

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» <https://t-s.today>
Russian journal of transport engineering

2018, №2, Том 5 / 2018, No 2, Vol 5 <https://t-s.today/issue-2-2018.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/08SATS218.pdf>

DOI: 10.15862/08SATS218 (<http://dx.doi.org/10.15862/08SATS218>)

Статья поступила в редакцию 14.04.2018; опубликована 08.06.2018

Ссылка для цитирования этой статьи:

Шамшина К.В. Коррозия арматуры в нормальных трещинах железобетонных элементов и конструкций при действии переменной нагрузки // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2018 №2, <https://t-s.today/PDF/08SATS218.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/08SATS218

For citation:

Shamshina K.V. (2018). Corrosion of reinforcement in normal cracks of jelly-concrete elements and structures under the action of a variable load. *Russian journal of transport engineering*, [online] 2(5). Available at: <https://t-s.today/PDF/08SATS218.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/08SATS218

УДК 624.21.012.4(043.3)

Шамшина Ксения Викторовна

ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства», Пенза, Россия
Аспирант кафедры «Строительные конструкции»
E-mail: Kisek90@mail.ru

Коррозия арматуры в нормальных трещинах железобетонных элементов и конструкций при действии переменной нагрузки

Аннотация. Статья является частью диссертационного исследования автора. Приводится методика и результаты длительных экспериментальных исследований коррозии арматуры в нормальных трещинах железобетонных элементов и железобетонных конструкций в жидкой сильноагрессивной хлоридсодержащей среде при действии переменной и постоянной изгибающих нагрузок.

Представлены значения физических характеристик коррозии арматуры в нормальных трещинах железобетонных элементов, полученные после длительных воздействий переменной и постоянной изгибающих нагрузок в присутствии жидкой сильноагрессивной хлоридсодержащей среды. Приведены результаты расчёта статистического вероятностного распределения значений физических характеристик коррозии арматуры в нормальных трещинах железобетонных элементов при переменном их раскрытии.

Показаны относительные значения изменения физических характеристик коррозии арматуры в нормальных трещинах железобетонных конструкций после длительных приложений переменной изгибающей нагрузки по сравнению с постоянной изгибающей нагрузкой в периодически воздействующей жидкой сильноагрессивной хлоридсодержащей среде. Переменная изгибающая нагрузка по сравнению с постоянной изгибающей нагрузкой в нормальных трещинах бетона в полтора раза увеличивает распространение коррозии на арматурном стержне, как по его длине, так и по его периметру, а также максимальную глубину коррозионного поражения арматуры.

Ключевые слова: железобетонные элементы; железобетонные конструкции; жидкая хлоридсодержащая среда; переменная и постоянная изгибающие нагрузки; нормальные

трещины; ширина раскрытия; арматура; коррозия; физические характеристики коррозии арматуры

Введение

В транспортном строительстве сборный железобетон практически заменил металл в мостах с малыми и средними пролетами ($L < 33,5$ м). При проектировании железобетонных конструкций мостов в России нормативный срок их долговечности принимается не менее 80 лет. Однако реальный средний срок службы значительной части пролетных строений составляет 35-45 лет [1, 2, 3].

Фактическая долговечность железобетонных конструкций в промышленном строительстве, рассчитываемых по третьей категории трещиностойкости, в условиях воздействия жидких агрессивных хлоридсодержащих сред определяется коррозионным поражением арматуры в нормальных трещинах бетона, то есть в силовых трещинах, расположенных перпендикулярно продольной оси рабочей арматуры, и во многих случаях оказывается значительно меньше нормативной долговечности несущих железобетонных конструкций из тяжёлого бетона в капитальных зданиях, составляющей 50 лет [4, 5].

Коррозия арматуры в нормальных трещинах бетона начинается из-за локальной депассивации поверхности арматуры в результате нарушения сцепления арматуры с бетоном [6].

В железобетонных конструкциях, эксплуатируемых в агрессивной среде, согласно нормативным документам СП 28.13330-20212 «Защита строительных конструкций от коррозии. Актуализированная редакция СНиП 2.03.11-85» и ГОСТ 31384-2008 «Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии» в определённых пределах допускается коррозионное поражение арматуры, не склонной к коррозионному растрескиванию, в расчётных нормальных трещинах бетона, благодаря наличию затухающего коррозионного процесса на арматуре в нормальных трещинах бетона.

В нормативных документах допускаемое значение коррозионного поражения арматуры обеспечивается соответствующей величиной ограничения ширины раскрытия нормальных трещин $a_{срс}$ в различных агрессивных средах.

Состояние проблемы

Наибольший вклад в изучение механизма коррозии арматуры в нормальных трещинах бетона и обоснование предельных величин их раскрытия внесли В.М. Москвин [6; 7], С.Н. Алексеев [4; 8], В.И. Новгородский [9], Г.П. Вербецкий [10], А. Биби [11], А. Шисль [12], К. Туутти [13].

Однако, исследования коррозии арматуры в зонах влияния нормальных трещин производились на железобетонных образцах с постоянно раскрытыми трещинами, без учёта изменения их ширины во времени, что обеспечивало в них затухающий характер процесса коррозии арматуры.

Нормативные положения в СП 28.13330-20212 и ГОСТ 31384-2008, касающиеся нормирования ширины раскрытия нормальных трещин, были разработаны на основе анализа экспериментальных результатов коррозионного поражения арматуры в неизменяющихся по ширине раскрытия нормальных трещинах, полученных при действии постоянной изгибающей нагрузки. В тоже время в процессе эксплуатации железобетонные конструкции инженерных сооружений и зданий, например, пролётные строения мостовых сооружений и покрытия

зданий, испытывают воздействие переменных нагрузок, главным образом, длительной циклической ступенчатой повторной нагрузки, когда в одном цикле нагружения в течение определенного времени действуют как максимальная, так и минимальная составляющие эксплуатационной нагрузки.

