

В.Н. Мигунов

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства,
Пенза, Россия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОРРОЗИИ АРМАТУРЫ РАЗЛИЧНОГО ПРОФИЛЯ В ПОПЕРЕЧНЫХ ТРЕЩИНАХ БЕТОНА НА ПРЯМЫХ МОДЕЛЯХ ОБЫЧНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В ходе экспериментально-теоретических исследований на прямых моделях обычных железобетонных элементах рассмотрены вопросы нормирования поперечных трещин в защитном слое бетона, с учетом влияния деформации бетона в полости трещин на ширину их раскрытия и характеристики коррозии арматуры. Уточнен механизм изменения долговечности обычных железобетонных элементов с поперечными трещинами в защитном слое бетона при воздействии агрессивной жидкой среды, содержащей хлорид-ион.

Выявлены функциональные зависимости величины коррозионного поражения арматуры класса А-I и А-III от параметров внутренних факторов в период возникновения коррозионных продольных трещин. Установлено влияние показателя (отношение диаметра арматуры к толщине защитного слоя бетона) на скорость образования коррозионных продольных трещин.

Ключевые слова: прямые модели железобетонных элементов, поперечные и продольные трещины, арматура гладкого и периодического профиля, деформация, коррозия арматуры.

V.N. Migunov

Penza State University of Architecture and Construction,
Penza, Russian Federation

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDIES REINFORCEMENT CORROSION OF VARIOUS PROFILES IN TRANSVERSE CRACKS OF CONCRETE ON THE DIRECT MODEL CONVENTIONAL CONCRETE STRUCTURES

With the help of experimental and theoretical studies on the lines of conventional models of concrete elements of the issues of normalization transverse cracks in the protective layer of concrete, with the influence of the warping of concrete cracks in the cavity of the width of their disclosure and characteristics of reinforcement corrosion. Updated change mechanism durability of conventional concrete elements with transverse cracks in the protective layer of concrete under the influence of aggressive liquid medium containing chloride – ions.

Identified the functional dependence of the corrosion defeat fittings Class A-I and A-III with parameters internal factors during the formation of corrosion of longitudinal cracks. The influence of index (ratio of the diameter of reinforcement to the concrete protective layer thickness) on the rate of corrosion of longitudinal cracks.

Keywords: direct models of reinforced concrete elements, transverse and longitudinal cracks, fittings and smooth periodic profile, warping, corrosion of reinforcement.

Ширина раскрытия и геометрическая форма (депланация) поперечных трещин по толщине защитного слоя бетона железобетонных конструкций определяют проницаемость влаги, кислорода и различных агрессивных реагентов к арматуре и, в конечном счете, коррозионную сохранность арматуры. Депланация бетона в полости трещин определяет фактическую ширину раскрытия трещин на поверхности бетона в зависимости от толщины защитного слоя бетона [1].

Действующий нормативный документ СП 52-101–2003 (Свод правил по проектированию и строительству. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры) определяет среднюю ширину раскрытия трещин нормальных к продольной оси элемента на поверхности арматуры. Однако его расчетные положения по определению ширины раскрытия нормальных трещин в защитном слое бетона a_{crc} не позволяют прогнозировать коррозионную сохранность арматуры в трещинах бетона из-за включения в СНиП 2.03 11–85* «Защита строительных конструкций от коррозии» нормативной ширины раскрытия трещин, рассматриваемой на поверхности защитного слоя бетона при $\delta_{zc} = 20...30$ мм в зависимости от вида и степени агрессивности среды.

Из действующих нормативных документов только межгосударственный стандарт ГОСТ 8829–94 «Изделия строительные железобетонные и бетонные заводского изготовления. Методы испытания нагружением. Правила оценки прочности, жесткости и трещиностойкости» учитывает влияние депланации бетона в поперечных трещинах с помощью коэффициента q на ширину их раскрытия в изгибаемых железобетонных элементах в виде $q = \delta_{zc25} / \delta_{zcb}$, где δ_{zc25} – толщина защитного слоя бетона, принимаемая равной 25 мм, и δ_{zcb} – проектное значение толщины защитного слоя бетона в миллиметрах.

Величина раскрытия поперечных трещин непосредственно у поверхности арматуры периодического профиля в железобетонных конструкциях в три раза меньше ширины раскрытия нормальных трещин в железобетонных элементах с гладкой арматурой при тех же напряжениях [2]. Причиной является образование вокруг стержня периодического профиля в бетоне внутренних кольцевых трещин, не выходящих на поверхность бетона.

