sigma_{b,cor}(y) dy + 2 \cdot \delta_2 \cdot \int_{\delta_1}^{x_b} \sigma_{b,cor}(y) dy + (b-2 \cdot \delta_2) \cdot \int_{\delta_1}^{x_b} \sigma_b(y) dy + A'_{s,cor} \cdot E'_s \cdot \varepsilon_b - A_{s,cor} \cdot E_s \cdot \varepsilon_s, \quad (21)$$

$$M_{cor} = b \cdot \int_{h/2}^{\delta_1} \sigma_{b,cor}(y) \cdot y \cdot dy + 2 \cdot \delta_2 \cdot \int_{\delta_1}^{x_b} \sigma_{b,cor}(y) \cdot y \cdot dy + (b-2 \cdot \delta_2) \cdot \int_{\delta_1}^{x_b} \sigma_b(y) \cdot y \cdot dy + A'_{s,cor} \cdot E'_s \cdot \varepsilon_b \cdot \left(\frac{h}{2} - a\right) - A_{s,cor} \cdot E_s \cdot \varepsilon_s \cdot \left(\frac{h}{2} - a\right), \quad (22)$$

- на основе итерационных расчетов определяются интегральные характеристики всего сечения, такие как момент инерции, статический момент, жесткость и несущая способность.

Метод Пикара в данном контексте обеспечивает точное моделирование и анализ, что необходимо для оценки состояния конструкции и принятия решений о её ремонте или усилении.

Основная часть. Методика расчета прочности изгибаемых элементов предполагает первоначальное определение несущей способности M неповрежденной конструкции решением аналитических зависимостей:

$$N + \sigma'_s A'_s + \sigma_s A_s + b \int_{-h/2}^{\bar{z}_0} \sigma_p dz + b \int_{z_0}^{h/2} \sigma_c dz = 0, \quad (19)$$

$$M + \sigma'_s A'_s z_c + \sigma_s A_s z_p + b \int_{-h/2}^{\bar{z}_0} \sigma_p z dz + b \int_{z_0}^{h/2} \sigma_c z dz = 0, \quad (20)$$

Далее, для расчета прочности нормальных сечений, поврежденных коррозией, элементов с трещинами, предлагается частный случай диахронной модели деформирования В.В. Белова и С.Е. Никитина [24, 25]. Данная модель учитывает:

- изменение прочностных и деформационных характеристик сжатого и растянутого бетона;

- развитие коррозии арматурных стержней;

В рамках методики рассматривается напряженно-деформированное состояние изгибаемого железобетонного элемента с симметричным поперечным сечением в плоскости изгиба и габаритными размерами $h \times b$, площадью S и двойным армированием $A_{s,cor}, A'_{s,cor}$. В случае поперечного изгиба предполагается превалирующая роль изгибающего момента M_{cor} и продольного усилия N_{cor} при незначительном влиянии перерезывающих сил.

Для сечения с трещиной разрешающие системы уравнений диахронной модели деформирования коррозионно-поврежденных железобетонных элементов составляют условия статической эквивалентности $\Sigma N_{cor} = 0$ и $\Sigma M_{cor} = 0$, а также кинематические зависимости:

$$\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_s} = \frac{x}{h-x-a}, \quad (23)$$

где ε_s – относительная деформация растянутой арматуры, в среднем сечении; E_s – модуль упругости арматуры; a – расстояние от равнодействующей усилий в растянутой арматуре до ближайшей грани сечения; ε_b – относительная деформация бетона, в среднем сечении; $\sigma_{b,cor}, \sigma_b$ – напряжение в бетоне поврежденной и неповрежденной зоны соответственно; δ_1, δ_2 – глубина повреждения бетонного сечения в сжатой зоне и боковых гранях.

Роль внешне-композитного усиления изгибаемого элемента определяется добавлением в уравнения равновесия усилий в композитном армировании на расстоянии a (защитного слоя) от месторасположения растянутой арматуры (рис. 2).