Вероятность возникновения коррозии арматуры в нормальных трещинах бетона при переменном воздействии нагрузки больше, чем при постоянной нагрузке из-за периодического нарушения оксидной пассивирующей пленки на поверхности арматуры в результате механического разрушения околоарматурного слоя бетона и вторичных продуктов коррозии металла [4, 14].

Достижение во времени максимального уровня загрузки железобетонных конструкций при переменных силовых воздействиях может быть плавным или ступенчатым. Ступенчатый вид загрузки от снега, ветра, подвижного автомобильного и железнодорожного транспорта, кранового оборудования, обледенения, а также от технологических силовых воздействий на перекрытиях характеризуется кратковременным переходом нагрузки с одного уровня нагружения на другой.

Переменная ступенчатая повторная изгибающая нагрузка при высоких уровнях загрузки ($\sigma_{\max} \geq R_{bn}$) представляет наибольшую опасность для деформативности железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в неагрессивных условиях, из-за более интенсивного роста остаточных деформаций бетона на полупериодах разгрузки [15, 16, 17, 18, 19].

Режим времени действия ступенчатой повторной изгибающей нагрузки влияет на деформации железобетонных конструкций. Ступенчатая повторная изгибающая нагрузка с длительностью цикла загрузки 1/7-1/14 года, из-за ползучести бетона в сжатой зоне железобетонных конструкций, приводит к изменению знака напряжений в нормальных сечениях, вследствие различия упругих свойств бетона и арматуры. При длительности цикла загрузки 14 и 28 суток в конечных деформациях, а также в деформациях упругого последствия более 50 % их значений представляют деформации ползучести [18].

Наиболее неблагоприятной для работоспособности железобетонных конструкций является переменная ступенчатая повторная изгибающая нагрузка с длительностью цикла загрузки 56 суток, при которой деформации арматуры становятся выше на 10-12 %, чем в железобетонных конструкциях с 28 суточным циклом загрузки, и на 25 % больше деформаций арматуры железобетонных конструкций, нагруженных длительной постоянной изгибающей нагрузкой. Повышенная деформативность объясняется появлением значительных пластических деформаций арматуры, вследствие более интенсивного, чем при постоянной изгибающей нагрузке, перераспределения напряжений с бетона на арматуру, а также снижением модуля упругости бетона сжатой зоны, нарушением сцепления бетона с арматурой и образованием новых нормальных трещин [16, 20].

При воздействии ступенчатых повторных изгибающих нагрузок на железобетонные конструкции период времени действия нагрузки с максимальным уровнем загрузки может быть значительно меньше, чем с минимальным уровнем. Для переменной ветровой нагрузки отношение длительности периода времени действия максимальной нагрузки к общему периоду времени загрузки составляет 1:30 [21].

Несмотря на влияние ступенчатых повторных изгибающих нагрузок на увеличение деформаций железобетонных конструкций в неагрессивных условиях испытания они не принимаются во внимание нормативными документами по расчету железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в неагрессивных условиях.

Из-за значительной трудоёмкости проведения экспериментальных исследований в настоящее время известно ограниченное количество опытных данных по коррозии арматуры в нормальных трещинах бетона при действии длительной переменной изгибающей нагрузки и жидкой хлоридсодержащей среды, определяющих долговечность изгибаемых железобетонных конструкций в реальных условиях эксплуатации по условию возникновения коррозионных продольных трещин в защитном слое бетона [14, 22, 23, 24, 25].

Поэтому проведение экспериментальных исследований на железобетонных элементах и железобетонных конструкциях для изучения коррозионного состояния арматуры в нормальных трещинах бетона при переменном их раскрытии в коррозионно-активных жидких хлоридсодержащих средах представляет научную ценность для выработки рекомендаций по повышению надёжности и долговечности эксплуатирующихся изгибаемых железобетонных конструкций.

Постановка цели и задач экспериментального исследования

Цель экспериментального исследования состоит в определении влияния переменного раскрытия нормальных трещин в изгибаемых железобетонных элементах, испытывающих воздействие сильноагрессивной жидкой хлоридсодержащей среды, на изменение значений физических характеристик коррозионного поражения арматуры, не склонной к коррозионному растрескиванию.

Задачами экспериментального исследования являются:

1. разработка методики длительного испытания изгибаемых железобетонных элементов и железобетонных конструкций в жидкой сильноагрессивной хлоридсодержащей среде;
2. определение влияния длительной ступенчатой повторной изгибающей нагрузки на изменение значений физических характеристик коррозии арматуры в нормальных трещинах бетона при воздействии жидкой сильноагрессивной хлоридсодержащей среды;
3. определение влияния длительной постоянной изгибающей нагрузки на изменение значений физических характеристик коррозии арматуры в нормальных трещинах бетона при воздействии жидкой сильноагрессивной хлоридсодержащей среды;
4. проведение сопоставительного анализа полученных экспериментальных результатов по коррозии арматуры в нормальных трещинах железобетонных элементов при воздействии как переменной, так и постоянной изгибающих нагрузок в присутствии жидкой сильноагрессивной хлоридсодержащей среды.

