

Интернет-журнал «Наукovedение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/>

Том 7, №6 (2015) <http://naukovedenie.ru/index.php?p=vol7-6>

URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/11KO615.pdf>

DOI: 10.15862/11KO615 (<http://dx.doi.org/10.15862/11KO615>)

УДК 60

Мигунов Виктор Николаевич

ФГБОУ ВПО «Пензенский Государственный университет архитектуры и строительства»
Россия, Пенза
Доцент
Кандидат технических наук
E-mail: Viktor5043@rambler.ru

Овчинников Игорь Георгиевич

ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»
Россия, Пермь
ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»
Россия, Саратов
ФГБОУ ВПО «Московский автомобильно-дорожный
государственный технический университет (МАДИ)»
Филиал в г. Сочи
Профессор
Доктор технических наук
E-mail: BridgeSar@mail.ru

Шамшина Ксения Викторовна

ФГБОУ ВПО «Пензенский Государственный университет архитектуры и строительства»
Россия, Пенза
Аспирант
E-mail: Kisek90@mail.ru

Влияние жидких хлоридсодержащих сред и переменной эксплуатационной нагрузки на деформационные свойства железобетонных элементов и характеристики коррозионного поражения арматуры в расчётных поперечных трещинах бетона

Аннотация. Железобетонные конструкции в процессе эксплуатации подвергаются воздействию внешней нагрузки и агрессивной среды. Наиболее широко распространённой является хлоридсодержащая среда. Хлорид – ионов воздействуют на железобетонные транспортные сооружения, подземные коммуникационные коллекторы и строительные конструкции производственных зданий. Фактическая долговечность эксплуатирующихся железобетонных конструкций в агрессивных условиях, содержащих хлорид – ионы, из-за коррозии арматуры оказывается в несколько раз меньше нормативной.

Одной из главных причин снижения долговечности железобетонных конструкций с расчётными силовыми трещинами в условиях воздействия жидких хлоридсодержащих сред является коррозия арматуры в поперечных трещинах бетона.

Основными внешними силовыми воздействиями на железобетонные конструкции являются переменные нагрузки периодического действия, среди которых ступенчатые повторные нагрузки представляют наибольшую опасность для их долговечности.

Не учёт в строительных нормативных документах переменных ступенчатых повторных нагрузок является одной из основных причин несоответствия нормативной и фактической долговечности железобетонных конструкций.

В работе впервые, с помощью разработанной методики длительных экспериментальных исследований на прямых моделях железобетонных конструкций в условиях периодического воздействия агрессивной и неагрессивной жидких хлоридсодержащих сред, исследованы кинетика прогибов и ширины раскрытия поперечных трещин в зоне чистого изгиба, в условиях воздействия переменной ступенчатой повторной изгибающей нагрузки, установлен фактический срок долговечности экспериментальных образцов.

В статье приводятся разработанная методика и результаты длительных экспериментальных исследований характеристик коррозионного поражения арматуры в поперечных трещинах бетона на прямых моделях железобетонных конструкций в зависимости от их дифференцированной величины раскрытия при действии верхнего и нижнего уровня загрузки переменной изгибающей нагрузкой в условиях периодического воздействия жидкой агрессивной среды, содержащей хлорид – ионы. Даны рекомендации по увеличению долговечности железобетонных элементов, испытывающих воздействие переменной эксплуатационной нагрузки и жидкой агрессивной среды, содержащей хлорид – ионы.

Ключевые слова: железобетонные конструкции; прямые модели; арматура; бетон; переменная ступенчатая повторная нагрузка; жидкая хлоридсодержащая среда; степень агрессивности; долговечность; силовые поперечные трещины; ширина раскрытия трещин; прогибы; характеристики коррозии арматуры.

Ссылка для цитирования этой статьи:

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.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/11KO615

В процессе длительной эксплуатации строительные конструкции производственных зданий и сооружений испытывают воздействия внешних нагрузок и агрессивных сред, совместное действие которых интенсифицирует развитие повреждений и сокращает срок службы строительных объектов. До 75% строительных конструкций при эксплуатации испытывают воздействие агрессивных сред во всех странах мира, в том числе из них до 10% ежегодно разрушаются и выходят из строя и до 30% требуется защита [1].