В изгибаемых железобетонных элементах с гладкими стержнями депланация наблюдается на участках, непосредственно прилегающих к арматуре, т.е. 5–10 мм. На расстоянии от поверхности арматуры $\delta=10\ldots 25$ мм она отсутствует, вследствие чего ширина раскрытия трещины остается величиной, постоянной по высоте ее сечения. В балках с арматурой периодического профиля изменение ширины раскрытия трещины по всему ее сечению имеет пропорциональную зависимость от толщины защитного слоя бетона [3].

По степени опасности коррозионного поражения стали в трещинах бетона горячекатаная арматура гладкого и арматура периодического профиля классов А-I и А-III располагаются в одной группе в СНиП 2.03.11–85* и в межгосударственном стандарте ГОСТ 31384–2008 «Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Общие технические требования». Различная величина депланации стенок бетона трещин для арматуры гладкого и периодического профиля является основанием для уточнения нормативных значений ширины раскрытия для арматурных сталей с различным профилем, с учетом дополнительных экспериментально-теоретических исследований коррозионного состояния арматуры в поперечных трещинах защитного слоя бетона.

Такие исследования проведены на железобетонных элементах при периодическом воздействии жидкой хлоридсодержащей среды [4]. Программа исследований предусматривала проведение сравнительного анализа величины характеристик коррозионного поражения арматуры различного профиля классов А-1 и А-111 в поперечных трещинах защитного слоя бетона с равными значениями $a_{\text{стс}}$ на прямых моделях изгибаемых железобетонных элементов с размерами $2000\times 200\times 70$ мм и классом бетона В-30 [5].

Для исключения коррозии арматуры вне зоны влияния поперечных трещин использовался бетон пониженной проницаемости с эффективным коэффициентом диффузии CO_2 в бетоне $0,53\cdot 10^{-4}$ $\text{см}^2/\text{с}^1$. Каждый образец армирован одним рабочим стержнем соответствующего класса А-1 или А-111. Для получения независимых экспериментальных характеристик коррозионного поражения арматуры в поперечных трещинах в зоне чистого изгиба образцов поперечная арматура отсут-

¹ Пособие по проектированию защиты от коррозии бетонных и железобетонных строительных конструкций (к СНиП 2.03.11–85) / НИИЖБ Госстроя СССР. М.: Стройиздат, 1989. С. 140–141.

ствовала. Бетон изготавливался на портландцементе и гранитном щебне фракции 5–10 мм.

Технические характеристики железобетонных образцов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики железобетонных образцов

Σn , шт.	T (шт.), ϕ (мм), K	$\delta_{зс}$, мм	μ , %	$a_{сгс}^{\max}$, мм
23	1 ϕ 10	15	0,8	0,5
	1 ϕ 14	20	1,4	
	1 ϕ 18	25	2,4	
	A-I			
21	1 ϕ 10	15	0,8	0,5
	1 ϕ 14	20	1,4	
	1 ϕ 18	25	2,4	
	A-III			

Примечание: Σn – количество балок; T, ϕ , K – соответственно количество, диаметр и класс рабочей арматуры; $\delta_{зс}$ – толщина защитного слоя бетона; μ – коэффициент армирования; $a_{сгс}^{\max}$ – расчетное (фактическое) значение максимальной ширины раскрытия трещины.

Образцы испытывали воздействие постоянной нагрузки. Для стимуляции коррозии арматуры в трещинах бетона использовался 3%-ный раствор NaCl, которым два раза в сутки увлажнялась поверхность бетона. Эксперимент проводился в атмосферных условиях в течение двух лет до появления на образцах в бетоне защитного слоя на уровне рабочей арматуры волосяных коррозионных продольных трещин, являющихся показателем предаварийного состояния железобетонных конструкций [6]. С учетом выбранной концентрации хлорид-ионов и фактического периода образования продольных трещин в бетоне на опытных образцах между поперечными трещинами степень воздействия жидкой агрессивной среды на опытные образцы оценивается как сильноагрессивная [7].

После проведения натурального эксперимента железобетонные образцы и арматура были испытаны на прочность изгибающей и растягивающей нагрузками соответственно.

