

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-34-43

Фролов Н.В.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

E-mail: frolov_pgs@mail.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕТИКИ РАЗВИТИЯ КОРРОЗИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ БЕТОНА В ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ ПРИ СИЛОВЫХ И СРЕДОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Аннотация. В статье рассмотрены основные аспекты развития коррозионных повреждений бетона в железобетонных конструкциях. Отмечается, что главными количественными показателями таких повреждений выступают глубина и коэффициент повреждения. Их изменение во времени характеризует кинетику развития коррозионных повреждений бетона. Для включения в нормативные документы представляется перспективной кинетическая модель развития коррозионных повреждений В.М. Бондаренко. С целью ее дополнительного обоснования проведены специальные экспериментальные исследования нагруженных образцов железобетонных балок и ненагруженных образцов в виде бетонных кубов и призм при длительных воздействиях сульфат- и хлоридсодержащих агрессивных сред. Получены новые опытные данные по особенностям накопления коррозионных повреждений бетона с учетом влияния различных эксплуатационных факторов. Установлено, что развитие повреждений имеет выраженный затухающий с течением времени характер и зависит от вида эксплуатационной среды, наличия трещин, знака и уровня действующих в бетоне напряжений. При сульфатной коррозии коэффициент повреждения наружного слоя бетона в переходной зоне не принимает значение равное нулю. Сделан вывод о том, что принятая модель достаточно достоверно описывает развитие коррозионных повреждений бетона в указанных агрессивных средах.

Ключевые слова: коррозионное повреждение бетона, изгибаемый железобетонный элемент, кинетика развития, силовое и средовое воздействие, модель.

Введение. Одной из главных причин снижения прочности нормальных сечений и повышения деформативности изгибаемых железобетонных элементов при эксплуатации являются коррозионные повреждения бетона, образующиеся из-за активного воздействия агрессивной среды. Их корректный учет необходим при оценке текущего и прогнозировании дальнейшего технического состояния и, соответственно, при обеспечении надежности и долговечности железобетонных конструкций [1–3].

При коррозии бетона выделяется два основных процесса: диффузионный перенос агрессивных веществ в структуре бетона и их взаимодействие с реакциспособными компонентами цементного камня. Первый процесс отражает глубину коррозионных повреждений, а второй, каким образом и насколько по этой глубине произошло изменение деформативно-прочностных свойств бетона.

Коррозионные повреждения бетона в сечении элемента распределяются следующим образом: наибольшие разрушения образуются у поверхностей, контактирующих с агрессивной средой; далее по мере продвижения коррозионного фронта поврежденность бетона уменьшается и на некоторой глубине сходит на нет. Этот весьма полезный для науки подход позволил установить, что с течением времени в сечении воз-

можно формирование нескольких зон, различающихся степенью деструкции: зона полного разрушения, переходная и неповрежденная зоны, в которых силовое сопротивление бетона соответственно полностью утрачено, частично и полностью сохранено [4, 5].

В работе [6] для изгибаемых железобетонных элементов с коррозионными повреждениями бетона предлагаются две расчетные схемы нормального сечения. В одной из них зона полного разрушения отсутствует (рис. 1, а). Эта схема характеризует как начальные этапы развития коррозии бетона при любых агрессивных средах, так и ее поздние этапы при слабоагрессивных средах. Вторая схема на промежуточных этапах вытекает из первой и характеризует развитие коррозии бетона при сильноагрессивных средах (рис. 2, б). Она имеет все три зоны с различной степенью деструкции. При этом стоит заметить, что здесь коэффициент повреждения наружного слоя бетона K_I^* равен нулю.

Таким образом, главными количественными показателями коррозионных повреждений бетона выступают глубина повреждения, равная глубине распространения агрессивных веществ по сечению элемента, и коэффициент повреждения, определяемый для отдельных слоев бетона как отношение значений прочности на сжатие в конце и в начале наблюдений. Изменение этих

показателей во времени характеризует кинетику развития коррозионных повреждений.

На сегодняшний день для описания кинетики развития коррозионных повреждений бетона в железобетонных конструкциях разработано множество моделей [7], которые можно между собой условно разделить на две группы. В

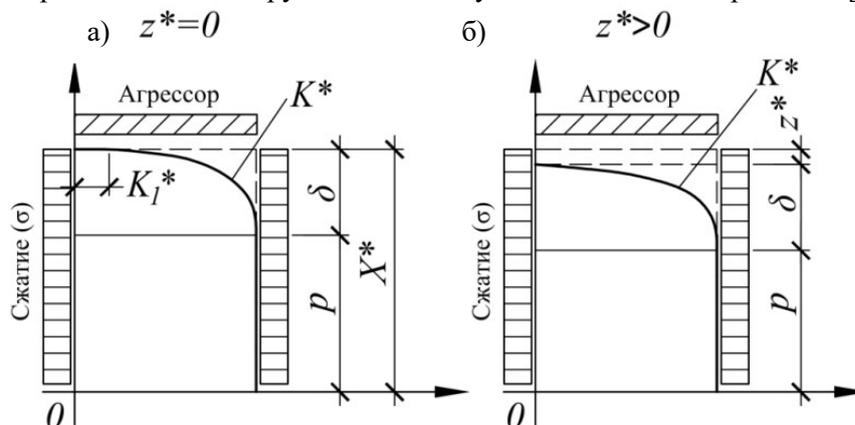


Рис. 1. Расчетные схемы нормального сечения изгибаемого железобетонного элемента с коррозионными повреждениями бетона:

а) зона полного разрушения отсутствует; б) имеются все три зоны с различной степенью деструкции

В ближайшем будущем неизбежно введение в российские нормы проектирования обязательных требований расчета железобетонных конструкций по новой (третьей) группе состояний – по долговечности. Для включения в нормативные документы представляется перспективной модель развития коррозионных повреждений В.М. Бондаренко [6]. В ее методологической основе лежит закон действующих масс Гульдберга-Вааге, что выгодно ее отличает от эмпирических моделей, при этом в своих математических выражениях она значительно проще, чем модели, основанные на законах массопереноса Фика. По данной модели выполнено большое количество теоретических исследований, но объем опытных данных пока недостаточен. В связи с этим были проведены дополнительные экспериментальные исследования развития коррозионных повреждений бетона.

Материалы и методы. Экспериментальные исследования предусматривали испытания образцов железобетонных балок и вспомогательных образцов в виде бетонных кубов и призм.

Железобетонные балки были изготовлены прямоугольного сечения $60 \times 100(h)$ мм с расчетным пролетом $l_0 = 1400$ мм в количестве 27 образцов. Для набора прочности бетона все образцы хранились 28 суток в одном лабораторном помещении с нормальным температурно-влажностным режимом, после чего они были разделены на одну контрольную (11 шт.) и две основные (по 8 шт.) группы балок-близнецов. Далее была проведена первая серия испытаний железобетонных

первой из них учитывается влияние на процессы коррозии конструктивных особенностей, трещин, вида и концентрации агрессивной среды [8–15]. Во второй менее многочисленной группе моделей, помимо всего прочего, учитывается влияние на процессы коррозии знака и уровня действующих в бетоне напряжений [6, 16–20].

балок кратковременной нагрузкой на статический изгиб до разрушения, включавшая три образца из контрольной группы, по результатам которой определена величина разрушающей нагрузки P_u^{BK-0} . Оставшиеся 24 образца были нагружены до уровня $0.6P_u^{BK-0}$ и помещены на заданный промежуток времени в различные эксплуатационные среды. Последующие серии испытаний балок кратковременной нагрузкой до разрушения включали по два образца из каждой группы.

Для определения деформативно-прочностных характеристик бетона вместе с изготовлением каждой группы образцов железобетонных балок заливались бетонные кубы $100 \times 100 \times 100$ мм и призмы $100 \times 100 \times 400$ мм. При наборе прочности и во время длительных испытаний они находились в тех же условиях, что и балки.

При изготовлении всех образцов применялся бетон класса по прочности на сжатие В20. Состав бетонной смеси определялся согласно указаниям ГОСТ 27006-86 и включал: вяжущее на цементной основе – портландцемент марки М500 без добавок производителя EuroCement; крупный заполнитель – гранитный щебень с размером фракции 5–15 мм; мелкий заполнитель – песок средней крупности; воду. Расход указанных сырьевых материалов на приготовление 1 м^3 смеси представлен в табл. 1. Помимо этого, бетонная смесь одной из основных групп образцов содержала хлорид натрия (NaCl) тонкого помола в соотношении до 5 % от массы цемента.

Состав бетонной смеси при изготовлении образцов

Класс бетона по прочности на сжатие	Расход материалов на приготовление 1 м ³ бетонной смеси, кг				Отношение В/Ц
	Цемент (Ц)	Песок (П)	Щебень (Щ)	Вода (В)	
B20	280,2	840,6	1094,9	184,3	0,66

В данных экспериментальных исследованиях основным варьируемым параметром выступала длительность силовых и средовых воздействий на образцы, равная 180, 360, 720 и 1080 суток с начала испытаний.

Образцы контрольной группы находились в том же лабораторном помещении, что и при наборе прочности, т.е. в неагрессивной среде. Образцы первой и второй основных групп находились соответственно в сульфат- и хлоридсодержащих агрессивных средах, которые были искусственно созданы в этом же помещении для накопления коррозионных повреждений бетона. Для этого был изготовлен специальный стенд

(рис. 2), основным элементом которого являлись ванны с жидким электролитом. Одна ванна, в которой находился 2 %-й водный раствор серной кислоты (H_2SO_4), была предназначена для моделирования воздействия на образцы сульфатной агрессивной среды, другая ванна, в которой находилась дистиллированная вода, была предназначена для моделирования воздействия хлоридной агрессивной среды на образцы, содержащих в бетоне добавку NaCl. Образцы каждый день на 15-20 минут опускали в ванны с электролитом для увлажнения, после чего их оттуда извлекали и оставляли высыхать в условиях, при которых хранились образцы контрольной группы.