Ремонты и усиления конструкций приводят к экономическим потерям, превышающим 5% общемирового валового дохода. В Российской Федерации эти финансовые издержки оцениваются в 20-25 миллиардов рублей ежегодно [1].

Железобетон является наиболее употребляемым строительным материалом в мировой практике строительства [2]. Широкое использование он получил за счёт возможности придания железобетонным строительным конструкциям требуемой долговечности во время эксплуатации в агрессивных средах с различной степенью агрессивности.

В тоже время, необходимо отметить, что возникающие коррозионные поражения железобетонных конструкций значительно увеличивают затраты на эксплуатацию зданий и инженерных сооружений, в отдельных случаях превышающих сметную стоимость на их капитальное строительство не только в России, но и в других зарубежных развитых странах [3].

Эксплуатация железобетонных конструкций без специальной (вторичной) защиты является наиболее эффективным экономическим фактором обеспечения их рентабельности. Вторичная защита значительно увеличивает отпускную стоимость железобетонных конструкций, не гарантируя при этом необходимой защитной её стойкости на весь период эксплуатации железобетонных элементов [4].

В настоящее время экспериментальные исследования долговечности железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в агрессивных средах, направлены, главным образом, на поиск эффективной вторичной защиты конструкций от коррозии. Однако, такой подход в проведении исследований не позволяет рационально использовать ресурсные возможности железобетона. При этом известные результаты научных исследований, полученных на эксплуатирующихся железобетонных конструкциях в агрессивных средах, показывают во времени необратимый характер изменения свойств как бетона, так и арматуры.

Наибольшую опасность для коррозии металлических конструктивных элементов железобетонных конструкций представляют жидкие среды, содержащие хлорид – ионы. Хлорид-ионы в отличие от ионов сульфатов и магния в процессе диффузии во внутренний объём бетона связываются в малорастворимые соединения лишь частично [1, 5, 6].

Из-за коррозионного поражения арматуры фактическая долговечность эксплуатирующихся железобетонных конструкций в агрессивных условиях, содержащих хлорид-ионы, во многих случаях имеет в несколько раз меньшую нормативную долговечность [4]. Проникая в железобетонные конструкции, хлорид – ионы вызывают коррозию арматуры, нарушение сцепления арматуры с бетоном, образование и развитие коррозионных продольных трещин вдоль несущей арматуры, с последующим снижением несущей способности конструкций [7].

Сборный железобетон в транспортном строительстве практически заменил металлические несущие конструкции в мостах с малыми и средними пролётами, при величине их длины до тридцати четырёх метров.

Главной причиной снижения долговечности железобетонных мостов до ограниченного трудоспособного состояния является коррозия арматуры [8].

В результате хлоридной коррозии в США в 1982 году было повреждено 213 тысяч мостовых железобетонных конструкций со стоимостью ремонта 41,1 миллиардов долларов, а в 1986 году – 244 тысячи аналогичных конструкций со стоимостью ремонта 51,4 миллиардов долларов [9].

В России восемнадцать тысяч автодорожных мостов в результате воздействия на них различных агрессивных сред в процессе эксплуатации имеют ограниченное трудоспособное состояние с ежегодным однопроцентным от их общего количества обрушением [8].

В процессе эксплуатации практически все железобетонные конструкции имеют расчётные силовые поперечные трещины в защитном слое бетона, которые способствуют не только количественному, но и качественному изменению деструкционных процессов в самой железобетонной конструкции [3].

По сравнению с нетрещиностойкими железобетонными конструкциями трещиностройкие обычные железобетонные конструкции имеют технико-экономические недостатки в виде большей толщины элементов и значительного недоиспользования несущей способности арматуры. Нетрещиностойкие железобетонные конструкции допускаются к эксплуатации с ограниченной шириной раскрытия расчётных поперечных трещин в защитном слое бетона. Расчётная ширина раскрытия силовых поперечных трещин в бетоне определяет расход арматуры и стоимость железобетонного изделия.