При средней глубине коррозионного поражения $\delta_{\text{cp}} = 300$ мкм арматуры $\phi 14$ мм класса А-111, 4,3 % уменьшения диаметра арматуры, несущая способность железобетонных образцов и арматуры не изменилась. Предельной 15%-ной величиной снижения диаметра арматуры, равного 14 мм, является средняя глубина коррозии $\delta_{\text{cp}} = 1050$ мкм². Средняя глубина коррозионного поражения стальных стержней δ_{cp} , при которой возникали волосяные коррозионные продольные трещины в бетоне, составляла от 240 до 350 мкм в зависимости от толщины защитного слоя бетона и класса арматуры. Полученные экспериментальные данные коррозии арматуры показывают, что долговечность железобетонных конструкций по условию возникновения волосяных коррозионных продольных трещин определяется только длиной участка коррозионного поражения на арматуре.

Коррозионная стойкость арматуры в трещинах бетона, качественно характеризующая характер депланации стенок бетона поперечных трещин, определялась коэффициентом $K_0 = K_2 / K_1$, где K_1 и K_2 – соответственно глубины коррозионного поражения арматуры в трещинах бетона со стороны защитного слоя бетона и противоположной стороны.

Данные эксперимента показали, что величина K_0 зависит от класса арматуры, значений $a_{\text{сгс}}$ и $\delta_{\text{зс}}$ (рис. 1, 2). Шириной раскрытия трещин, при которой $K_0 = 0$, является соответствующая величина $a_{\text{сгс}}$: для гладкой арматуры класса А-I – 0,005 мм ($\delta_{\text{зс}} = 15$ мм), 0,025 мм ($\delta_{\text{зс}} = 20$ мм) и 0,050 мм ($\delta_{\text{зс}} = 25$ мм), а для арматуры периодического профиля класса А-III – 0,050 мм ($\delta_{\text{зс}} = 15$ мм) и 0,10 мм ($\delta_{\text{зс}} \geq 20$ мм).

Глубина (δ) и длина (l) участка коррозионного поражения арматуры в зоне влияния поперечных трещин в бетоне защитного слоя определяются классом арматуры, значением $a_{\text{сгс}}$ и величиной Φ ($\Phi = d_a / \delta_{\text{зс}}$ – отношение диаметра арматуры к толщине защитного слоя бетона) рис. 3, 4.

² Рекомендации по обеспечению надежности и долговечности железобетонных конструкций промышленных зданий и сооружений при их реконструкции и восстановлении / Харьковский Промстройиниипроект. М.: Стройиздат, 1990. 9 с.

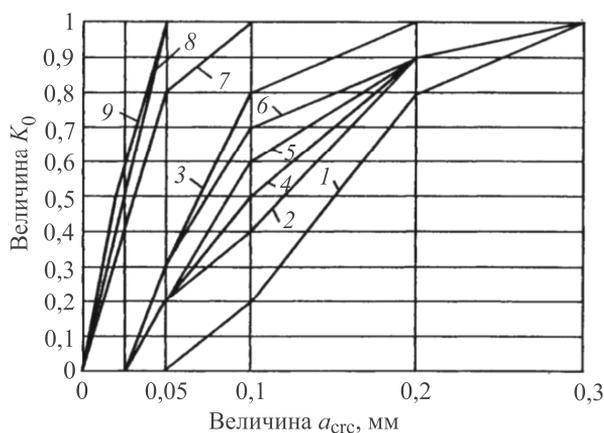


Рис. 1. Показатель коррозионной стойкости арматуры класса А-I в трещинах бетона K_0 : 1 – $d_a = 18$ мм и $\delta_{zc} = 25$ мм; 2 – $d_a = 14$ мм и $\delta_{zc} = 25$ мм; 3 – $d_a = 10$ мм и $\delta_{zc} = 25$ мм; 4 – $d_a = 18$ мм и $\delta_{zc} = 20$ мм; 5 – $d_a = 14$ мм и $\delta_{zc} = 20$ мм; 6 – $d_a = 10$ мм и $\delta_{zc} = 20$ мм; 7 – $d_a = 18$ мм и $\delta_{zc} = 15$ мм; 8 – $d_a = 14$ мм и $\delta_{zc} = 15$ мм; 9 – $d_a = 10$ мм и $\delta_{zc} = 15$ мм