Методика экспериментального исследования коррозии арматуры в нормальных трещинах железобетонных элементов при действии переменной и постоянной изгибающих нагрузок в присутствии жидкой хлоридсодержащей среды

Длительные опытные исследования физических характеристик коррозии арматуры в нормальных трещинах железобетонных элементов проводятся как при переменном, так и постоянном раскрытии нормальных трещин на железобетонных элементах с размерами 440x100x40 мм, армированных одиночным арматурным стержнем класса B_p500 диаметром 5 мм, содержащих одну нормальную трещину в защитном слое бетона.

Исключение коррозии арматуры вне зоны влияния нормальных трещин при действии жидкой сильноагрессивной хлоридсодержащей среды обеспечивается использованием бетона повышенной плотности, имеющего эффективный коэффициент диффузии CO_2 в бетоне $0,53$ ($\text{см}^2/\text{с} \cdot 10^{-4}$). Опытные образцы изготовлены на портландцементе марки 500, гранитном щебне крупностью 5-10 мм и кварцевом песке с модулем крупности $M_{кр} = 2,2$.

Схема загрузки изгибающей нагрузкой опытного железобетонного элемента, с учётом образования одной нормальной трещины в защитном слое бетона, представлена на рис. 1.

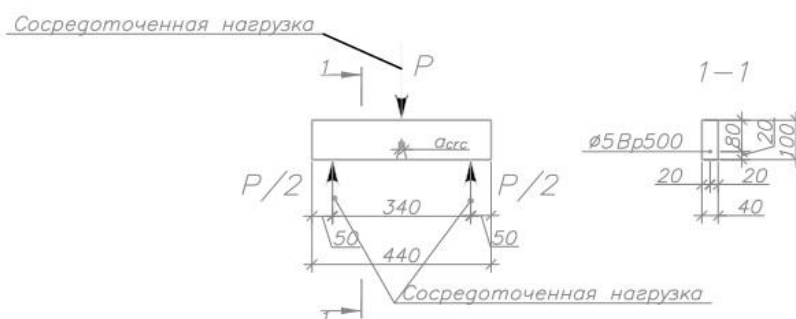


Рисунок 1. Схема загрузки изгибающей нагрузкой опытного железобетонного элемента (составлено автором)

Изгибающая нагрузка обеспечивает получение на железобетонных элементах только одной нормальной трещины в защитном слое бетона с первоначальной шириной раскрытия $a_{срс} = 0,20$ мм, моделирующей предельную нормативную ширину раскрытия нормальных трещин при воздействии жидких агрессивных сред по СП 28.13330.2012 «Защита строительных конструкций от коррозии» Актуализированная редакция СНиП 2.03.11-85*.

Измерение ширины раскрытия нормальных трещин осуществляется индикаторами часового типа с ценой деления 10 мкм, стационарно расположенными в железобетонных элементах на уровне продольной оси арматуры.

Для ускорения процесса коррозии арматурной стали в нормальных трещинах бетона используется водный раствор 3 % NaCl , постоянно увлажняющий арматуру на уровне её центральной продольной оси. Концентрация хлорид – ионов в растворе идентична концентрации хлорид – ионов в морской воде [7] и обладает сильной степенью агрессивности по отношению к железобетонным конструкциям, из-за ускорения коррозии арматуры в 10 раз в нормальных трещинах бетона с $a_{срс} = 0,20$ мм [26].

Длительные экспериментальные исследования коррозии арматуры в железобетонных элементах в отличие от кратковременных электрохимических испытаний, показывающих только качественный характер протекания коррозионного процесса на арматуре, обеспечивают получение количественных значений физических характеристик коррозии арматуры в виде средней и максимальной глубины, длины и площади коррозионного поражения, а также величины гравитационных потерь металла [4].

Опытные исследования физических характеристик коррозии арматуры в нормальных трещинах бетона с первоначальной шириной раскрытия $a_{срс} = 0,20$ мм проводятся в течение 120 суток в лабораторных условиях на тридцати железобетонных элементах при действии как переменной ступенчатой повторной, так и постоянной изгибающих нагрузок при постоянном воздействии на них раствора 3 % NaCl на силовых установках, показанных на рис. 2.



Рисунок 2. Длительные лабораторные испытания железобетонных элементов с одиночными нормальными трещинами в защитном слое бетона при постоянном воздействии жидкой сильноагрессивной хлоридсодержащей среды (фото автора)

Периоды времени действия максимальных и минимальных значений нагрузок в циклах переменных ступенчатых повторных изгибающих нагрузок, прикладываемых к восемнадцати опытным железобетонным элементам, моделируют нагрузки от подвижного транспорта, ветровые и снеговые нагрузки, технологические нагрузки на перекрытия и принимаются в виде следующих режимов времени нагружения – разгружения: кратковременное нагружение – разгружение в течении суток (к); нагружение – разгружение в виде два дня – два дня (2+2) и месяц – месяц (м+м).

При всех режимах прикладываемой опытной переменной нагрузки ширина раскрытия нормальных трещин изменяется с $a_{сгс} = 0,20$ мм на величину $\Delta a_{сгс} = 0,10$ мм. Двенадцать образцов испытывали воздействие постоянной изгибающей нагрузки с соответствующими значениями ширины раскрытия нормальных трещин, принимаемых на каждой половине из них $a_{сгс} = 0,20$ мм и $a_{сгс} = 0,30$ мм.

После окончания длительных испытаний железобетонных элементов определялись физические характеристики коррозии арматуры в виде средней ($\delta_{ср}$) и максимальной глубины коррозии (δ_{max}), длины (ℓ) и площади (s) участка коррозии, гравитационной величины коррозионных потерь металла (m).