Поперечные трещины в защитном слое бетона оказывают большое влияние на долговечность железобетонных конструкций. Они являются легитивными конструктивными элементами, по которым агрессивная среда поступает к поверхности арматуры. С учётом положений механики разрушения твёрдого тела силовые трещины оказывают определяющее влияние на интенсификацию процесса коррозии арматуры при увеличении ширины поперечной трещины в бетоне более критического значения раскрытия [10].

Коррозия арматуры в поперечной трещине бетона возникает в результате локальной депассивации её поверхности, из-за нарушения сцепления стальной арматуры с бетоном и последующей ликвидации стабильности существования пассивирующих сталь оксидных плёнок [4].

По отношению к железобетону оценка степени агрессивности газообразных сред основана на тех же принципах, что и для жидких сред [4].

В расчётных поперечных трещинах бетона железобетонных конструкций наибольшую коррозионную опасность для арматуры представляют жидкие среды, содержащие хлорид-ионы, вызывающие протекание наиболее интенсивного электрохимического процесса на её поверхности.

Согласно СНиП 2.03.11-85* «Защита строительных конструкций от коррозии» и ГОСТ 31384-2008 «Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Общие технические требования» степень агрессивного воздействия жидкой и газообразной среды на арматуру в расчётных поперечных трещинах бетона учитывается через ограничение предельно допустимой ширины раскрытия поперечных трещин на поверхности защитного слоя бетона, с учётом класса применяемой арматуры.

Показателем критической (опасной) величины раскрытия поперечных трещин, определяющим долговечность железобетонных конструкций, является переход от механизма коррозии арматуры при работе электрохимической макропары с анодом в поперечной трещине бетона к механизму коррозии открытой стали, с учётом незатухающей кинетики коррозионного процесса на поверхности арматуры.

Образующиеся продукты электрохимической реакции на поверхности арматуры и механическая колющая полость поперечных трещин твёрдым составом агрессивной среды, способствуют затуханию коррозионных процессов на арматуре в постоянно раскрытых поперечных трещинах бетона с шириной раскрытия до 0,4 мм [2, 11]. Заполненная соответствующими материальными отложениями, диффузионная проницаемость поперечной трещины с шириной раскрытия $a_{cre}=0,2$ мм уменьшается в 3 раза [2]. Снижение диффузионной проницаемости полости поперечной трещины повышает пассивацию стальной арматуры, за счёт восстановления высокой щелочности поровой влаги на границе бетон - арматура. Изменение диффузионной проницаемости поперечных трещин, согласно СНиП 2.03.11-85* «Защита строительных конструкций от коррозии», стабилизирует нормативные сроки службы железобетонных конструкций с шириной раскрытия поперечных трещин от 0,15мм до 0,30 мм.

В постоянно раскрытой поперечной трещине бетона скорость коррозии арматуры зависит от её ширины, степени агрессивности среды, вида и диаметра арматуры и величины напряжений в арматуре [4, 11, 12].

Периодическое увлажнение железобетонных конструкций вызывает наибольшую скорость протекания коррозионного процесса арматуры в зоне влияния поперечных трещин [13].

В целом необходимо отметить, что представления о деталях механизма коррозии арматуры в поперечных трещинах бетона и его контролирующих факторов в настоящее время имеют качественный характер, из-за недостаточного объёма научных данных о нём [4, 11, 12, 14]. Поэтому объективными научными результатами для эксплуатирующихся в агрессивной среде железобетонных конструкций, состоящих из многокомпонентных материалов, являются данные экспериментальных исследований коррозионного процесса арматуры в поперечных трещинах бетона, полученные на прямых моделях железобетонных конструкций, по сравнению с теоретическими исследованиями [1].

Использование методов моделирования в изучении работы строительных конструкций снижает стоимость проводимых исследований до 10 раз [15].