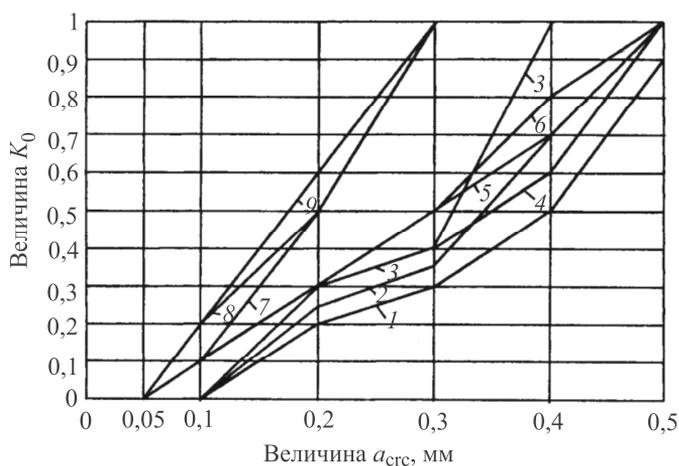


Рис. 2. Показатель коррозионной стойкости арматуры класса А-III в трещинах бетона K_0 : 1 – $d_a = 18$ мм и $\delta_{zc} = 25$ мм; 2 – $d_a = 14$ мм и $\delta_{zc} = 25$ мм; 3 – $d_a = 10$ мм и $\delta_{zc} = 25$ мм; 4 – $d_a = 18$ мм и $\delta_{zc} = 20$ мм; 5 – $d_a = 14$ мм и $\delta_{zc} = 20$ мм; 6 – $d_a = 10$ мм и $\delta_{zc} = 20$ мм; 7 – $d_a = 18$ мм и $\delta_{zc} = 15$ мм; 8 – $d_a = 14$ мм и $\delta_{zc} = 15$ мм; 9 – $d_a = 10$ мм и $\delta_{zc} = 15$ мм

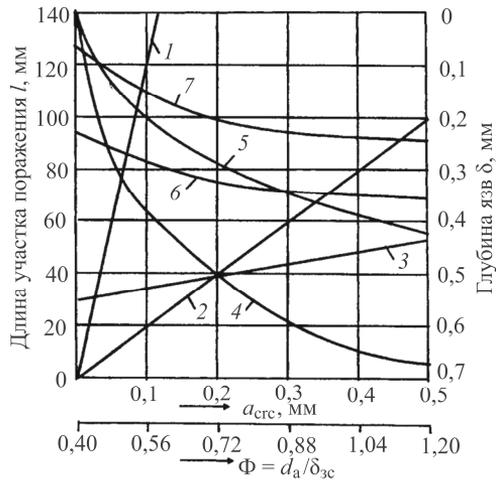


Рис. 3. Показатель коррозионного поражения арматуры класса А-I в зоне влияния поперечных трещин в бетоне: 1 – $l_{\max}(a_{\text{крс}})$; 2 – $l_{\text{cp}}(a_{\text{крс}})$; 3 – $l_{\text{cp}}[\Phi]$; 4 – $\delta_{\max}(l_{\text{крс}})$; 5 – $\delta_{\text{cp}}(l_{\text{крс}})$; 6 – $\delta_{\max}(\Phi)$; 7 – $\delta_{\text{cp}}(\Phi)$

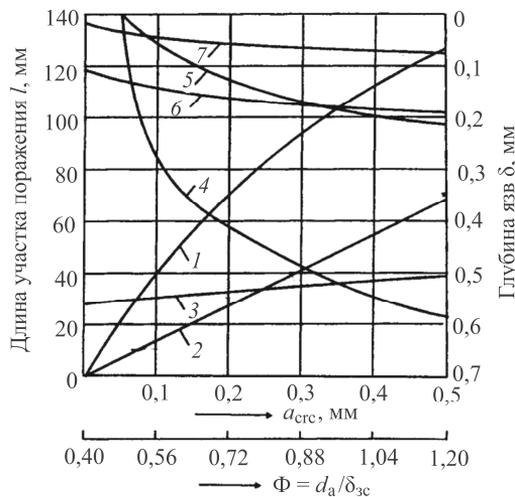


Рис. 4. Показатель коррозионного поражения арматуры класса А-III в зоне влияния поперечных трещин в бетоне: 1 – $l_{\max}(a_{\text{крс}})$; 2 – $l_{\text{cp}}(a_{\text{крс}})$; 3 – $l_{\text{cp}}[\Phi]$; 4 – $\delta_{\max}(l_{\text{крс}})$; 5 – $\delta_{\text{cp}}(l_{\text{крс}})$; 6 – $\delta_{\max}(\Phi)$; 7 – $\delta_{\text{cp}}(\Phi)$

В СНиП 2.03.11–85* и ГОСТ 31384–2008 установлены различные нормативные значения ширины продолжительного раскрытия трещин в железобетонных конструкциях, испытывающих воздействие сильно-агрессивной жидкой среды, соответственно равные $a_{\text{крс}} = 0,10$ мм

и $a_{\text{кр}} = 0,05$ мм. Результаты эксперимента показали, что при действии постоянной нагрузки для арматуры периодического профиля экономически обоснованной нормативной шириной раскрытия поперечных трещин в сильноагрессивной жидкой среде является величина $a_{\text{кр}} = 0,10$ мм.