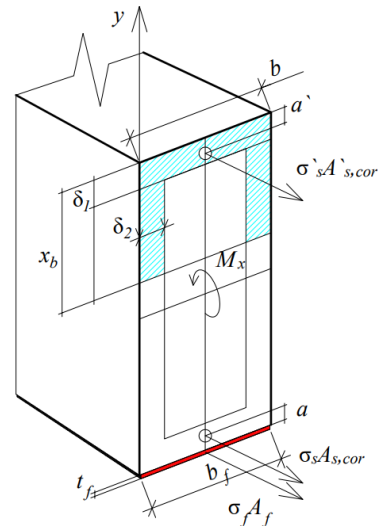


Рис. 2. Схема изменения прочностных характеристик бетона по поперечному сечению и зависимости глубины коррозии от напряжений

В результате получаем зависимости:

$$N_{str} = b \cdot \int_{h/2}^{\delta_1} \sigma_{b,cor}(y) dy + 2 \cdot \delta_2 \cdot \int_{\delta_1}^{x_b} \sigma_{b,cor}(y) dy + (b-2 \cdot \delta_2) \cdot \int_{\delta_1}^{x_b} \sigma_b(y) dy + A'_{s,cor} \cdot E_s \cdot \varepsilon_b - A_{s,cor} \cdot E_s \cdot \varepsilon_s - A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_f, \quad (24)$$

$$M_{str} = b \cdot \int_{h/2}^{\delta_1} \sigma_{b,cor}(y) \cdot y \cdot dy + 2 \cdot \delta_2 \cdot \int_{\delta_1}^{x_b} \sigma_{b,cor}(y) \cdot y \cdot dy + (b-2 \cdot \delta_2) \cdot \int_{\delta_1}^{x_b} \sigma_b(y) \cdot y \cdot dy + A'_{s,cor} \cdot E_s \cdot \varepsilon_b \cdot \left(\frac{h}{2} - a\right) - A_{s,cor} \cdot E_s \cdot \varepsilon_s \cdot \left(\frac{h}{2} - a\right) - A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_f \cdot \frac{h}{2}, \quad (25)$$

$$\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{bts}} = \frac{x_b}{h-x_b}, \quad (26)$$

где h – высота прямоугольного сечения; b – ширина прямоугольного сечения; E_s – модуль упругости арматуры; a – расстояние от равнодействующей усилий в растянутой арматуре до ближайшей грани сечения; ε_b – относительная деформация сжатия бетона, в среднем сечении; $\sigma_{b,cor}, \sigma_b$ – напряжение в бетоне поврежденной и неповрежденной зоны соответственно; δ_1, δ_2 – глубина повреждения бетонного сечения в сжатой зоне и боковых гранях; A_f – площадь поперечного сечения композитного материала; E_f – модуль упругости композитного материала; ε_{bts} – общая относительная деформация растяжения бетона усиленного элемента:

$$\varepsilon_{bts} = \varepsilon_f + \varepsilon_{bt}, \quad (27)$$

$$D_{11} = b \cdot \int_{h/2}^{\delta_1} E_{b,cor}^H(y) \cdot y^2 \cdot dy + 2 \cdot \delta_2 \cdot \int_{\delta_1}^x E_{b,cor}^H(y) \cdot y^2 \cdot dy + (b-2 \cdot \delta_2) \cdot \int_{\delta_1}^x E_b^H(y) \cdot y^2 \cdot dy + A'_{s,cor} \cdot E_s \cdot \left(\frac{h}{2} - a\right)^2 - A_{s,cor} \cdot E_s \cdot \left(\frac{h}{2} - a\right)^2 - A_f \cdot E_f \cdot \left(\frac{h}{2}\right)^2, \quad (30)$$

где ε_{bt} – относительная деформация растяжения бетона, до применения композитного усиления сечения; ε_f – относительная деформация композитного материала.