Основными внешними силовыми воздействиями на железобетонные конструкции в производственных зданиях, в пролётных строениях железнодорожных и автодорожных мостов, в многоэтажных складских помещениях являются переменные нагрузки, с наличием периодичности циклов переменной нагрузки от нескольких минут до одного года [2]. Переменные эксплуатационные силовые воздействия на железобетонные элементы приводят к изменению ширины раскрытия расчётных поперечных трещин и соответственно долговечности железобетонных конструкций.

По сравнению с другими видами переменного нагружения, эксплуатационные переменные ступенчатые повторные нагрузки в наибольшей степени увеличивают деформативность железобетонных элементов при одновременном снижении их долговечности [13, 15]. Изменяющаяся ширина раскрытия поперечной трещины при верхнем и нижнем уровнях нагружения разрушает уплотняющие химические и физические материальные продукты в её полости [14]. Циклическое переменное раскрытие ширины поперечной трещины вызывает снижение щелочности не только бетона стенок поперечных трещин, но и бетона вдоль поверхности арматурного стержня периодического профиля со скоростью 1-2 мм в год [14].

Ступенчатые переменные силовые воздействия с высоким уровнем нагружения $\sigma_{max} > 0,6 R_{в,б}$ среди всех переменных нагрузок одного знака, являются наиболее опасными для работоспособности железобетонных конструкций. При воздействии этих нагрузок накопление

остаточных деформаций в железобетонных элементах происходит из-за увеличения пластических свойств арматуры, вследствие более интенсивного перераспределения напряжений с бетона на арматуру, снижения модуля упругости бетона сжатой зоны и нарушения сцепления бетона с арматурой, приводящих к образованию новых поперечных трещин в защитном слое бетона.

Продукты коррозии стали, затрудняющие диффузию агрессивных реагентов к арматуре, при наличии переменных напряжений в арматуре, уменьшают свою плотность, способствуя тем самым активизации процесса коррозии на поверхности арматуры [4].

В силовых поперечных трещинах бетона в результате действия эксплуатационной нагрузки на границе «бетон – арматура», возникают в бетоне микротрещины по обе стороны от поперечной трещины, образующие зону влияния поперечной трещины [11].

Поэтому при переменном воздействии нагрузки вероятность возникновения коррозии арматуры в поперечных трещинах бетона значительно больше, чем при постоянном [4], что объясняется периодическим нарушением оксидной пассивирующей плёнки на поверхности арматуры, за счёт механического разрушения околоарматурного слоя бетона и вторичных продуктов коррозии металла.

Нормативные документы, используемые для расчёта долговечности железобетонных конструкций, учитывают только постоянные нагрузки, не принимая во внимание эксплуатационные переменные нагрузки.

Эксплуатационные переменные ступенчатые повторные нагрузки при расчете железобетонных конструкций, работающих как в неагрессивных, так и в агрессивных средах, согласно СНиП 2.03.11-85* «Защита строительных конструкций от коррозии» и СНиП 52.01-2003 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения» не принимаются во внимание.

Не учёт в нормативных документах фактора влияния реально действующих переменных нагрузок на изменение деформативных свойств как бетона, так и арматуры является одной из основных причин несоответствия нормативной и фактической долговечности железобетонных элементов, работающих в агрессивных средах.

Отсутствие обоснованной количественной оценки коррозии арматуры в силовых поперечных трещинах бетона способствует образованию коррозионных продольных трещин в защитном слое бетона, наличие которых приводит железобетонную конструкцию в предаварийное состояние [4, 7].

Количество экспериментальных исследований по влиянию эксплуатационной переменной нагрузки на коррозию арматуры в расчётных силовых поперечных трещинах бетона и, соответственно, на изменение долговечности железобетонных конструкций в России и зарубежных странах очень ограничено. Поэтому проведение экспериментальных исследований на прямых моделях железобетонных элементов с целью изучения коррозионного состояния арматуры в поперечных трещинах бетона при переменном их раскрытии, с учётом воздействия жидкой агрессивной среды, содержащей хлорид – ионы, является актуальным. Полученные результаты исследований представляют научную ценность для разработки рекомендаций по повышению долговечности эксплуатирующихся железобетонных конструкций в агрессивной среде.