Данные эксперимента позволили установить функциональную зависимость между средней длиной коррозионного поражения $l_{\text{ср}}$ и средней ее глубиной $\delta_{\text{ср}}$ в каждой из поперечных трещин в момент появления продольных трещин (табл. 2).

Полученные выводы о преобладающем влиянии длины участка коррозии арматуры в зоне влияния поперечных трещин на появление волосяных коррозионных продольных трещин в защитном слое бетона показывают, что в агрессивной жидкой среде, содержащей хлорид-ионы, существенное влияние на появление и раскрытие коррозионных продольных трещин в бетоне оказывает также расстояние между поперечными трещинами на уровне растянутой арматуры $l_{\text{ср}}$. Для выявления минимальных предельно допустимых значений $l'_{\text{ср}}$ проведен статистический расчет вероятностного распределения $l_{\text{ср}}$ в зоне чистого изгиба опытных образцов. Результаты статистической обработки выборок $l_{\text{ср}}$ в зоне чистого изгиба образцов приведены в табл. 3.

Таблица 2

Функциональные зависимости средней длины участка коррозионного поражения арматуры от ее средней глубины

Класс арматуры	Функциональная зависимость $l_{\text{ср}} = f(\delta_{\text{ср}})$	Диаметр арматуры, мм
А-I	$l_{\text{ср}} = (\delta_{\text{ср}} - 50)^{0,83} - 45$	1 ф 10; 1 ф 14; 1 ф 18
А-III	$l_{\text{ср}} = 0,280\delta_{\text{ср}}$	1 ф 10; 1 ф 14; 1 ф 18

Таблица 3

Результаты статистической обработки величины $l_{\text{ср}}$

Класс арматуры	$\Sigma l_{\text{ср}}$, шт	М, мм	σ , мм	А	Е	$\chi^2_{\text{набл}}$	$\chi^2_{\text{кр}}$	$l'_{\text{ср}}$, мм
А-I	215	95,05	21,40	0,208	-0238	7,95	15,50	59,74
А-III	261	77,00	22,90	0,247	-0,641	13,48	14,10	39,20

В табл. 3: M – величина математического ожидания, σ – среднее квадратическое отклонение, A и E – показатели асимметрии и эксцесса теоретического распределения, $(\chi^2_{\text{набл}})$ и $(\chi^2_{\text{кр}})$ – соответственно теоретический и критический критерии согласия Пирсона, $l'_{\text{срс}}$ – минимальное расстояние между поперечными трещинами при уровне значимости $\alpha = 0,95$.

Вероятностное распределение соответствующих выборок $l_{\text{срс}}$ для арматуры класса А-I и А-III имеет нормальный закон, так как $\chi^2_{\text{набл}} < \chi^2_{\text{кр}}$ (рис. 5).

Статистический расчет $l_{\text{срс}}$ показывает уменьшение расстояния между поперечными трещинами для арматуры периодического профиля в 1,53 раза по сравнению с арматурой гладкого профиля, что соответственно может интенсифицировать образование продольных трещин в защитном слое бетона в железобетонных элементах с арматурой периодического профиля по сравнению с арматурой гладкого профиля.

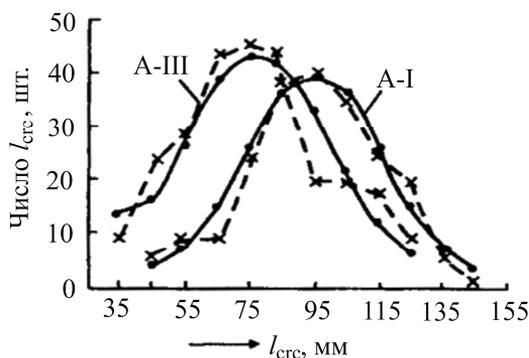


Рис. 5. Графики эмпирических (---) и теоретических (—) статистических распределений выборок $l_{\text{срс}}$ для арматуры классов А-I и А-III

Различная величина деформации стенок бетона поперечных трещин для арматуры гладкого и периодического профиля является основанием для экспериментальных исследований характера коррозионного поражения арматуры различного профиля в коррозионных продольных трещинах бетона.