Для проведения итерационного счета запишем уравнения (24) и (25), определяющие продольную силу N_{str} и изгибающий момент $M_{x,str}$, через изгибные жесткости D , кривизну $\frac{1}{r_x}$ и относительной деформации волокна в начальной точке ε_0 :

$$N_{str} = D_{13} \frac{1}{r_x} + D_{33} \varepsilon_0, \quad (28)$$

$$M_{x,str} = D_{11} \frac{1}{r_x} + D_{13} \varepsilon_0. \quad (29)$$

С учетом усилий полимеркомпозитного материала изгибные жесткости равны:

$$D_{13} = b \cdot \int_{h/2}^{\delta_1} E_{b,cor}^H(y) \cdot y \cdot dy + 2 \cdot \delta_2 \cdot \int_{\delta_1}^x E_{b,cor}^H(y) \cdot y \cdot dy + (b \cdot 2 \cdot \delta_2) \cdot \int_{\delta_1}^x E_b^H(y) \cdot y \cdot dy + \alpha_s \cdot A_{s,cor} \cdot E_s \cdot \left(\frac{h}{2} - a\right) - \alpha_s \cdot A_{s,cor} \cdot E_s \cdot \left(\frac{h}{2} - a\right) - \alpha_f \cdot A_f \cdot E_f \cdot \frac{h}{2}, \quad (31)$$

$$D_{33} = b \cdot \int_{h/2}^{\delta_1} E_{b,cor}^H(y) \cdot dy + 2 \cdot \delta_2 \cdot \int_{\delta_1}^x E_{b,cor}^H(y) \cdot dy + (b \cdot 2 \cdot \delta_2) \cdot \int_{\delta_1}^x E_b^H(y) \cdot dy + A_{s,cor} \cdot E_s - A_{s,cor} \cdot E_s - A_f \cdot E_f, \quad (32)$$

где $E_{b,cor}^H, E_b^H$ – модуль упругости в бетоне сжатой и растянутой зоны поврежденной и неповрежденной зоны соответственно; E_s, E_s' – модуль упругости арматуры растянутой и сжатой зоны; E_f – модуль упругости полимеркомпозитного материала; $\alpha_s, \alpha_s', \alpha_f$ – коэффициенты приведения геометрических характеристик сжатой, растянутой, полимеркомпозитной арматуры;

Расчет изгибаемых элементов, усиленных композитными материалами по наклонным сечениям на действие поперечных сил проводится из условия:

$$Q \leq Q_b + Q_{sw} + Q_{fw}, \quad (33)$$

$$Q_b = \varphi_{b2} \cdot h_0 \left(\frac{b \cdot \int_{h-a}^{\delta_3} \sigma_{bt,cor}(y) dy + 2 \cdot \delta_2 \cdot \int_{\delta_1}^{\delta_3} \sigma_{bt,cor}(y) dy}{c} + \frac{(b \cdot 2 \cdot \delta_2) \int_{\delta_1}^{\delta_3} \sigma_{bt}(y) dy + b \cdot \int_{h/2}^{\delta_1} \sigma_{bt,cor}(y) dy}{c} \right), \quad (34)$$

где φ_{b2} – эмпирический коэффициент, принятый 1,5; c – длина проекции наклонного сечения C .

Поперечная сила, воспринимаемая поперечной стальной арматурой, определяется по формуле:

$$Q_{sw} = \varphi_{sw} q_{sw,cor} = \frac{\varphi_{sw} \sigma_s A_{s,cor}}{s_w}, \quad (35)$$

где φ_{sw} – эмпирический коэффициент, принимаемый равным 0,75; $q_{sw,cor}$ – усилие в

где Q – поперечная сила, определяемая внешней нагрузкой, расположенной по одну сторону рассматриваемого наклонного сечения; Q_b – поперечная сила, воспринимаемая бетоном в наклонном сечении; Q_{sw} – поперечная сила, воспринимаемая поперечной стальной арматурой; Q_{fw} – поперечная сила, воспринимаемая внешним полимеркомпозитным армированием;

Поперечную силу Q_b , воспринимаемая в наклонном сечении, с учетом повреждения бетона, можно представить в виде:

поперечной арматуре на единицу длины элемента.

Механизм крепления, обеспечиваемый U-образными хомутами из полимерного композита, основан на поддержании сил трения, возникающего между двумя бетонными поверхностями раскрытой продольной горизонтальной трещины (рис. 3).