Для изучения влияния циклических переменных силовых воздействий на кинетику величины прогибов и ширины раскрытия силовых поперечных трещин в зоне чистого изгиба обычных железобетонных конструкций и характеристики коррозионного поражения арматуры в поперечных трещинах бетона проведены два длительных экспериментальных

исследования на прямых моделях железобетонных элементов в условиях воздействия жидких агрессивных сред, содержащих хлорид – ионы и переменной эксплуатационной нагрузки.

Первое экспериментальное исследование по изучению влияния длительной переменной ступенчатой повторной нагрузки с высоким уровнем загрузки при раздельном воздействии на каждый опытный образец неагрессивной и агрессивной жидкой хлоридсодержащей среды на кинетику величины прогибов и ширины раскрытия поперечных трещин в зоне чистого изгиба при верхнем и нижнем уровнях действующей переменной нагрузки были проведены на двух прямых моделях обычных железобетонных конструкций с размерами 1500×200×70 мм. В балках в зоне чистого изгиба длиной 600 мм поперечная арматура отсутствовала. В экспериментальных образцах использовался тяжёлый бетон особо низкой проницаемости, показатели проницаемости которого удовлетворяют требованиям СНиП 2.03.11-85 «Защита строительных конструкций от коррозии», для не допущения коррозии арматуры под защитным слоем бетона между силовыми поперечными трещинами. При толщине защитного слоя бетона 25 мм изгибаемые образцы были армированы несущим плоским каркасом с одним рабочем стержнем диаметром 12 мм класса А-III и поперечными хомутами диаметром 6мм из арматуры класса А-I с шагом 100 мм.

Класс бетона в начале экспериментальных испытаний образцов составил $B=40,4$ МПа с призменной прочностью бетона $R_b = 296 \text{ кг/см}^2$, определённых согласно требований ГОСТ 10180-90 (Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам).

Нормативное сопротивление рабочей арматуры диаметром 12 мм класса А-III устанавливалось по испытаниям на растяжение 14 арматурных стержней, исходя из их наименьшей величины предела текучести $R_{sn} = 475,2$ МПа, согласно требований ГОСТ 12004-81 (Сталь арматурная. Методы испытания на растяжение).

В начале экспериментальных исследований по фактическим механическим характеристикам бетона и арматуры была определена расчётная несущая способность опытных балок на воздействие максимального внешнего изгибающего момента при верхнем уровне загрузки переменной нагрузкой, величина которого составила $M_{\text{расч}} = 86614 \cdot \text{кг} \cdot \text{см}$.

Погрешность между расчётным значением несущей способности и фактическим минимальным значением внутреннего несущего изгибающего момента опытных образцов, полученного перед началом экспериментальных исследований с помощью испытания четырёх балок в лабораторных условиях на кратковременную постоянную изгибающую нагрузку, составила величину 6,7%

Два опытных образца одновременно загружались переменной ступенчатой повторной изгибающей нагрузкой на одной автономной силовой установке, позволяющей раздельно испытывать одну балку на воздействие жидкой агрессивной среды, а другую на воздействие жидкой неагрессивной среды [16]. Прогибы в зоне чистого изгиба образцов определялись с точностью до 1 мкм, а ширина раскрытия поперечных трещин в зоне чистого изгиба с точностью – 7 мкм.

Измерение ширины раскрытия поперечных трещин на поверхности защитного слоя бетона балок производилось с помощью реперных точек. После появления волосяных поперечных трещин с шириной раскрытия до $a_{crc} = 0,025$ мм на боковую поверхность бетона балок на уровне продольной оси арматуры наклеивались реперы по их обеим сторонам русла поперечных трещин. В местах установки реперов поверхность бетона грунтовалась составом из 10 весовых частей эпоксидной смолы плюс 1 весовая часть ПЭПА (полиэтиленполиамин). Внешние поверхности реперов защищались от агрессивной жидкой среды с помощью

нанесения на них двух слоёв перхлорвинилового лака. Ширина раскрытия поперечных трещин измерялась по реперным рискам с помощью микроскопа МБС-2 при 56-кратном увеличении с точностью измерения $a_{crc} = 7$ мкм.