Для определения соответствующих значений коррозионного поражения арматуры классов А-I и А-III на период до появления и рас-

крытия продольных трещин в защитном слое бетона проведены длительные экспериментальные исследования ненагруженных железобетонных образцов в агрессивной среде. Испытано 18 серий образцов длиной 240 мм, по 6 балочек в каждой. Железобетонные элементы были изготовлены с одним арматурным стержнем класса А-I или А-III, Ø10; 14 и 18 мм, при толщине защитного слоя бетона $a = 15; 25$ и 35 мм. Был использован бетон со следующими техническими характеристиками: класс (В) 15; 22,5 и 30; водоцементное отношение – 0,67; 0,55 и 0,45; эффективный коэффициент диффузии CO_2 в бетоне ($\text{см}^2/\text{с} \cdot 10^{-4}$) – 0,17; 0,53 и 1,8 (табл. 4).

Для ускорения процесса коррозии арматуры в бетонную смесь при изготовлении образцов вводили хлористый натрий в количестве 5 % от массы цемента. Испытание железобетонных элементов проводилось в течение 22 мес. в атмосферных условиях с периодическим, не реже двух раз в сутки, увлажнением водопроводной водой. По интенсивности коррозионного поражения арматуры данные условия характеризуются как сильноагрессивные.

Таблица 4

Технические характеристики железобетонных образцов

Номер серии	Размеры поперечного сечения, мм	Класс арматуры	d , мм	a , мм	$\Phi = d/a$	Коэффициент армирования μ , %
1(2)	100×80	А-I(А-III)	10	35	0,286	1,52
3(4)	100×60	А-I(А-III)	10	25	0,400	1,76
5(6)	100×40	А-I(А-III)	10	15	0,667	2,32
7(8)	100×84	А-I(А-III)	14	35	0,400	2,85
9(10)	100×64	А-I(А-III)	14	25	0,560	3,24
11(12)	100×44	А-I(А-III)	14	15	0,933	4,15
13(14)	100×88	А-I(А-III)	18	35	0,514	4,51
15(16)	100×68	А-I(А-III)	18	25	0,720	5,05
17(18)	100×48	А-I(А-III)	18	15	1,200	6,30

Продольные трещины в защитном слое бетона образцов появлялись в сроки от 2 до 18 мес. Раскрытие трещин шириной 0,10 мм происходило при средней глубине поражения арматуры 300–600 мкм.

При эксплуатации конструкции в слабо- или среднеагрессивной среде, когда процесс коррозии арматуры в бетоне протекает со сравнительно меньшей скоростью, экономически целесообразно увеличить

период до раскрытия продольных трещин в несколько раз за счет изменения показателя $\Phi = d/a$ (отношение диаметра арматуры к толщине защитного слоя бетона) (рис. 6).

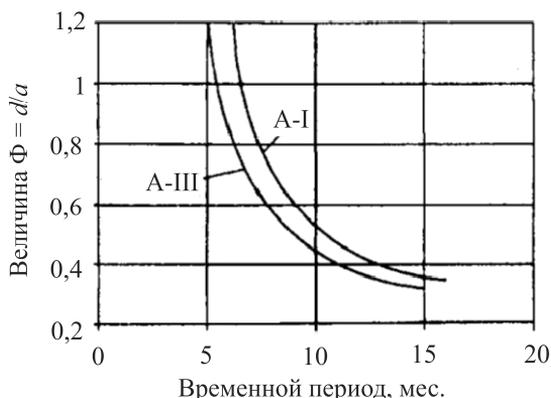


Рис. 6. Влияние показателя $\Phi = d/a$ на временной период до появления продольных трещин в бетоне защитного слоя

Для повышения долговечности конструкций при одновременном снижении расхода арматурной стали экономически целесообразно принимать значение показателя $\Phi = 0,4$. По этой величине определяют соответствующие диаметры стержней арматуры d (6; 8; 10; 12 и 14 мм) для защитного слоя бетона a (15; 20; 25; 30 и 35 мм).