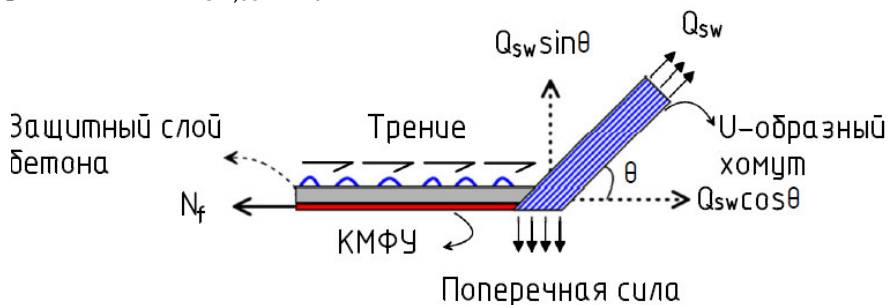


Рис. 3. Схема работы элемента в наклонном сечении

Для расчета поперечной силы, воспринимаемой внешним полимеркомпозитным армированием предлагается зависимость:

$$Q_{fw} = \frac{N_f}{\mu \sin \theta + \cos \theta}, \quad (36)$$

где N_f – продольное растягивающее усилие, воспринимаемое композитным материалом; μ – коэффициент трения, который можно принять равным 1,4; θ – угол наклона U-образного композитного хомута к продольной оси балки.

Продольное растягивающее усилие определяется как наименьшее из уравнений:

$$N_f = A_f E_f \varepsilon_{fd}, \quad (37)$$

$$N_f = A_f E_f \varepsilon_{fu}, \quad (38)$$

$$N_f = A_f E_f \left[\varepsilon_{cu} \left(\frac{h_0 - x}{x} \right) - \varepsilon_{bi} \right], \quad (39)$$

где A_f – площадь поперечного сечения композитного материала; E_f – модуль упругости композитного материала; ε_{fd} – относительная деформация композитного материала для случая разрушения из-за отслоения промежуточной трещины; ε_{fu} – относительная деформация композитного материала случае выхода из строя из-за разрыва композитного материала; ε_{cu} – предельная деформация растянутого бетона; ε_{bi} – это напряжение бетона во время приклейки полимеркомпозитного холста; x – высота сжатой зоны бетона; h_0 – высота рабочей зоны бетона.

Уравнение (37) справедливо для случая разрушения из-за отслоения промежуточной трещины, уравнение (38) – в случае выхода из строя из-за разрыва композитного материала, уравнение (39) – в случае отказа элемента из-за дробления бетона.

Выводы. В данном исследовании были выявлены общие закономерности изменения напряженно-деформированного состояния изгибаемых коррозионно-поврежденных железобетонных элементов, усиленных внешним полимеркомпозитным армированием. Это позволило сформулировать исходные предпосылки и основные гипотезы для расчета, а именно справедливость гипотезы плоских сечений, предположение о постоянстве внешней нагрузки на элемент и концентрации агрессивной среды вокруг сечения на протяжении всего периода наблюдений, учет коррозии арматуры посредством уменьшения сечения, полиномиальная связь между напряжением и деформацией бетона, прочность системы усиления и характеристики материала усиления, такие как толщина, модули упругости, коэффициенты Пуассона и др.