Для оценки влияния переменного раскрытия трещин на значения физических характеристик коррозии арматуры в нормальных трещинах бетона устанавливаются закон и характеристики статистического вероятностного распределения, полученных экспериментальных величин.

Длительные опытные исследования влияния переменной ступенчатой повторной изгибающей нагрузки и жидкой сильноагрессивной хлоридсодержащей среды на значения физических характеристик коррозии арматуры в нормальных трещинах бетона и долговечность железобетонных конструкций проводятся на шести прямых моделях железобетонных конструкций до периода времени появления коррозионных продольных трещин в защитном слое бетона, свидетельствующих о предаварийном состоянии экспериментальных железобетонных образцов [4].

На воздействие ступенчатой повторной и постоянной изгибающих нагрузок соответственно испытываются по три опытных образца.

Железобетонные балки с размерами 2000x200x70 мм и несущей арматурой 1 ϕ 14 мм класса А400 имеют толщину защитного слоя бетона $\delta_{30}=25$ мм и изготавливаются из тяжёлого бетона пониженной проницаемости с В/Ц = 0,45 на алитовом среднеалюминатном портландцементе, гранитном щебне фракции 5-10 мм и кварцевом песке с модулем крупности $M_{кр} = 2,2$, затворённых водопроводной водой. В зоне чистого изгиба балок на расстоянии 600 мм поперечная арматура отсутствует.

Схемы армирования опытных изгибаемых железобетонных конструкций и их загрузки показаны на рис. 3, 4 и 5.

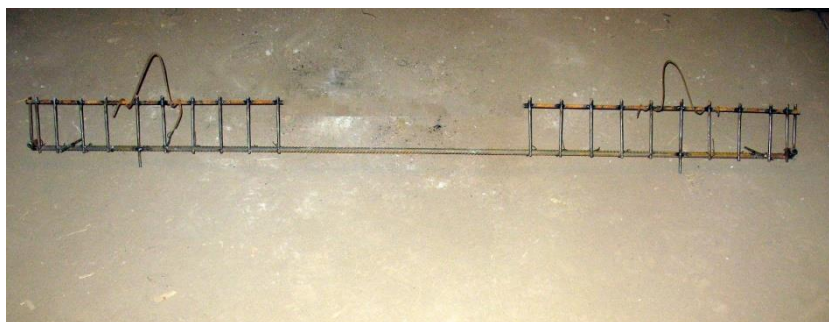


Рисунок 3. Общий вид конструктивного решения плоского арматурного каркаса (фото автора)

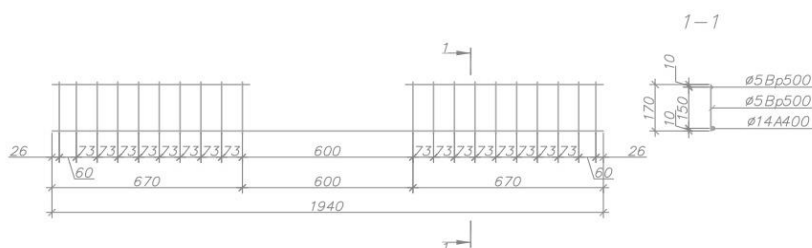


Рисунок 4. Схема конструктивного решения арматурного каркаса (составлено автором)

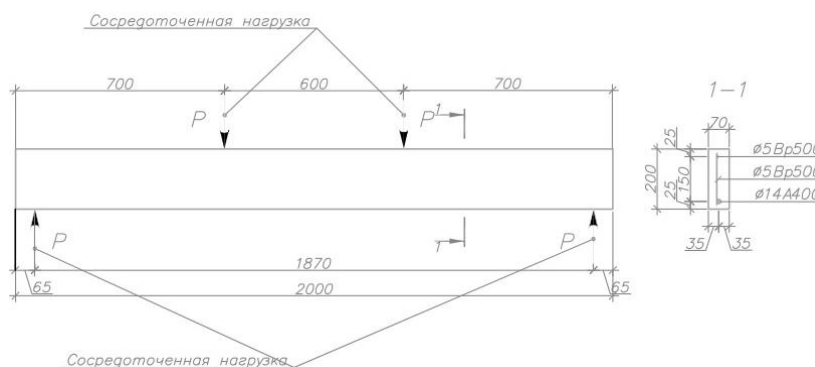


Рисунок 5. Схема загрузки и конструктивного решения изгибаемой железобетонной балки (составлено автором)

Опытные железобетонные балки испытывают воздействие ступенчатой повторной изгибающей нагрузки с продолжительностью цикла нагрузки $t_{ц} = 60$ сут. и относительном времени действия максимальной нагрузки в периоде цикла $t_{мин}/t_{ц} = 0,5$ при максимальном и минимальном значениях переменной нагрузки $M_{max} = 0,70M_p$ и $M_{min} = 0,40M_p$, где M_p – величина разрушающего изгибающего момента. Контрольные железобетонные балки испытывают воздействие постоянной изгибающей нагрузки с уровнем загрузки $M_{max} = 0,7M_p$. Длительные экспериментальные испытания железобетонных конструкций переменной и постоянной изгибающими нагрузками проводятся в лабораторных условиях с

периодическим увлажнением поверхности бетона не менее шести раз в сутки раствором 3 % NaCl на пружинных нагружающих установках, показанных на рис. 6.



Рисунок 6. Длительные лабораторные испытания железобетонных конструкций на переменную и постоянную изгибающие нагрузки в условиях периодического воздействия жидкой сильноагрессивной хлоридсодержащей среды (фото автора)

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

Значения физических характеристик коррозии арматуры в нормальных трещинах бетона при действии как переменной, так и постоянной изгибающих нагрузок после окончания испытаний железобетонных элементов в течение 120 суток при постоянном воздействии на них раствора 3 % NaCl приведены в табл. 1.