Основной методикой испытания является сбалансированный многофакторный эксперимент, где три независимых параметра внутренних факторов железобетонных элементов принимаются на трех уровнях: d – 10; 14 и 18 мм; a – 15; 25 и 35 мм; B – 15; 22,5 и 30 [8]. Результаты эксперимента позволяют получить уравнения регрессии зависимостей длительности периода до появления продольных трещин (T), средней ($\delta_{\text{ср}}$) и максимальной ($\delta_{\text{макс}}$) глубины поражения арматуры от величин диаметра арматуры (d), толщины защитного слоя (a) и класса бетона (B) (табл. 5).

Результаты функциональных зависимостей показывают, что для максимальных и минимальных значений параметров опытных внутренних факторов для арматуры классов А-I и А-III существенное расхождение наблюдается только в величинах средней глубины поражения $\delta_{\text{ср}}$ – соответственно 38 и 49 %, что свидетельствует о различном характере влияния деформации стенок бетона трещин для арматуры гладкого и периодического профиля в коррозионных продольных трещинах.

Таблица 5

Уравнение функций T (мес.), $\delta_{\text{ср}}$ и δ_{max} (мкм)

Класс арматуры	Уравнение функции T ; $\delta_{\text{ср}}$; $\delta_{\text{max}} = f(d, a, B)$	Для параметров опытных внутренних факторов	
		max	min
A-I	$T = 0,0126211(13,84 - 0,34d)(0,46a)(7,88 + 0,03B)$	18,7	5,6
A-III	$T = 0,0160762(11,00 - 0,21d)(0,38a)(7,00 + 0,04B)$	15,6	5,0
A-I	$\delta_{\text{ср}} = 0,0000059(556 - 14,0d)(141 + 8,8a)(292 + 4,1B)$	457	173
A-III	$\delta_{\text{ср}} = 0,0000049(727 - 16,9d)(216 + 9,5a)(421 + 2,3B)$	733	338
A-I	$\delta_{\text{max}} = 0,0000012(1128 - 15,0d)(559 + 12,8a)(700 + 9,2B)$	1150	722
A-III	$\delta_{\text{max}} = 0,0000013(1100 - 19,6d)(500 + 16,7a)(800 + 4,0B)$	1173	627

Из параметров внутренних факторов наибольшее влияние на соответствующие функциональные зависимости оказывают диаметр арматуры и толщина защитного слоя бетона (табл. 6).

Таблица 6

Влияние внутренних факторов на период до появления продольных трещин и коррозионные поражения арматуры класса А-I и А-III, %

Наименование функции по табл. 5	Класс арматуры	Параметры		
		d	a	B
T	A-I / A-III	41/33	35/60	4/7
S	A-I / A-III	56/39	31/31	13/30
$\delta_{\text{ср}}$	A-I / A-III	52/59	33/33	15/8
δ_{max}	A-I / A-III	41/48	35/42	24/10

Результаты экспериментально-теоретических исследований показали:

– отсутствие в нормативных документах по расчету и защите железобетонных конструкций от коррозии единого системного подхода к назначению нормативной ширины раскрытия нормальных трещин, с учетом деформации их сечений;

– влияние деформации бетона в нормальных трещинах через толщину защитного слоя бетона и диаметр арматуры на ее коррозионное поражение;

– определяющее влияние деформации бетона в поперечных трещинах на коррозионное поражение арматуры периодического профиля по сравнению с арматурой гладкого профиля;

– целесообразность дифференцированного подхода к нормированию ширины раскрытия нормальных трещин для арматуры различного профиля;

– определяющее влияние на долговечность обычных железобетонных элементов, испытывающих воздействие сильноагрессивной жидкой среды, содержащей хлорид-ионы, длины участка коррозионного поражения арматуры в зоне влияния поперечной трещины по сравнению со средней глубиной поражения рабочей арматуры.

Вместе с тем в результате исследований получены математические зависимости значений коррозионного поражения арматуры и периода времени до появления продольных трещин в защитном слое бетона от параметров внутренних факторов железобетонных конструкций для арматуры класса А-I и А-III; выявлена геометрическая зависимость показателя $\Phi=d/a$ (отношение диаметра арматуры d к толщине защитного слоя бетона a) от величины периода до раскрытия коррозионной продольной трещины.

Список литературы

1. Гуца Ю.П. Исследование ширины раскрытия нормальных трещин // Труды НИИЖБ. – М.: НИИЖБ ОНТИ, 1971. – С. 72–97.

2. Трещины в железобетоне и коррозия арматуры / В.М. Москвин, С.Н. Алексеев, Г.П. Вербецкий, В.И. Новгородский. – М.: Стройиздат, 1971. – 168 с.