В неагрессивной среде ширина раскрытия силовых поперечных трещин в железобетонных конструкциях при действии длительных ступенчатых повторных нагрузок зависит от параметров приложенной переменной ступенчатой нагрузки [17].

Разработанная методика предусматривала использование в экспериментальном исследовании три независимых параметра переменной ступенчатой повторной нагрузки в цикле загрузки: относительное время действия максимальной нагрузки в периоде цикла

$$\eta = \frac{t_{M_{\max}}}{t_{\text{ц}}}, \text{ уровень загрузки минимальной нагрузкой } \rho = \frac{M_{\min}}{M_{\max}} \text{ и продолжительность цикла}$$

переменной нагрузки ($t_{\text{ц}}$), принимаемых на четырех уровнях.

Режимы загрузки железобетонных образцов приведён на рис. 1.

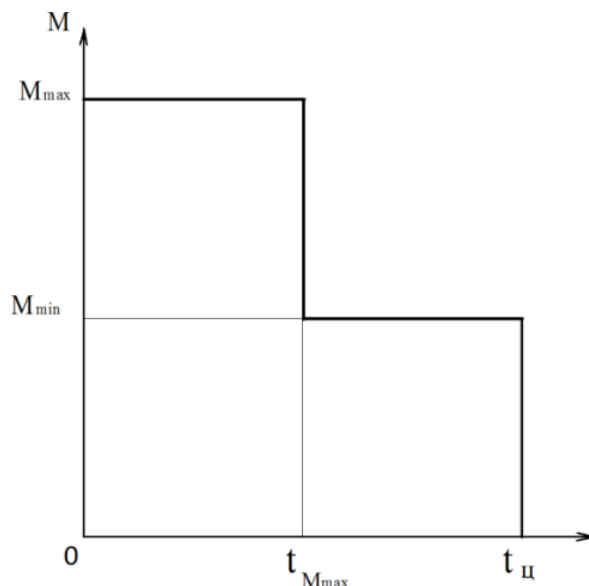


Рис. 1. Режимы загрузки ступенчатой повторной нагрузки:

где M_{\max} , M_{\min} – соответственно максимальный и минимальный изгибающие моменты переменной ступенчатой повторной нагрузки;

$t_{\text{ц}}$, $t_{M_{\max}}$ – соответственно продолжительность цикла переменной изгибающей нагрузки и время действия максимальной составляющей переменной изгибающей нагрузки в периоде цикла (подготовлен авторами)

Экспериментальная переменная ступенчатая повторная нагрузка имела соответствующие параметры: $\eta = 0,2$; $\rho = 0,533$; $t_{\text{ц}} = 3,5$ суток. С учётом разработанной программы исследования оба образца испытывали периодическое увлажнение поверхности бетона жидкой средой не менее шести раз в сутки. Образец под номером Б 20 увлажнялся 3 раствором NaCl, для получения коррозионного процесса на поверхности арматуры в поперечных трещинах бетона. Образец под номером Б19 увлажнялся раствором 1,5% $\text{NaNO}_2 + 1,5\%$ NaCl. Присутствие в растворе ингибитора коррозии арматуры нитрит-натрия позволяет не допустить коррозионный процесс на поверхности арматуры в поперечных трещинах бетона, при наличии в растворе хлорид – ионов [18].

Используемые в опыте значения параметров переменной ступенчатой повторной нагрузки отражают реальные силовые условия эксплуатации несущих железобетонных

конструкций [17]. Максимальная составляющая ступенчатой повторной нагрузки имеет значение $M_{\max} = 0,77 M_{\text{разр}}$, где $M_{\text{разр}}$ – величина разрушающего изгибающего момента, принята из условия получения $a_{\text{crc}}^{\max} = 0,25$ мм, согласно СНиП 2.03.11-85 (Защита строительных конструкций от коррозии) и СНиП 52-01-2003 (Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения).