Таблица 1

Режим испытания	Ширина раскрытия нормальных трещин a_{cr} , мм	Глубина коррозии: средняя (максимальная) δ_{cp} (δ_{max}), мкм	Длина участка коррозии l , см	Площадь участка коррозии S , см ²	Величина коррозионных потерь m , г
К	0,30/0,20	80 (184)	1,5	0,9	0,040
2+2	0,30/0,20	76 (139)	1,3	1,0	0,020
м+м	0,30/0,20	79 (157)	1,3	0,8	0,030
пост	0,20	42 (115)	0,7	0,5	0,015
пост	0,30	69 (135)	0,9	0,7	0,020

Составлено автором

Представленные в таблице 1 экспериментальные значения физических характеристик коррозии арматуры показывают более активный коррозионный процесс на арматуре при переменном раскрытии трещин, по сравнению с постоянным. Переход изгибающего нагружения от постоянного к переменному виду приводит к увеличению значений физических характеристик коррозионного поражения арматуры, составляющих для $a_{cr} = 0,20$ мм и $a_{cr} = 0,30$ мм:

- для средней глубины коррозии 1,86 и 1,13 раза;
- для максимальной глубины коррозии 1,39 и 1,19 раза;
- для длины участка коррозии 1,96 и 1,52 раза;
- для площади участка коррозии 1,80 и 1,29 раза;
- для величины коррозионных массовых потерь металла 2,00 и 1,5 раза.

Статистические величины физических характеристик коррозии арматуры, полученных при переменном раскрытии нормальных трещин на восемнадцати железобетонных элементах, имеют нормальный закон распределения.

Значения вероятности (p), математического ожидания (M), доверительных верхних (ВИ), с учётом вероятностного обеспечения $p = 0,95$, и нижних (НИ), с учётом вероятностного обеспечения $p = 0,05$, интервалов для соответствующих физических характеристик коррозионного поражения арматуры: δ_{cp} , $\delta_{(max)}$, ℓ , S и m представлены в табл. 2.

Таблица 2

Статистические характеристики	δ_{cp} (δ_{max}), мкм	$\ell(S)$, см; (см ²)	m , г
P	0,96 (0,96)	0,97 (0,96)	0,95
M	78 (160)	1,37 (0,90)	0,030
ВИ	89 (185)	1,53 (1,03)	0,034
НИ	66 (135)	1,22 (0,76)	0,026

Составлено автором

Период времени испытания железобетонных балок составил полтора года. При появлении в защитном слое бетона опытных образцов, испытывающих воздействие переменной изгибающей нагрузки, волосяных коррозионных продольных трещин с $a_{стр} = 15$ мкм экспериментальные исследования были завершены. При этом долговечность железобетонных конструкций с несущей арматурой класса А400 диаметром $\phi 14$ мм, эксплуатирующихся в жидкой периодически воздействующей слабоагрессивной хлоридсодержащей среде, с учётом появления коррозионных продольных трещин в защитном слое бетона, составляет 20 лет [23].

Геометрические функциональные зависимости значений характеристик коррозионного поражения арматуры: длины (ℓ), средней (δ_{cp}) и максимальной (δ_{max}) глубины коррозии, относительной величины участка коррозионного поражения по периметру стержня (P) в зависимости от ширины раскрытия нормальных трещин на опытных железобетонных балках, испытанных как при воздействии переменной ступенчатой повторной, так и постоянной изгибающих нагрузок показаны на рис. 7.

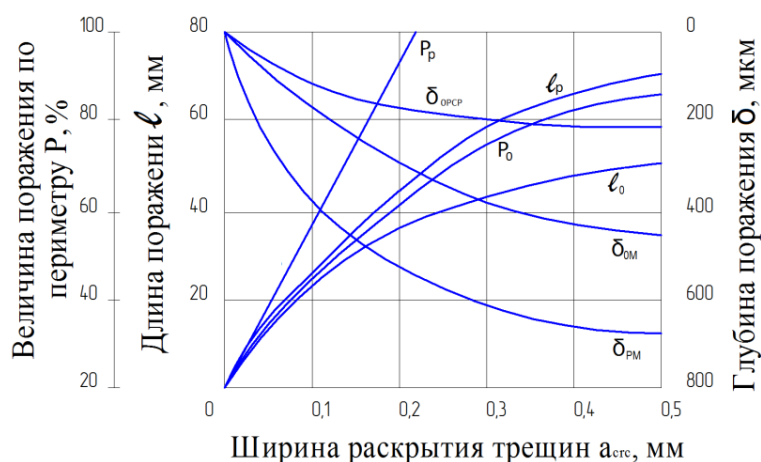


Рисунок 7. Изменение характеристик коррозионного поражения арматуры в нормальных трещинах бетона в зависимости от ширины их раскрытия, где: P , ℓ , δ_{cp} , δ_m – соответственно относительная величина коррозионного поражения по периметру стержня; длина, средняя и максимальная глубина коррозии; Индексы означают: O и P – соответственно постоянное и переменное воздействие изгибающей нагрузки; S , M – соответственно средние и максимальные значения (составлен автором)

Данные на рисунке 7 показывают, что переменная ступенчатая повторная изгибающая нагрузка более, чем в полтора раза увеличивает максимальную глубину коррозионного поражения арматуры класса А400 диаметром $\phi 14$ мм и длину распространения коррозии как вдоль стержня, так и по его периметру, по сравнению с действием постоянной изгибающей нагрузки в нормальных трещинах $a_{crc} = 0,20$ мм при средней глубине коррозии $\delta_{cp} = 180$ мкм.