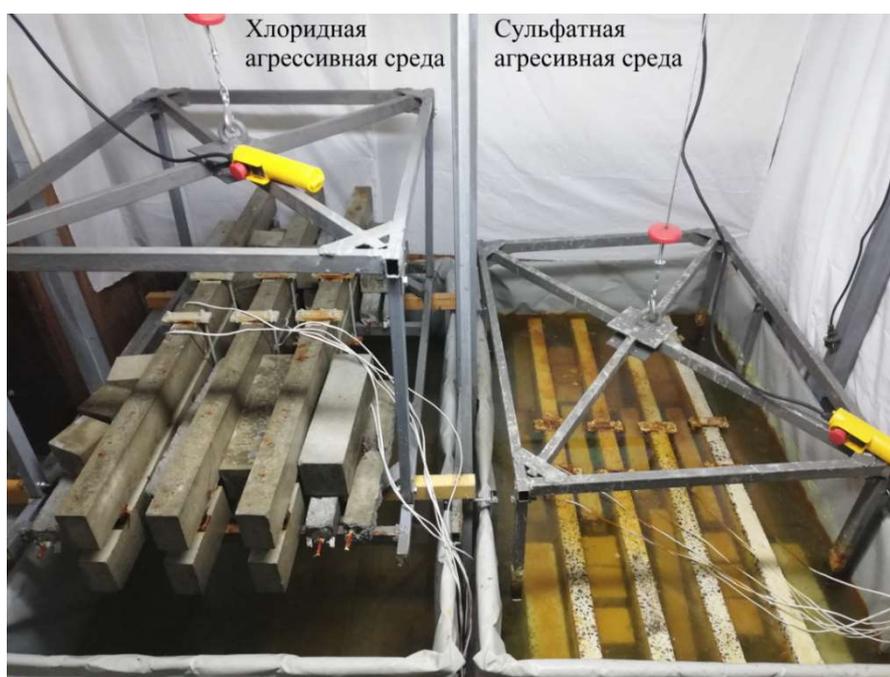


Рис. 2. Стенд для длительных испытаний образцов в агрессивных средах

В ходе длительных испытаний образцов железобетонных балок контролировалось изменение деформаций бетона по высоте сечений в зоне чистого изгиба, высоты и ширины раскрытия трещин, массы, размеров сечений; на всех гранях неразрушающими методами определялась прочность бетона.

Испытания железобетонных балок кратковременной нагрузкой на статический изгиб до разрушения проводились в соответствии с положениями ГОСТ 8829.

Бетонные кубы были использованы для испытаний на сжатие, призмы для испытаний на

сжатие и растяжение при изгибе. Данные испытания образцов бетона производились по методикам ГОСТ 10180-2012 и ГОСТ 24452-80 во время каждой серии испытаний балок нагрузкой до разрушения.

После доведения всех образцов до разрушения индикаторным методом с использованием 1 %-го раствора фенолфталеина устанавливались глубина коррозионных повреждений бетона.

Основная часть. Теоретические исследования. Согласно модели В.М. Бондаренко [6] развитие коррозионных повреждений бетона с течением времени при воздействии агрессивной

среды может проходить по трем кинетическим вариантам:

- Первый – кольматационный [21], иначе затухающий, который характеризуется постепенной остановкой и обнулением коррозионных повреждений бетона в сечении элемента (для эксплуатируемых железобетонных конструкций является основным);

- Второй – фильтрационный, при котором агрессивная среда полностью проходит толщу бетона конструкции и выносит из нее образовавшиеся продукты коррозии;

- Третий – лавинный, при котором агрессивная среда выносит за пределы конструкции компоненты цементного камня и наступает полное разрушение.

Для всех вариантов кинетика неравновесных процессов коррозионных повреждений бетона описывается дифференциальным уравнением [22]:

$$\frac{d\Delta\delta(t, t_0)}{dt} = -\alpha [\Delta\delta(t, t_0)]^m, \quad (1)$$

при этом:

$$f_{m>1}(\alpha, m, t, t_0) = 1 - \left([\Delta\delta(t, t_0)]^{-m+1} + \alpha(-m+1)(t-t_0) \right)^{\frac{1}{-m+1}}. \quad (5)$$

В случае $0 \leq m < 1$ кинетика продвижения коррозионных повреждений имеет фильтрационный характер, при этом, когда $m = 0$:

$$f_{m=0}(\alpha, m, t, t_0) = \frac{\delta(t_0, t_0)}{\delta_{кр}(t_0)} - \alpha(t-t_0). \quad (6)$$

Когда $m < 0$ кинетика продвижения коррозионных повреждений имеет лавинный характер, а выражение $f_{m<0}(\alpha, m, t, t_0)$ определяется по (5), при этом m это целые отрицательные числа.

Характер изменение параметров кинетики коррозионных повреждений α , m , $\delta_{кр}$ зависит от знака и уровня действующих в бетоне напряжений. При сжатии бетона до уровня напряжений, соответствующих началу структурного микротрещинообразования, проницаемость бетона для агрессивной среды снижается до минимума. С дальнейшим ростом уровня сжимающих напряжений до предела длительной прочности на сжатие проницаемость бетона возрастает. При растяжении проницаемость бетона для агрессивной среды возрастает при любых уровнях напряжений.

Экспериментальные исследования. Коррозия бетона, связанная с моделированием воздействия хлоридов, протекала по первому виду согласно классификации В.М. Москвина, при котором на поверхности образцов появлялись высолы растворенных компонентов цементного камня (рис. 3, а). Накопление повреждений проходило

$$\Delta\delta(t, t_0) = \frac{\delta_{кр}(t_0) - \delta(t, t_0)}{\delta_{кр}(t_0)} = 1 - \frac{\delta(t, t_0)}{\delta_{кр}(t_0)}, \quad (2)$$

где: $\Delta\delta$ – относительный дефицит текущего значения глубины коррозионных повреждений δ ; t_0 – время, соответствующее началу наблюдений; t – текущее время; α , m , $\delta_{кр}$ – параметры кинетики развития коррозионных повреждений бетона, получаемые из экспериментальных данных.