Для определения напряженного состояния усиленных железобетонных изгибаемых элементов была модифицирована методика повреждения железобетона. В соответствии с моделью коррозионного поражения бетона принята диссипативная теория сопротивления В.М. Бондаренко. Расчетная модель позволяет учесть направление хлоридного воздействия, дифференциацию повреждений и концентрации среды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Смоляго Г.А., Фролов Н.В., Дронов А.В. Анализ коррозионных повреждений эксплуатируемых изгибаемых железобетонных конструкций зданий и сооружений // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 1. С. 52–57. DOI: 10.12737/article_5c506209065dd6.02007715.
2. Овчинников И.И. Современное состояние проблемы расчета армированных конструкций, подвергающихся воздействию агрессивных сред // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2012. № 2(2). С. 46–60.
3. Mangat P.S., Elgarf M.S. Flexural strength of concrete beams with corroding reinforcement // ACI Structural Journal. 1999. Vol. 96. No. 1. Pp. 149–158.
4. Бондаренко В.М., Римшин В.И. Квазилинейные уравнения силового сопротивления и диаграмма $\sigma - \varepsilon$ бетона // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2014. № 6. С. 40–44.
5. Бондаренко В.М. Элементы диссипативной теории силового сопротивления железобетона // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2014. № 2. С. 47–57.
6. Римшин В.И., Сулейманова Л.А., Амелин П.А., Крючков А.А. Экспериментальные исследования изгибаемых железобетонных элементов, имеющих повреждения арматуры вследствие контакта с хлоридной агрессивной средой // Эксперт: теория и практика. 2023. № 3(22). С. 138–146. DOI: 10.51608/26867818_2023_3_138.
7. Feng G., Jin Z., Jiang Y., Wang X., Zhu D. Localized corrosion propagation of steel in cracked mortar and long-term corrosion of steel reinforcement in cracked concrete in seawater environment // Corrosion Science. 2024. Vol. 228. 111793. DOI: 10.1016/j.corsci.2023.111793/
8. Чирков В.П., Антропова Е.А. Прогнозирование срока службы автодорожных мостов // В сб. «Надежность строительных элементов и систем». Труды Междунар. научно-технич. конф. Самара, 1997. С. 78–81.
9. Ai-Hammoud R., Soudki K., Topper T.H. Bond analysis of corroded reinforced concrete beams under monotonic and fatigue loads // Cement Concrete Composites. 2010. Vol. 32. No. 3. Pp. 194–203.
10. Розенталь Н.К. Проницаемость и коррозионная стойкость бетона // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 1. С. 35–37.
11. Gaal G.C., Veen C., Djorai M.H. Prediction of deterioration of concrete bridges in the Netherlands // Proceedings of First International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management. 2002. Pp. 111–118.

12. Попеско А.И., Анцыгин О.И., Дайлов А.А. Численный расчет железобетонных стержней при коррозионных воздействиях // Бетон и железобетон. 2007. № 3. С. 25–27.

13. Selyaev V.P., Selyaev P.V., Sorokin E.V., Kechutkina E.L. Modeling of the reinforced concrete structure performance at joint influence of mechanical and chemical loads // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 456. 012–060. DOI: 10.1088/1757-899X/456/1/012060.

14. Andrade C., Alonso C., Gulikers J. Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method // Materials and Structures. 2004. No. 37. Pp. 623–643.

15. Frolov N.V., Smolyago G.A. Reinforced concrete beams strength under power and environmental influences // Magazine of Civil Engineering. 2021. No. 3(103). 10303. DOI: 10.34910/MCE.103.3.

16. Ovchinnikov I.I., Snezhkina O.V., Ovchinnikov I.G. Diffusion model of penetration of a chloride-containing environment in the volume of a constructive element // AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 1973(1). 020010. DOI: 10.1063/1.5041394.

17. Римшин В. И., Сулейманова Л. А., Амелин П. А., Фролов Н. В. Композитное усиление железобетонных изгибаемых элементов, поврежденных под воздействием хлоридной агрессивной среды // Эксперт: теория и практика. 2023. № 1 (20). С. 29–34. DOI: 10.51608/26867818_2023_1_29.

18. Bonacci J.F., Maalej M. Externally bonded fiber-reinforced polymer for rehabilitation of corrosion damaged concrete beams // ACI Structural Journal. 2000. Vol. 97(5). P. 703–711. DOI: 10.14359/8805.

Информация об авторах

Римшин Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент отделения строительных наук. E-mail: v.rimshin@vniizhbeton.ru. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26; 2Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук. Россия, 127238, г. Москва, проезд Локомотивный, д. 21.

Сулейманова Людмила Александровна, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительства и городского хозяйства. E-mail: ludmilasuleimanova@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Амелин Павел Андреевич, ассистент кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: p.amelin@inbox.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 15.10.2024 г.

© Римшин В.И., Сулейманова Л.А., Амелин П.А., 2025

19. Морозов В.И., Юшин, А.В. Экспериментальные исследования двухпролетных железобетонных балок, усиленных композитными материалами по наклонному сечению // Вестник гражданских инженеров. 2014. № 5(46). С 77–84.

20. Меркулов С.И., Есипов С.М., Есипова Д.В. Экспериментальные исследования трещинообразования железобетонных балок, усиленных композитными материалам // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2019. № 3. С. 102–107.