Заключение

Действие циклических изгибающих нагрузок на железобетонные элементы при постоянном воздействии жидкой сильноагрессивной хлоридсодержащей среды приводит к увеличению значений физических характеристик коррозионного поражения арматуры в нормальных трещинах с $a_{crc} = 0,20$ мм более, чем в полтора раза по сравнению с постоянным нагружением изгибающей нагрузкой.

Ступенчатая повторная изгибающая нагрузка в присутствии жидкой сильноагрессивной хлоридсодержащей среды вызывает появление коррозионных продольных трещин в защитном слое бетона железобетонных конструкций при средней глубине коррозии $\delta_{cp} = 180$ мкм на арматуре класса А400 диаметром $\phi 14$ мм в нормальных трещинах с $a_{crc} = 0,20$ мм и одновременно более, чем в полтора раза увеличивает распространение коррозии как по длине, так и по периметру стержня, а также максимальную глубину коррозионного поражения арматуры, по сравнению с постоянной изгибающей нагрузкой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маринин А.Н. Сопротивление железобетонных конструкций воздействию хлоридной коррозии и карбонизации / А.Н. Маринин, Р.Б. Гарибов, И.Г. Овчинников. – Саратов: Рата, 2008. – 261 с.
2. Овчинников И.Г. Моделирование поведения железобетонных элементов конструкций в условиях воздействия хлоридсодержащих сред / И.Г. Овчинников, В.В. Раткин, А.А. Землянский. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2000. – 232 с.
3. Ovchinnikov I.G. The development of bridge structures maintenance strategies / I.G. Ovchinnikov, V.V. Ratkin // Concrete bridges. Proceedings of the 6th RILEM International Conference EXPERTCENTRUM-Bratislava, 1997. P. 28-33.
4. Долговечность железобетона в агрессивных средах / С.Н. Алексеев, Ф.М. Иванов, С. Модры, П. Шиссль // Совм. Изд СССР – ЧССР – ФРГ. – М.: Стройиздат, 1990. – 320 с.
5. Ovchinnikov I.G., Inamov R.R. Modeling of Kinetics Formation of Cracks in Concrete Around Corrosion Core of a Reinforcement // Concrete and concrete structures: Int. Conf. – Kovice, 1998. – P. 87-88.
6. Москвин В.М. Трещины в железобетоне и коррозия арматуры [Текст] / В.М. Москвин, С.Н. Алексеев, Г.П. Вербецкий, В.И. Новгородский. – М.: Стройиздат, 1971. – 144 с.
7. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты / В.М. Москвин, Ф.М. Иванов, С.Н. Алексеев, Е.А. Гузев. – М.: Стройиздат, 1980. – 536 с.
8. Алексеев С.Н. Коррозия и защита арматуры железобетонных конструкций // дис. ... д-ра техн. наук. – М.: НИИЖБ, 1970. – 283 с.

9. Новгородский В.И. Исследование влияния трещин в бетоне на коррозию арматуры железобетонных конструкций // дис. ... канд. техн. наук. – М.: НИИЖБ, 1964. – 133 с.
10. Вербецкий Г.П. Механизм и кинетика коррозии бетона и арматуры в гидротехнических сооружениях, эксплуатируемых с допущением трещинообразования // дис. ... д-ра техн. наук. – Тбилиси, 1979. – 409 с.
11. Beeby A.W. The Prediction crack Widths in Hardened Concrete. The Structural Engineering (London), v. 57A, No. 1, 1979. – P. 9-17.
12. Schiessl Peter. Zur Frage der Zulässigen Rissbreite und der Enforderlichen Betondeckung im Stahlbetonbau unter besonderer Berücksichtigung der Karbonatisierung des Betons, Bulletin №. 255, Deutscher fur Stahlbeton. – Berlin: 1976. – 175 p.
13. Tuutti K., Ryosti Cracs and Corrosion. CBI Research №6:78, Swedish Cement and Concrete Research Inst. Stockholm, 1978. – pp. 52.
14. Мигунов, В.Н. Ширина раскрытия трещин в изгибаемых железобетонных элементах при воздействии переменной нагрузки и агрессивной среды // автореф. дис. ... канд. наук. – М.: НИИЖБ, 1985. – 22 с.
15. Александровский С.В. Ползучесть бетона при периодических воздействиях / С.В. Александровский, В.Я. Багрий. – М.: Стройиздат, 1970. – С. 5, 16-17. – 167с.
16. Барашиков А.Я. Исследование длительной работы железобетонных конструкций при переменных нагрузках // дис. ... д-ра техн. наук. – Киев: КИСИ, 1977. – 297 с.
17. Гордеева Т.Ф. Исследование изгибаемых железобетонных элементов при повторных статических нагружениях // дис. ... канд. техн. наук. – Киев: НИИСК, 1970. – 208 с.
18. Крамарчук П.П. Исследование деформации бетона и изгибаемых железобетонных элементов под действием длительных повторных нагрузок// дис. ... канд. техн. наук. – Киев: КИСИ, 1971. – 162 с.
19. Мурашко Л.А. Исследование напряженно деформированного состояния железобетонных рам при длительных постоянных и периодических нагрузках// дис. ... канд. техн. наук. – Киев: КИСИ, 1974. – 195 с.
20. Юсупов З.Ю. Исследование напряжённо-деформированного состояния преднапряжённных балок их высокопрочного бетона при длительных переменных нагрузках высокой интенсивности // дис. ... канд техн наук. – Киев, 1977. – 209 с.
21. Подобед Д.П. Исследование деформативности и трещиностойкости железобетонных изгибаемых элементов кольцевого сечения с прядевой арматурой при длительных и кратковременных загрузениях // дис. ... канд. техн. наук. – Минск, 1976. – 186 с.
22. Мигунов В.Н., Овчинников И.Г., Шамшина К.В. Влияние жидких хлоридсодержащих сред и переменной эксплуатационной нагрузки на деформационные свойства железобетонных элементов и характеристики коррозионного поражения арматуры в расчётных поперечных трещинах бетона // Интернет журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» том 7, №6. (2015) <http://naukovedenie.ru/PDF/11KO615> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