Решение уравнения (1) для нахождения текущей глубины коррозионных повреждений представляется в общем виде:

$$\delta(t, t_0) = f_m(\alpha, m, t, t_0) \cdot \delta_{кр}(t_0). \quad (3)$$

В случае $m \geq 0$ кинетика продвижения коррозионных повреждений имеет кольматационный характер, при этом:

– когда $m = 1$:

$$f_{m=1}(\alpha, m, t, t_0) = 1 - \Delta\delta(t, t_0) \cdot e^{-\alpha(t-t_0)}; \quad (4)$$

– когда $m > 1$, при этом m это целые положительные числа:

по схеме без полного разрушения бетона (см. рис. 1, а).

Под воздействием сульфатсодержащей агрессивной среды коррозия бетона проходила по третьему виду, при котором образовавшиеся продукты химических реакций оседали в структуре бетона, что со временем приводило к его полному разрушению (рис. 3, б). Накопление коррозионных повреждений соответствовало расчетной схеме, имеющей три зоны с различной степенью деструкции (см. рис. 1, б). При этом в ходе экспериментальных исследований установлено, что для этой схемы коэффициент повреждения поверхностного слоя бетона K_I^* в переходной зоне не принимает значение равное нулю.

Выявленное может быть объяснено механизмом разрушения бетона при сульфатной коррозии. Сначала образуемые продукты реакций между сульфат-ионами и компонентами цементного камня заполняют структурные пустоты и уплотняют бетон, в связи с этим его прочность несколько растет (до 5-10%); затем с увеличением объема продуктов коррозии создается критическое давление на стенки пор, при котором в бетоне появляются микротрещины, способствующие более свободному проникновению агрессивных веществ; дальнейшее накопление коррозионных продуктов в микротрещинах приводит к разуплотнению бетона и снижению его прочно-

сти. По проведенным оценкам полная утрата бетоном силового сопротивления (самопроизвольное разрушение) происходит при достижении прочности на сжатие величины $(0,15..0,2)R_b$. Та-

ким образом, коэффициент повреждения поверхностного слоя бетона в переходной зоне не может принимать значение равное нулю, как это ошибочно показано на рис. 1, а. Хотя это идет в запас прочности и упрощает схему.

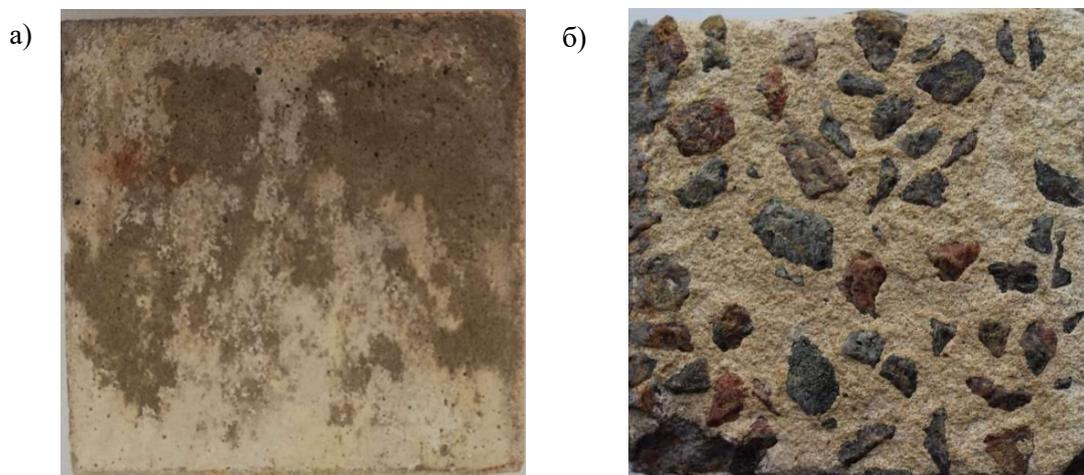


Рис. 3. Коррозионные повреждения бетона:

а) при воздействии хлоридсодержащей среды; б) при воздействии сульфатсодержащей среды

Результаты экспериментальных исследований состояния бетона в железобетонных балках и

ненагруженных вспомогательных образцах в различных эксплуатационных средах представлены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2

Прочностные и деформативные характеристики бетона в различных эксплуатационных средах