21. Al-Saidy A.H., Saadatmanesh H., El-Gamal S., Al-Jabri K.S., Waris B.M. Structural behavior of corroded RC beams with/without stirrups repaired with CFRP sheets // Mater. Struct. /Materiaux et Constructions. 2016. Vol. 49. Pp. 3733–3747. DOI: 10.1617/s11527-015-0751-y.

22. Маилян Д.Р., Польской П.П., Михуб А. Вопросы исследования прочности нормальных сечений балок, усиленных различными видами композитных материалов // Инженерный вестник Дона. 2013. № 2. С. 99.

23. Al-Saidy A.H., Al-Jabri K.S. Effect of damaged concrete cover on the behavior of corroded concrete beams repaired with CFRP sheets // Compos. Struct. 2011. Vol. 93. P. 1775–1786. DOI: 10.1016/j.compstruct.2011.01.011.

24. Белов В.В. Никитин С.Е. Диахронная модель деформирования коррозионно-поврежденных железобетонных элементов с трещинами // Вестник гражданских инженеров. 2011. № 4(29). С. 18–25.

25. Никитин С.Е. Оценка долговечности коррозионно-поврежденных железобетонных конструкций на базе диахронной модели деформирования // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 2. С. 242.

^{1,2}Rimshin V.I., ³Suleymanova L.A., ^{3,*}Amelin P.A.

¹National Research Moscow State University of Civil Engineering

²Research Institute of Building Physics

Russian Academy of Architecture and Construction Sciences

³Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

*E-mail: p.amelin@inbox.ru

STRENGTH OF NORMAL AND INCLINED SECTIONS OF BENDING REINFORCED CONCRETE ELEMENTS DAMAGED BY CORROSION AND REINFORCED BY EXTERNAL COMPOSITE REINFORCEMENT

Abstract The study is focused on the development of a strength calculation methodology for normal and inclined sections of flexural reinforced concrete elements that have been exposed to corrosion and reinforced with external composite reinforcement. Particular attention is paid to assessing the influence of aggressive environments, such as chloride solutions, which accelerate reinforcement corrosion processes. The use of a diachronic deformation model allows taking into account time changes in the physical and mechanical properties of materials under the influence of corrosion. This modeling is based on the use of analytical dependencies describing the development of corrosion damage and allows you to adjust the calculation parameters depending on the stage of corrosion destruction. Particular attention in the methodology is paid to changes in the strength characteristics of concrete and reinforcement, which is a key factor for the correct assessment of the bearing capacity of the elements. The use of external polymer composite reinforcement improves resistance to external influences and significantly reduces the rate of progression of corrosion processes due to the creation of an additional protective layer. To ensure high accuracy of calculations, the iterative Picard method is used, which allows you to adjust solutions at each step of the calculation until convergence of the results is achieved. Including in the calculation changes in the physical and mechanical characteristics of materials caused by corrosion, as well as taking into account external composite reinforcement allows achieving a significant increase in the strength and durability of structures. The results of the study demonstrate that the proposed method is highly effective in assessing the bearing capacity of bending reinforced concrete structures subject to aggressive effects.

Keywords: strength, reinforced concrete, chloride corrosion, composite materials, reinforcement of building structures.