Полученные результаты экспериментальных исследований показывают, что в начальный период испытания образцов в жидкой агрессивной и неагрессивной среде наблюдается уменьшение a_{crc} (рис. 2), за счёт процесса набухания бетона.

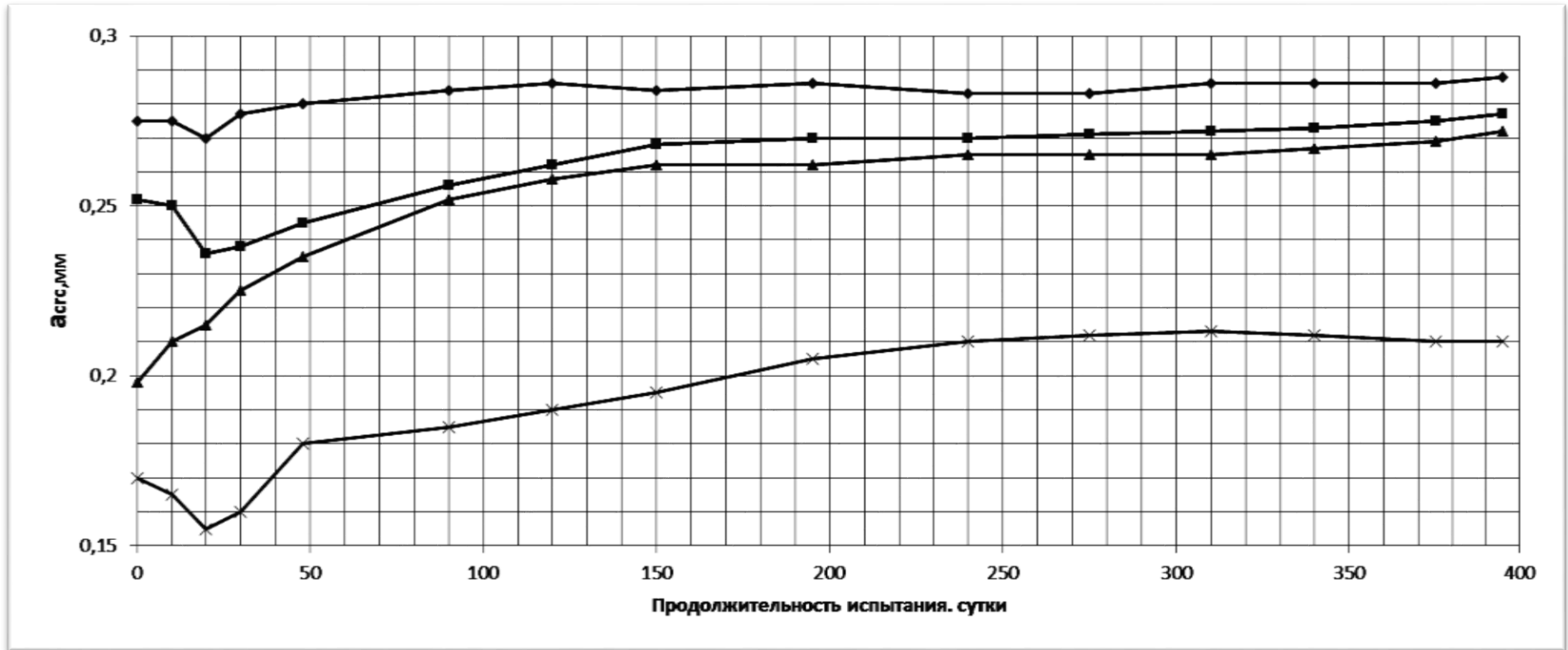


Рис. 2. Кинетика ширины раскрытия поперечных трещин в защитном слое бетона на балках Б19, Б20 при действии переменной ступенчатой повторной нагрузки. Параметры нагрузки: $\eta = 0,2$; $\rho = 0,533$; $t_{ц} = 3,5$ суток: ромбы и треугольник – соответственно от действия максимальной ($0,77 M_{разр}$) и минимальной ($0,41 M_{разр}$) нагрузки для образца Б20 (агрессивные условия), квадраты и кресты – для образца Б19 (неагрессивные условия). Ромбы и треугольники-агрессивные условия (раствор 3% NaCl), квадраты и кресты – неагрессивные условия (раствор 1,5% NaNO₂+1,5% NaCl) (рисунок подготовлен авторами)