Характеристики бетона	Эксплуатационная среда	Длительность силовых и средовых воздействий t , сут.				
		0	180	360	720	1080
Кубиковая прочность на сжатие R , МПа	Неагрессивная	31.0	39.2	39.6	39.9	40.1
	Сульфатная		29.6	28.4	26.9	25.8
	Хлоридная		38.4	38.9	39.1	38.9
Призменная прочность на сжатие R_b , МПа	Неагрессивная	23.8	30.4	30.7	30.9	31.0
	Сульфатная		23.7	22.7	21.5	20.6
	Хлоридная		29.6	29.9	30.0	29.7
Прочность на растяжение R_{bt} , МПа	Неагрессивная	2.3	2.9	2.9	3.0	3.0
	Сульфатная		2.4	2.3	2.2	2.2
	Хлоридная		2.9	2.9	3.0	2.9
Начальный модуль упругости E_b , МПа	Неагрессивная	30000	35500	35500	36000	36000
	Сульфатная		30500	30000	29500	29000
	Хлоридная		34000	34000	34500	34100
Деформации ε_{bR}	Неагрессивная	0.00180	0.00190	0.00193	0.00195	0.00195
	Сульфатная		0.00190	0.00195	0.00200	0.00205
	Хлоридная		0.00195	0.00200	0.00205	0.00210
Мера ползучести $C^*(t, 28) \cdot 10^6$, МПа ⁻¹	Неагрессивная	-	77	90	94	94
	Сульфатная		91	106	110	112
	Хлоридная		79	92	96	96
Деформации усадки $\varepsilon_{ch}(t, 28)$	Неагрессивная	-	0.00018	0.00019	0.00019	0.00019
	Сульфатная		0.00017	0.00018	0.00018	0.00018
	Хлоридная		0.00017	0.00018	0.00018	0.00018

Таблица 3

Характеристики кинетики развития коррозионных повреждений бетона в различных эксплуатационных средах

Характеристики повреждений бетона	Агрессивная среда	Напряжения в бетоне	Длительность силовых и средовых воздействий t , сут.				
			0	180	360	720	1080
Глубина коррозионных повреждений δ , мм (полностью разрушенный бетон)	Сульфатная	$\sigma_{bt} \approx R_{bt}$	0	6.5 (1.8)	10.5 (2.4)	12.5 (2.8)	13 (3.1)
		$\sigma_b = 0$		5 (1.6)	7.5 (2.1)	9 (2.4)	9.5 (2.6)
		$\sigma_b = 0.55R_b$		3.5 (1.4)	5 (1.9)	5.5 (2.2)	5.5 (2.4)
	Хлоридная	$\sigma_{bt} \approx R_{bt}$	0	17	21	22	22.5
		$\sigma_b = 0$		14	17.5	19	19
		$\sigma_b = 0.55R_b$		10	13	14	14
Коэффициент повреждения K^*_1	Сульфатная	-	1	0.78	0.74	0.70	0.67
	Хлоридная	-		0.97	0.97	0.97	0.96

Согласно полученным данным изменение прочностных и деформативных характеристик бетона и развитие в нем коррозионных повреждений с течением времени зависит от вида эксплуатационной среды, наличия трещин, знака и уровня действующих напряжений. Наибольшая деградация свойств бетона наблюдается под воздействием сульфатной агрессивной среды. Максимальная и минимальная глубина коррозион-

ных повреждений бетона установлена соответственно в растянутой и сжатой зонах сечения железобетонных балок. Повреждения бетона в ненагруженных вспомогательных образцах и в балках на уровне положения нейтральной оси оказались приблизительно равными (рис. 4, а, б). Продвижение коррозионного фронта вглубь бетона было равномерным у всех граней, за исключением боковых граней сечений изгибаемых элементов, где по высоте меняется знак и уровень напряжений.

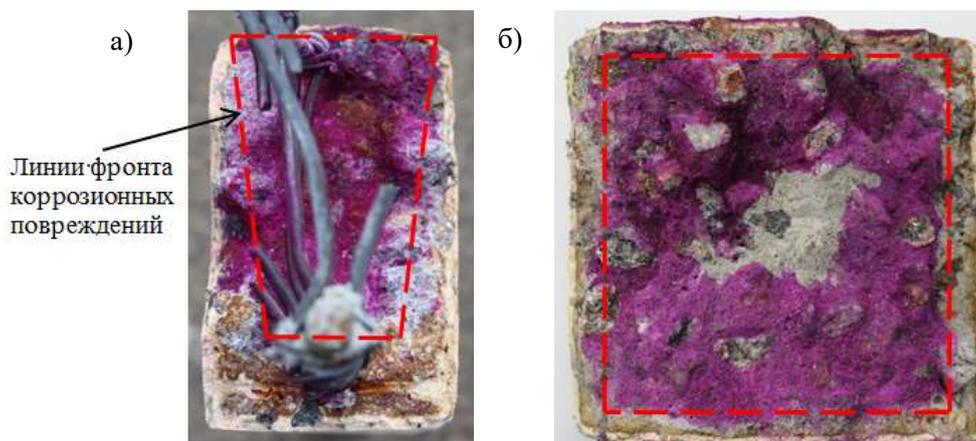


Рис. 4. Характер развития коррозионных повреждений бетона: а) в сечении железобетонной балки; б) в сечении ненагруженного вспомогательного образца

Наличие в растянутой зоне железобетонных балок эксплуатационных нормальных трещин шириной раскрытия до 0,2 мм способствовало проникновению хлоридной агрессии. На проникновение сульфатной агрессии это влияние установлено незначительным ввиду того, что произошло быстрое закупоривание трещин образовавшимися продуктами коррозии бетона.

Численные исследования. Графическое отображение скорости развития коррозионных повреждений бетона с течением времени при различных эксплуатационных средах показано на рис. 5. При этом маркерами обозначены точки, полученные в ходе экспериментальных исследований, а сплошными линиями расчетные кривые,

полученные с использованием формулы (3) при значении параметра кинетики $m = 1$.