23. Мигунов В.Н. Влияние поперечных и продольных трещин на долговечность, деформационные и прочностные свойства обычных железобетонных элементов в различных агрессивных условиях / В.Н. Мигунов, Ю.П. Скачков, И.И. Овчинников // Бетон и железобетон. – 2012. – №3 – С. 20-23.
24. Мигунов В.Н., Овчинников И.Г., Шамшина К.В. Методика, результаты длительных экспериментальных и теоретических исследований кинетики образования коррозионных трещин на прямых моделях железобетонных конструкций // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 7, №3 (2015) <http://naukovedenie.ru/PDF/147TVN315> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.
25. Шамшина К.В., Мигунов В.Н. Методика и результаты длительных экспериментальных исследований кратковременной прочности и жёсткости прямых моделей железобетонных конструкций с коррозионными продольными трещинами в защитном слое бетона // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» №5(24). (2014) <http://naukovedenie.ru/PDF/10K0514> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.
26. Мигунов В.Н. Влияние переменной нагрузки и амплитуды изменения ширины раскрытия трещин на коррозионное поражение арматуры в трещинах железобетонных конструкций / В.Н. Мигунов // Изв. вузов. Строительство. – 2002. – № 10. – С. 134-137.

Shamshina Ksenia Viktorovna

Penza state university of architecture and construction, Penza, Russia
E-mail: Kisek90@mail.ru

Corrosion of reinforcement in normal cracks of jelly-concrete elements and structures under the action of a variable load

Abstract. The article is a part of the author's dissertation research. The technique and results of long-term experimental studies of corrosion of reinforcement in normal cracks of reinforced concrete elements and reinforced concrete structures in a liquid highly aggressive chloride-containing medium under the action of variable and constant bending loads are presented.

The values of physical characteristics of reinforcement corrosion in normal cracks of reinforced concrete elements, obtained after long-term effects of variable and constant bending loads in the presence of liquid highly corrosive chloride-containing medium, are presented. The results of calculation of statistical probability distribution of values of physical characteristics of corrosion of reinforcement in normal cracks of reinforced concrete elements at their variable opening are given.

The relative values of changes in the physical characteristics of the reinforcement corrosion in normal cracks of jelly-concrete structures after long-term applications of the bending load are shown in comparison with the constant bending load in the periodically acting liquid highly aggressive chloride-containing medium. The variable bending load in comparison with the constant bending load in normal cracks of concrete increases by half the corrosion spread on the reinforcing bar, both in its length and along its perimeter, as well as the maximum depth of corrosion damage to the reinforcement.

Keywords: Reinforced concrete elements; reinforced concrete structures; liquid chloride-containing medium; variable and constant bending loads; normal cracks; opening width; reinforcement; corrosion; physical characteristics of reinforcement corrosion

REFERENCES

1. Marinin A.N., Garibov R.B., Ovchinnikov I.G. (2008). Soprotivlenie zhelezobetonnym konstruktsij vozdeystviyu hloridnoj korrozii i karbonizatsii. [*Resistance of reinforced concrete structures the effects of chloride corrosion and carbonization.*] Saratov: Rata, p. 261.
2. Ovchinnikov I.G., Ratkin V., Zemlyansky A.A. (2000). Modelirovanie povedeniya zhelezobetonnih `elementov konstruktsij v usloviyah vozdeystviya hloridsoderzhaschih sred. [*Modeling of behavior of reinforced concrete structural elements under the influence of chloride-containing media.*] Saratov: Sarat. state tech. UN-t, p. 232.
3. Ovchinnikov I.G., Ratkin V.V. (1997). The development of bridge structures maintenance strategies. *Concrete bridges*, pp. 28-33.
4. Alekseev S.N., Ivanov F.M., Modra S., Sissl P. (1990). Dolgovechnost' zhelezobetona v agressivnyh sredah. [*Durability of concrete in aggressive environments.*] Moscow: Stroyizdat, p. 320.