REFERENCES

1. Smolyago G.A., Frolov N.V., Dronov A.V. Analysis of corrosion damage to operated bending reinforced concrete structures of buildings and structures [Analiz korrozionnyh povrezhdenij ekspluatiruemyh izgibaemyh zhelezobetonnyh konstrukcij zdaniy i sooruzhenij]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 1. Pp. 52–57. DOI: 10.12737/article_5c506209065dd6.02007715. (rus)
2. Ovchinnikov I.I. Current state of the problem of calculating reinforced structures exposed to aggressive environments [Sovremennoe sostoyanie problemy rascheta armirovannyh konstrukcij, podvergayushchihsvya vozdeystviyu agressivnyh sred]. Construction of unique buildings and structures. 2012. No. 2(2). P. 46-60. (rus)
3. Mangat P.S., Elgarf M.S. Flexural strength of concrete beams with corroding reinforcement. ACI Structural Journal. 1999. Vol. 96. No. 1. P. 149-158.
4. Bondarenko V.M., Rimshin V.I. Quasi-linear equations of force resistance and $\sigma - \varepsilon$ diagram of concrete [Kvazilinejnye uravneniya silovogo soprotivleniya i diagramma $\sigma - \varepsilon$ betona]. Structural mechanics of engineering structures and constructions. 2014. No. 6. P. 40-44. (rus)
5. Bondarenko V.M. Elements of the dissipative theory of force resistance of reinforced concrete [Elementy dissipativnoj teorii silovogo soprotivleniya zhelezobetona]. Structural mechanics of engineering structures and constructions. 2014. No. 2. P. 47-57. (rus)
6. Rimshin V.I., Suleimanova L.A., Amelin P.A., Kryuchkov A.A. Experimental studies of bending reinforced concrete elements with reinforcement damage due to contact with an aggressive chloride environment [Eksperimental'nye issledovaniya izgibaemyh zhelezobetonnyh elementov, imeyushchih povrezhdeniya armatury vsledstvie kontakta s hloridnoj agressivnoj sredoj]. Expert: theory and practice. 2023. No. 3 (22). 138–146. DOI: 10.51608/26867818_2023_3_138. (rus)
7. Feng G., Jin Z., Jiang Y., Wang X., Zhu D. Localized corrosion propagation of steel in cracked mortar and long-term corrosion of steel reinforcement in cracked concrete in seawater environment. Corrosion Science. 2024. Vol. 228. 111793. DOI: 10.1016/j.corsci.2023.111793/
8. Chirkov V.P., Antropova E.A. Forecasting the service life of road bridges [Prognozirovaniye sroka sluzhby avtodorozhnyh mostov]. V sb. «Nadezhnost' stroitel'nyh elementov i sistem». Trudy

Mezhdunar. nauchno-tekhnich. konf. Samara, 1997. Pp. 78–81. (rus)

9. Ai-Hammoud R., Soudki K., Topper T.H. Bond analysis of corroded reinforced concrete beams under monotonic and fatigue loads. *Cement Concrete Composites*. 2010. Vol. 32. No. 3. Pp. 194–203.

10. Rosenthal N.K. Permeability and corrosion resistance of concrete [Pronicaemost' i korrozionnaya stojkost' betona]. *Industrial and civil engineering*. 2013. No. 1. Pp. 35–37. (rus)

11. Gaal G.C., Veen C., Djourai M.H. Prediction of deterioration of concrete bridges in the Netherlands. *Proceedings of First International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management*. 2002. Pp. 111–118.

12. Popesko A.I., Antsygin O.I., Dailov A.A. Numerical calculation of reinforced concrete rods under corrosion effects [Chislennyj raschet zhelezobetonnyh sterzhnej pri korrozionnyh vozdeystviyah]. *Beton i zhelezobeton*. 2007. No. 3. Pp. 25–27. (rus)

13. Selyaev V.P., Selyaev P.V., Sorokin E.V., Kechutkina E.L. Modeling of the reinforced concrete structure performance at joint influence of mechanical and chemical loads. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 456. Pp. 012-060. DOI: 10.1088/1757-899X/456/1/012060.

14. Andrade C., Alonso C., Gulikers J. Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method. *Materials and Structures*. 2004. No. 37. P. 623-643.

15. Frolov N.V., Smolyago G.A. Reinforced concrete beams strength under power and environmental influences. *Magazine of Civil Engineering*. 2021. No. 3(103). 10303. DOI: 10.34910/MCE.103.3.

16. Ovchinnikov I.I., Snezhkina O.V., Ovchinnikov I.G. Diffusion model of penetration of a chloride-containing environment in the volume of a constructive element. *AIP Conference Proceedings*. 2018. Vol. 1973(1). 020010. DOI: 10.1063/1.5041394.