Как видно из рисунка полученные опытные данные достаточно хорошо поддаются аппроксимации с помощью принятой расчетной модели.

Следует отметить, что повреждения бетона, накопленные под воздействием сульфатсодержащей среды, при меньшей глубине развития обладают более высокой степенью разрушения, нежели чем повреждения, полученные в хлоридсодержащей среде. При этом оба вида повреждений бетона имеют выраженный затухающий во времени характер.

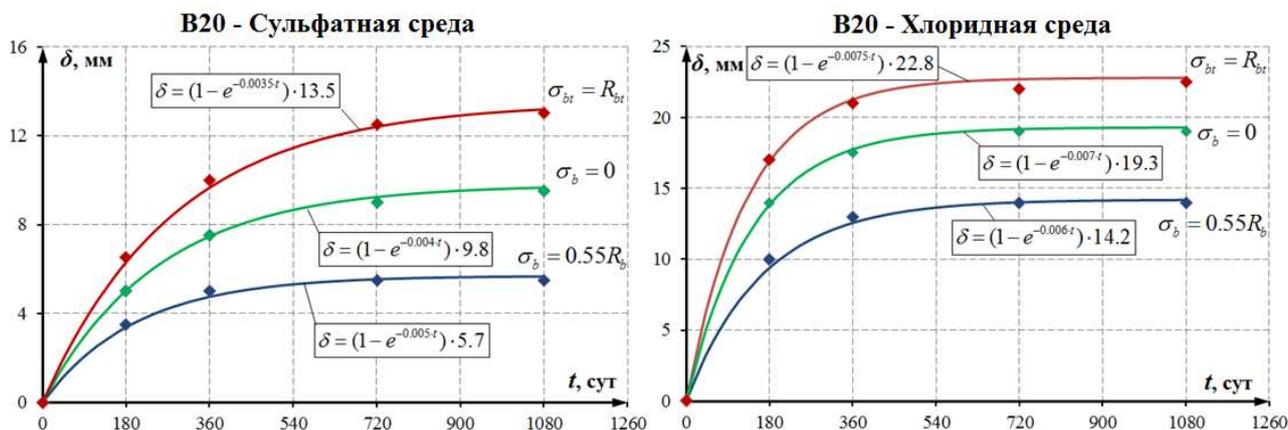


Рис. 5. Развитие коррозионных повреждений бетона с течением времени

С учетом принятого режима увлажнения-высушивание образцов, класса бетона, концентрации агрессивных веществ и выявленных последствий деградации, эксплуатационные среды при длительных испытаниях по степени агрессивного воздействия на бетон можно классифицировать следующим образом: сульфатная – сильноагрессивная; хлоридная – слабоагрессивная.

Выводы:

1. Среди множества моделей, позволяющих описывать развитие коррозионных повреждений бетона с учетом эксплуатационных факторов, для включения в нормативные документы по расчету показателей долговечности железобетонных конструкций рекомендуется кинетическая модель В.М. Бондаренко.

2. На основе экспериментальных исследований получены новые опытные данные по кинетике развития коррозионных повреждений бетона в нагруженных образцах железобетонных балок и ненагруженных образцах бетонных кубов и призм. Развитие повреждений имеет выраженный затухающий с течением времени характер и зависит от вида эксплуатационной среды, наличия трещин, знака и уровня действующих в бетоне напряжений. Установлено, что при сульфатной коррозии коэффициент повреждения наружного слоя бетона в переходной зоне не принимает значение равное нулю – смена переходной зоны на зону с полным разрушением бетона происходит при снижении его прочности до $(0,15..0,2)R_b$.

3. Развитие коррозионных повреждений, имеющих затухающий с течением времени характер, достаточно достоверно поддается описанию с помощью принятой расчетной модели при значении параметра кинетики $m = 1$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Карпенко Н.И., Карпенко С.Н., Ярмаковский В.Н., Ерофеев В.Т. О современных методах обеспечения долговечности железобетонных конструкций // Academia. Архитектура и строительство. 2015. № 1. С. 93–102.
- Бондаренко В.М., Колчунов В.И. Концепция и направления развития теории конструктивной безопасности зданий и сооружений при силовых и средовых воздействиях // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 2. С. 28–31.
- Peng L., Stewart M. Spatial time-dependent reliability analysis of corrosion damage to RC structures with climate change // Magazine of Concrete Research. 2014. Vol. 66. No. 22. Pp. 1–16.
- Zhdanova T., Larionov E. Evaluation of Corrosion Damage of Concrete // IOP Conference Series Materials: Science and Engineering. 2019. Vol. 661. P. 012061.
- Popov V., Plyusnin M., Morozov V., Pukharenko Y. Consideration of variability of concrete characteristics in calculation of reinforced concrete structures // Materials Science Forum. 2016. Vol. 871. Pp. 166–172.
- Бондаренко В.М. Коррозионные повреждения как причина лавинного разрушения железобетонных конструкций // Строительная механика и расчет сооружений. 2009. № 5 (226). С. 13–17.
- Otieno M., Beushausen H., Alexander M. Modelling corrosion propagation in reinforced concrete structures – A critical review // Cement and Concrete Composites. 2011. Vol. 33. No. 2. Pp. 240–245.
- Belda A., Weerdt K., Karla H., Geiker M. Carbonation-induced corrosion: Investigation of the corrosion onset // Construction and Building Materials. 2018. No. 162. Pp. 847–856.
- Zhou Y., Tian H., Sui L., Xing F. Strength deterioration of concrete in sulfate environment: An

experimental study and theoretical modeling // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2015. No. 4. Pp.1–13.