3. Фартушный А.Г. Влияние деформации сечения бетона на раскрытие трещин железобетонных конструкций // Труды ЦНИЭПсельстроя № 19. Конструкции и технология строительства сооружений силового типа. – М., 1977. – С. 17–25.

4. Мигунов В.Н. Влияние внутренних факторов железобетонных конструкций на коррозионную стойкость арматуры класса А-I и А-III в трещинах бетона // Изв. вузов. Строительство. – 2001. – № 11. – С. 125–129.

5. Мигунов В.Н. Экспериментально-теоретическое исследование коррозии и долговечности железобетонных конструкций с трещинами: монография. – Пенза: Изд-во ПГУАС, 2013. – Ч. 2. – 304 с.

6. Долговечность железобетона в агрессивных средах / С.Н. Алексеев, Ф.М. Иванов, С. Модры [и др.]. – М.: Стройиздат, 1990. – 217 с.

7. Мигунов В.Н. Влияние переменной нагрузки и амплитуды изменения ширины раскрытия трещин на коррозионное поражение арматуры в трещинах железобетонных конструкций // Изв. вузов. Строительство. – 2002. – № 10. – С. 134–137.

8. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента. – М.: Мир, 1972. – С. 185–195.

References

1. Gushcha Iu.P. Issledovanie shiriny raskrytiia normal'nykh treshchin [The study of the width of the disclosure a normal cracks]. *Trudy Nauchno-issledovatel'skogo instituta betona i zhelezobetona*. Moscow, 1971, p. 72-97.

2. Moskvina V.M., Alekseev S.N., Verbeckii G.P., Novgorodskii V.I. Treshchiny v zhelezobetone i korroziia armatury [Cracks in the concrete and corrosion of reinforcement]. Moscow: Strojizdat, 1971, 168 p.

3. Fartushnyi A.G. Vliianie deplanatsii secheniia betona na zakrytie treshchin zhelezobetonnykh konstrukttsii [The impact of warping section of concrete on the closing of cracks in reinforced concrete structures]. *Trudy TsNIEPsel'stroia no. 19. Konstrukttsii i tekhnologiya stroitel'stva sooruzhenii silosnogo tipa*. Moscow, 1977, pp. 17-25.

4. Migunov V.N. Vliianie vnutrennikh faktorov zhelezobetonnykh konstrukttsii na korroziionnuu stoikost' armatury klassa A-I i A-III v treshchinakh betona [The influence of internal factors of reinforced concrete structures on the corrosion of reinforcement class A-I and A-III in concrete cracks]. *Izvestiia vuzov. Stroitel'stvo*, 2001, no. 11, pp. 125-129.

5. Migunov V.N. Eksperimental'no-teoreticheskoe issledovanie korrozii i dolgovechnosti zhelezobetonnykh konstrukttsii s treshchinami. Chast' 2 [Experimental and theoretical study of corrosion and durability of concrete structures with cracks. Part 2]. Penza: Penzenskii gosudarstvennyi universitet arkhitektury i stroitel'stva, 2013, 304 p.

6. Alekseev S.N., Ivanov F.M., Modry S. [et al.]. Dolgovechnost' zhelezobetona v agressivnykh sredakh [Durability of reinforced concrete in aggressive environments]. Moscow: Strojizdat, 1990, 217 pp.

7. Migunov V.N. Vliianie peremennoi nagruzki i amplitudy izmeneniia shiriny raskrytiia treshchin na korroziionnoe porazhenie armatury v treshchinakh zhelezobetonnykh konstrukttsii [The effect of variable load and amplitude changes in crack width on corrosion damage of reinforcement in

cracked concrete structures]. *Izvestiia vuzov. Stroitel'stvo*, 2002, no. 10, pp. 134-137.

8. Shenk Kh. Teoriia inzhenerного eksperimenta [Theory of engineering experiment]. Moscow: Mir, 1972, pp. 185-195.

Получено 14.08.2014

Об авторах

Мигунов Виктор Николаевич (Пенза, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Городское строительство и архитектура» Пензенского государственного университета архитектуры и строительства (440028, г. Пенза, ул. Г. Титова 28, e-mail: viktor5043@rambler.ru).

About the authors

Migunov Viktor Nikolaevich (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Urban Construction and Architecture, Penza State University of Architecture and Construction (28, G. Titov st., Penza, 440028, Russian Federation, e-mail: viktor5043@rambler.ru).