17. Rimshin V.I., Suleimanova L.A., Amelin P.A., Frolov N.V. Composite strengthening of reinforced concrete bending elements damaged by an aggressive chloride environment [Kompozitnoe usilenie zhelezobetonnyh izgibaemyh elementov, povrezhdennyh pod vozdeystviem hloridnoj agressivnoj sredy]. *Expert: Theory and Practice*. 2023. No. 1 (20). Pp. 29–34. DOI: 10.51608/26867818_2023_1_29. (rus)

18. Bonacci J.F., Maalej M. Externally bonded fiber-reinforced polymer for rehabilitation of corrosion damaged concrete beams. *ACI Structural Journal*. 2000. Vol. 97(5). Pp. 703–711. DOI: 10.14359/8805.

19. Morozov V.I., Yushin, A.V. Experimental studies of two-span reinforced concrete beams reinforced with composite materials along an inclined section [Eksperimental'nye issledovaniya dvuhproletnyh zhelezobetonnyh balok, usilennyh kompozitnymi materialami po naklonnomu secheniyu]. *Bulletin of Civil Engineers*. 2014. No. 5 (46). Pp. 77–84. (rus)

20. Merkulov S.I., Esipov S.M., Esipova D.V. Experimental studies of crack formation in reinforced concrete beams reinforced with composite materials [Eksperimental'nye issledovaniya treshchinoobrazovaniya zhelezobetonnyh balok, usilennyh kompozitnymi materialami]. *Bulletin of the Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2019. No. 3. Pp. 102–107. (rus)

21. Al-Saidy A.H., Saadatmanesh H., El-Gamal S., Al-Jabri K.S., Waris B.M. Structural behavior of corroded RC beams with/without stirrups repaired with CFRP sheets. *Mater. Struct. /Materiaux et Constructions*. 2016. Vol. 49. Pp. 3733–3747. DOI: 10.1617/s11527-015-0751-y.

22. Mailyan D.R., Polskoy P.P., Mikhub A. Issues of studying the strength of normal sections of beams reinforced with different types of composite materials [Voprosy issledovaniya prochnosti normal'nyh sechenij balok, usilennyh razlichnymi vidami kompozitnyh materialov]. *Engineering Bulletin of the Don*. 2013. No. 2. P. 99. (rus)

23. Al-Saidy A.H., Al-Jabri K.S. Effect of damaged concrete cover on the behavior of corroded concrete beams repaired with CFRP sheets. *Compos. Struct.* 2011. Vol. 93. Pp. 1775–1786. DOI: 10.1016/j.compstruct.2011.01.011.

24. Belov V.V., Nikitin S.E. Diachronous model of deformation of corrosion-damaged reinforced concrete elements with cracks [Diahronnaya model' deformirovaniya korrozionno-povrezhdennyh zhelezobetonnyh elementov s treshchinami]. *Bulletin of civil engineers*. 2011. No. 4(29). Pp. 18–25. (rus)

25. Nikitin S.E. Assessment of the durability of corrosion-damaged reinforced concrete structures based on the diachronous model of deformation [Ocenka dolgovechnosti korrozionno-povrezhdennyh zhelezobetonnyh konstrukcij na baze diahronnoj modeli deformirovaniya]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2012. No. 2. P. 242. (rus)

Information about the author

Rimshin, Vladimir I. Doctor of Technical Sciences, Professor, Corresponding Member of the Department of Construction Sciences. E-mail: v.rimshin@vniizhbeton.ru. National Research Moscow State University of Civil Engineering. Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoe shosse, 26; Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences. Russia, 127238, Moscow, Lokomotivny proezd, 21.

Suleymanova, Lyudmila A. DSc, Professor, Head of the Department of Construction and Urban Economy. E-mail: ludmilasuleimanova@yandex.ru. Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Amelin, Pavel A. Assistant of the Department of Construction and Urban Economy. E-mail: p.amelin@inbox.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod st. Kostyukova, 46.

Received 15.10.2024

Для цитирования:

Римшин В.И., Сулейманова Л.А., Амелин П.А. Прочность нормальных и наклонных сечений изгибаемых железобетонных элементов, поврежденных коррозией и усиленных внешним композитным армированием // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. №1. С. 117–127. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-1-117-127

For citation:

Rimshin V.I., Suleymanova L.A., Amelin P.A. Strength of normal and inclined sections of bending reinforced concrete elements damaged by corrosion and reinforced by external composite reinforcement. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 1. Pp. 117–127. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-1-117-127