10. Stawiski B., Kania T. Examining the distribution of strength across the thickness of reinforced concrete elements subject to sulphate corrosion using the ultrasonic method // *Materials*. 2019. Vol. 12. No. 16. P. 2519.

11. Silva A., Neves R., Brito J. Statistical modelling of the influential factors on chloride penetration in concrete // *Magazine of Concrete Research*. 2017. Vol. 69. No. 5. Pp. 1–16.

12. Melchers R., Li C., Lawanwisut W. Modelling deterioration of structural behaviour of reinforced concrete beams under saline environment corrosion // *Magazine of Concrete Research*. 2006. Vol. 58. No. 9. Pp. 575–587.

13. Zhao Y., Karimi A., Wong H., Hu B. Comparison of uniform and non-uniform corrosion induced damage in reinforced concrete based on a Gaussian description of the corrosion layer // *Corrosion Science*. 2011. Vol. 53. No. 9. Pp. 2803–2814.

14. Seetharam S., Laloy E., Jivkov A., Yu L. A mesoscale framework for analysis of corrosion induced damage of concrete // *Construction and Building Materials*. 2019. No. 216. Pp. 347–361.

15. Rakhimbayev Sh.M., Tolykina N.M., Kakhaleva E.N. Influence of reactive fillers on concrete corrosion resistance // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 372. P. 032046.

16. Wang H., Lu C., Jin W., Bai Y. Effect of external loads on chloride transport in concrete //

Journal of Materials in Civil Engineering. 2011. Vol. 23. No. 7. Pp. 1043–1049.

17. Fu C., Jin X., Ye H., Jin N. Theoretical and experimental investigation of loading effects on chloride diffusion in saturated concrete // *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2015. Vol. 13. No. 1. Pp. 30–43.

18. Jafarzadeh S., Chen Z., Li S., Bobaru F. A peridynamic mechano-chemical damage model for stress-assisted corrosion // *Electrochimica Acta*. 2019. No 323. P. 134795.

19. Vorechovska D., Somodikova M., Podrouzek J., Lehky D. Concrete structures under combined mechanical and environmental actions: Modelling of durability and reliability // *Computers and Concrete*. 2017. Vol. 20. No. 1. Pp. 99–110.

20. 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. P. 012060.

21. Fedosov S.V., Rumyantseva V.E., Krasilnikov I.V., Konovalova V.S., Evsyakov A.S. Mathematical modeling of the colmatation of concrete pores during corrosion // *Magazine of Civil Engineering*. 2018. Vol. 83. No. 7. Pp. 198–207.

22. Колчунов В.И., Колчунов В.И., Федорова Н.В. Деформационные модели железобетона при особых воздействиях // *Промышленное и гражданское строительство*. 2018. № 8. С. 54–60.

Информация об авторах

Фролов Николай Викторович, аспирант, старший преподаватель кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: frolov_pgs@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила в февраль 2020 г.

© Фролов Н.В., 2020

Frolov N.V.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

E-mail: frolov_pgs@mail.ru

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE KINETICS OF THE DEVELOPMENTAL CORROSIVE DAMAGES OF CONCRETE IN BENT REINFORCED CONCRETE ELEMENTS UNDER FORCE AND ENVIRONMENTAL EFFECTS

Abstract. *The article deals with the main aspects of the development of concrete corrosion damage in reinforced concrete structures. It is noted that the main quantitative indicators of such damages are the depth and the damage factor. Their change in time characterizes the kinetics of the development of concrete corrosion damage. The kinetic model of corrosion damage development by V.M. Bondarenko is presented as perspective for inclusion into normative documents. For the purpose of its additional substantiation special experimental studies of loaded samples of reinforced concrete beams and non-loaded samples in the form of concrete cubes and prisms under prolonged exposure to sulfate- and chloride-containing aggressive media*

have been conducted. New experimental data on peculiarities of accumulation of corrosive damages of concrete taking into account the influence of different operational factors have been obtained. It is established that damage development has a pronounced fading character over time and depends on the type of operating medium, the presence of cracks, the sign and level of stresses acting in the concrete. In case of sulfate corrosion, the damage coefficient of the outer layer of concrete in the transition zone does not take into account the value equal to zero. It is concluded that the adopted model quite reliably describes the development of corrosive damages of concrete in these corrosive environment.

Keywords: concrete corrosion damage, bending reinforced concrete element, development kinetics, force and environmental effects, model.