5. Ovchinnikov I.G., Inamov R.R. (1998). Modeling of Kinetics Formation of Cracks in Concrete Around Corrosion Core of a Reinforcement. *Concrete and concrete structures*, pp. 87-88.
6. Moskvina V.M., Alekseev S.N., Verbitsky G.P., Novgorodskij V.I. (1971). Treschiny v zhelezobetone i korrozija armatury. [*Cracks in the concrete and corrosion of reinforcement.*] Moscow: Stroyizdat, p. 144.
7. Moskvina V.M., Ivanov F.M., Alekseev S.N., Guzeev E.A. (1980). Korrozija betona i zhelezobetona, metody ih zaschity. [*Corrosion of concrete and reinforced concrete, methods of their protection.*] Moscow: Stroyizdat, p. 536.
8. Alekseev S.N. (1970). Korrozija i zaschita armatury zhelezobetonnyh konstruksij. [*Corrosion and protection of reinforced concrete reinforcement.*] Moscow: NIIZHB, p. 283.
9. Novgorod V.I. (1964). Issledovanie vlijaniya treschin v betone na korroziju armatury zhelezobetonnyh konstruksij. [*Research of influence of cracks in concrete on corrosion of reinforcement of concrete structures.*] Moscow: NIIZHB, p. 133.
10. Verbitsky G.P. (1979). Mehanizm i kinetika korrozii betona i armatury v gidrotehnicheskikh sooruzhenijah, `ekspluatiruemyh s dopuscheniem treschinoobrazovaiija. [*Mechanism and kinetics of corrosion of concrete and reinforcement in hydraulic structures operated with the admission of cracking.*] Tbilisi, p. 409.
11. Beeby A.W. (1979). The Prediction crack Widths in Hardened Concrete. *The Structural Engineering*, (57A), pp. 9-17.
12. Schiessl Peter. (1976). Zur Frage der Zulassigen Rissbreite und der Enforderlichen Betondeckung im Stahlbetonbau unter besonderer Berucksichtigung der Karbonatisierung des Betons. [*On the question of the permissible crack width and the required concrete cover in reinforced concrete construction with particular reference to the carbonation of the concrete.*] Berlin: Bulletin №. 255, Deutscher fur Stahlbeton, p. 175.
13. Tuutti K., Ryosti Cracks and Corrosion. (1978). *CBI Research №6:78*. Swedish Cement and Concrete Research Inst. Stockholm, p. 52.
14. Migunov V.N. (1985). Shirina raskrytija treschin v izgibaemyh zhelezobetonnyh `elementah pri vozdejstvii peremennoj nagruzki i agressivnoj sredy. [*Width of crack opening in the bent reinforced concrete elements under the influence of variable load and aggressive environment.*] Moscow: NIIZHB, p. 22.
15. Alexander S.V., Bagram V.J. (1970). Polzuchest' betona pri periodicheskikh vozdejstvijah. [*Creep of concrete under periodic influences.*] Moscow: Stroyizdat, p. 167.
16. Barashikov A.Y. (1977). Issledovanie dlitel'noj raboty zhelezobetonnyh konstruksij pri peremennyh nagruzkah. [*Study of long-term work of reinforced concrete structures under variable loads.*] Kiev: Institute for strategic studies, p. 297.
17. Gordeeva T.F. (1970). Issledovanie izgibaemyh zhelezobetonnyh `elementov pri povtornyh staticheskikh nagruzhenijah. [*Study of bent reinforced concrete elements under repeated static loads.*] Kyiv: NIISK, p. 208.

18. Kramarchuk P.P. (1971). Issledovanie deformatsii betona i izgibaemyh zhelezobetonnyh `elementov pod dejstviem dlitel'nyh povtornyh nagruzok [Investigation of the deformation of concrete and bendable concrete elements under the effect of prolonged repeated loads.] Kyiv: Kishi, p. 162.
19. Murashko L.A. (1974). Issledovanie naprjazhenno deformirovannogo sostojanija zhelezobetonnyh ram pri dlitel'nyh postojannyh i periodicheskikh nagruzkah. [Investigation of the stress-strain state of reinforced concrete frames under long-term constant and periodic loads.] Kyiv: Kishi, p. 195.
20. Yusupov Z.Yu. (1977). Issledovanie naprjazhjonno-deformirovannogo sostojanija prednaprjazhjonnyh balok ih vysokoprochnogo betona pri dlitel'nyh peremennyh nagruzkah vysokoj intensivnosti. [Study of stress-strain state of prestressed beams of their high-strength concrete under long-term variable loads of high intensity.] Kiev, p. 209.
21. Podobed D.P. (1976). Issledovanie deformativnosti i treschinostjivosti zhelezobetonnyh izgibaemyh `elementov kol'tseвого sechenija s prjadevoj armaturoj pri dlitel'nyh i kratkovremennyh zagruzenijah. [Study of deformation and crack resistance of reinforced concrete bending elements of the annular section with a strand reinforcement at long-term and short-term loads.] Minsk, p. 186.
22. Migunov V.N., Ovchinnikov I.G., Shamshina V.K. (2015). The influence of the liquid floridageorgia environments and variable operational load on the deformation properties of reinforced concrete elements and characteristics of corrosion damage of rebar in the calculation of transverse cracking of concrete. *Naukovedenie*, [online] 6(7), p. 18. Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/11KO615> (in Russian).
23. V.N. Migunov, Skachkov Yu.P., Ovchinnikov I.I. (2012). Influence of transverse and longitudinal cracks on the durability, deformation and strength properties of conventional concrete elements in various aggressive conditions. *Concrete and reinforced concrete*, 3, pp. 20-23. (in Russian).
24. Migunov V.N., Ovchinnikov I.G., Shamshina V.K. (2015). The methodology, the results of long-term experimental and theoretical studies of the kinetics of corrosion cracks on direct models of reinforced concrete structures. *Naukovedenie*, [online] 3(7), p. 19. Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/147TVN315> (in Russian).
25. Shamshina K.V., Migunov V.N. (2014). The Methodology and results of long-term experimental studies of short-term strength and stiffness of direct models of reinforced concrete structures with corrosion longitudinal cracks in the protective layer of concrete. *Naukovedenie*, [online] 5(24), p. 11. Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/10K0514> (in Russian).
26. Migunov V.N. (2002). Influence of variable load and amplitude of the crack opening width change on the corrosion damage of reinforcement in cracks of reinforced concrete structures. *Izv. higher educational. Construction*, 10, pp. 134-137. (in Russian).