REFERENCES

1. Karpenko N.I., Karpenko S.N., Yarmakovskiy V.N., Yerofeyev V.T. The modern methods for ensuring of the reinforced concrete structures durability [O sovremennykh metodah obespecheniya dolgovechnosti zhelezobetonnykh konstrukcij]. Academia. Architecture and Construction. 2015. No. 1. Pp. 93–102. (rus)
2. Bondarenko V.M., Kolchunov V.I. The concept and directions of development of the theory of structural safety of buildings and structures under the influence of force and environmental factors [Konceptiya i napravleniya razvitiya teorii konstruktivnoj bezopasnosti zdaniy i sooruzhenij pri silovykh i sredovykh vozdeystviyah]. Industrial and Civil Engineering. 2013. No. 2. Pp. 28–31. (rus)
3. Peng L., Stewart M. Spatial time-dependent reliability analysis of corrosion damage to RC structures with climate change. Magazine of Concrete Research. 2014. Vol. 66. No. 22. Pp. 1–16.
4. Zhdanova T., Larionov E. Evaluation of Corrosion Damage of Concrete. IOP Conference Series Materials: Science and Engineering. 2019. Vol. 661. P. 012061.
5. Popov V., Plyusnin M., Morozov V., Pukharenko Y. Consideration of variability of concrete characteristics in calculation of reinforced concrete structures. Materials Science Forum. 2016. Vol. 871. Pp. 166–172
6. Bondarenko V.M. Corrosive damages as the reason for the avalanche destruction of reinforced concrete structures [Korroziionnye povrezhdeniya kak prichina lavinnogo razrusheniya zhelezobetonnykh konstrukcij]. Structural Mechanics and Analysis of Constructions. 2009. No. 5 (226). Pp. 13–17. (rus)
7. Otieno M., Beushausen H., Alexander M. Modelling corrosion propagation in reinforced concrete structures – A critical review. Cement and Concrete Composites. 2011. Vol. 33. No. 2. Pp. 240–245.
8. Belda A., Weerd K., Karla H., Geiker M. Carbonation-induced corrosion: Investigation of the corrosion onset. Construction and Building Materials. 2018. No. 162. Pp. 847–856.
9. Zhou Y., Tian H., Sui L., Xing F. Strength deterioration of concrete in sulfate environment: An experimental study and theoretical modeling. Advances in Materials Science and Engineering. 2015. No. 4. Pp. 1–13.
10. Stawiski B., Kania T. Examining the distribution of strength across the thickness of reinforced concrete elements subject to sulphate corrosion using the ultrasonic method. Materials. 2019. Vol. 12. No. 16. P. 2519.
11. Silva A., Neves R., Brito J. Statistical modelling of the influential factors on chloride penetration in concrete. Magazine of Concrete Research. 2017. Vol. 69. No. 5. Pp. 1–16.
12. Melchers R., Li C., Lawanwisut W. Modelling deterioration of structural behaviour of reinforced concrete beams under saline environment corrosion. Magazine of Concrete Research. 2006. Vol. 58. No. 9. Pp. 575–587.
13. Zhao Y., Karimi A., Wong H., Hu B. Comparison of uniform and non-uniform corrosion induced damage in reinforced concrete based on a Gaussian description of the corrosion layer. Corrosion Science. 2011. Vol. 53. No. 9. Pp. 2803–2814.
14. Seetharam S., Laloy E., Jivkov A., Yu L. A mesoscale framework for analysis of corrosion induced damage of concrete. Construction and Building Materials. 2019. No. 216. Pp. 347–361.
15. Rakhimbayev Sh.M., Tolypina N.M., Khabkhalova E.N. Influence of reactive fillers on concrete corrosion resistance. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 372. P. 032046.
16. Wang H., Lu C., Jin W., Bai Y. Effect of external loads on chloride transport in concrete. Journal of Materials in Civil Engineering. 2011. Vol. 23. No. 7. Pp. 1043–1049.
17. Fu C., Jin X., Ye H., Jin N. Theoretical and experimental investigation of loading effects on chloride diffusion in saturated concrete. Journal of Advanced Concrete Technology. 2015. Vol. 13. No. 1. Pp. 30–43.
18. Jafarzadeh S., Chen Z., Li S., Bobaru F. A peridynamic mechano-chemical damage model for stress-assisted corrosion. Electrochimica Acta. 2019. No. 323. P. 134795
19. Vorechovska D., Somodikova M., Podrouzek J., Lehky D. Concrete structures under com-

bined mechanical and environmental actions: Modelling of durability and reliability. Computers and Concrete. 2017. Vol. 20. No. 1. Pp. 99–110.

20. 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. P. 012060.

21. Fedosov S.V., Rumyantseva V.E., Krasilnikov I.V., Konovalova V.S., Evsyakov A.S. Mathematical modeling of the colmatation of concrete pores during corrosion. Magazine of Civil Engineering. 2018. Vol. 83. No. 7. Pp. 198–207.

22. Kolchunov V.I., Kolchunov V.I., Fedorova N.V. Deformation models of reinforced concrete under special impacts [Deformacionnye modeli zhelezobetona pri osobyh vozdeystviyah]. Industrial and Civil Engineering. 2018. No. 8. Pp. 54–60. (rus)

Information about the authors

Frolov, Nikolai V. Postgraduate student. E-mail: frolov_pgs@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received in February 2020

Для цитирования:

Фролов Н.В. Экспериментальные исследования кинетики развития коррозионных повреждений бетона в изгибаемых железобетонных элементах при силовых и средовых воздействиях // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 2. С. 34–43. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-34-43

For citation:

Frolov N.V. Experimental studies of the kinetics of the developmental corrosive damages of concrete in bent reinforced concrete elements under force and environmental effects. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No.2. Pp. 34–43. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-34-43