Вследствие набухания бетона суммарное усилие в бетоне сжатой зоны становится меньше, в результате плечо внутренней пары сил в поперечном сечении образцов увеличивается с соответствующим эффектом снижения напряжения в арматуре. При этом уменьшается и величина a_{crc} . В процессе воздействия жидкой агрессивной среды продукты коррозии арматуры в поперечных трещинах бетона начинают препятствовать закрытию ширины раскрытия поперечных трещин в защитном слое бетона, при переходе внешней нагрузки на нижний уровень загрузки.

В агрессивной среде влияние продуктов коррозии арматуры на кинетику ширины раскрытия поперечных трещин наблюдается за счёт уменьшения величины амплитуды изменения ширины раскрытия поперечных трещин при действии верхнего и нижнего уровня нагрузки, в отличии от их влияния на значения прогибов (рис. 3).

При действии агрессивной адсорбционно-активной жидкой среды ползучесть бетона сжатой зоны под нагрузкой увеличивается более интенсивно по сравнению с неагрессивной жидкой средой. Полнота эпюры напряжений в сжатом бетоне стремится к единице, при этом плечо внутренней пары сил в поперечном сечении уменьшается, а напряжение в арматуре увеличивается, что способствует более интенсивному росту значений прогибов в агрессивной жидкой среде, по сравнению с неагрессивной жидкой средой.

В процессе длительного периода испытания начинает сказываться влияние воздействующих жидких сред на рост прочности бетона сжатой зоны. Увеличение прочности бетона сжатую способствует уменьшению площади эпюры напряжения в бетоне сжатой зоны, при соответствующим увеличении плеча внутренней пары сил в поперечном сечении железобетонного элемента, что и приводит к снижению напряжения в арматуре, а следовательно, к уменьшению величины прогибов и ширины раскрытия поперечных трещин.

Эксперимент проведён в течение 400 суток в лабораторных условиях. После появления волосяных продольных трещин ($a_t = 15 \div 25$ мкм) в защитном слое бетона балок, испытывающих воздействие переменной нагрузки и агрессивной жидкой среды, натурная часть экспериментального исследования была завершена. По отношению к обычным железобетонным конструкциям с расчётными силовыми поперечными трещинами в защитном слое бетона экспериментальная агрессивная среда характеризуется по степени как сильноагрессивная [19].

При ускорении коррозии арматуры в поперечных трещинах бетона с $a_{crc} = 0,20$ мм в 10 раз ($K_k = 10$) [19] при заданной в эксперименте концентрации хлорид – ионов в растворе фактическая долговечность железобетонных прототипов прямых моделей с $a_{crc}^{max} = 0,25$ мм в слабоагрессивной среде, содержащей хлорид-ионы, при действии переменной ступенчатой повторной нагрузки может составить не более 15 лет, что в 3 раза меньше нормативной долговечности несущих обычных железобетонных конструкций из тяжелого бетона в капитальных зданиях [1].

Нормативная ширина между непродолжительным (a_{crc1}) и продолжительным (a_{crc2}) раскрытием поперечных трещин для всех групп арматурной стали и различных степеней агрессивного воздействия жидкой агрессивной среды унифицирована и составляет 50 мкм, согласно СНиП 2.03.11-85 (Защита строительных конструкций от коррозии).

Принимая во внимание, полученные научные результаты в проведённом первом длительном эксперименте на прямых моделях железобетонных элементов, для изучения влияния дифференцированной величины амплитуды изменения ширины раскрытия поперечных трещин ($a_{crc1} - a_{crc2}$) на коррозионное состояние арматуры в поперечных трещинах бетона в зоне чистого изгиба был проведён второй длительный эксперимент на девяти прямых моделях обычных железобетонных конструкций при действии переменной изгибающей нагрузки и жидкой агрессивной среды, содержащей хлорид – ионы [19].

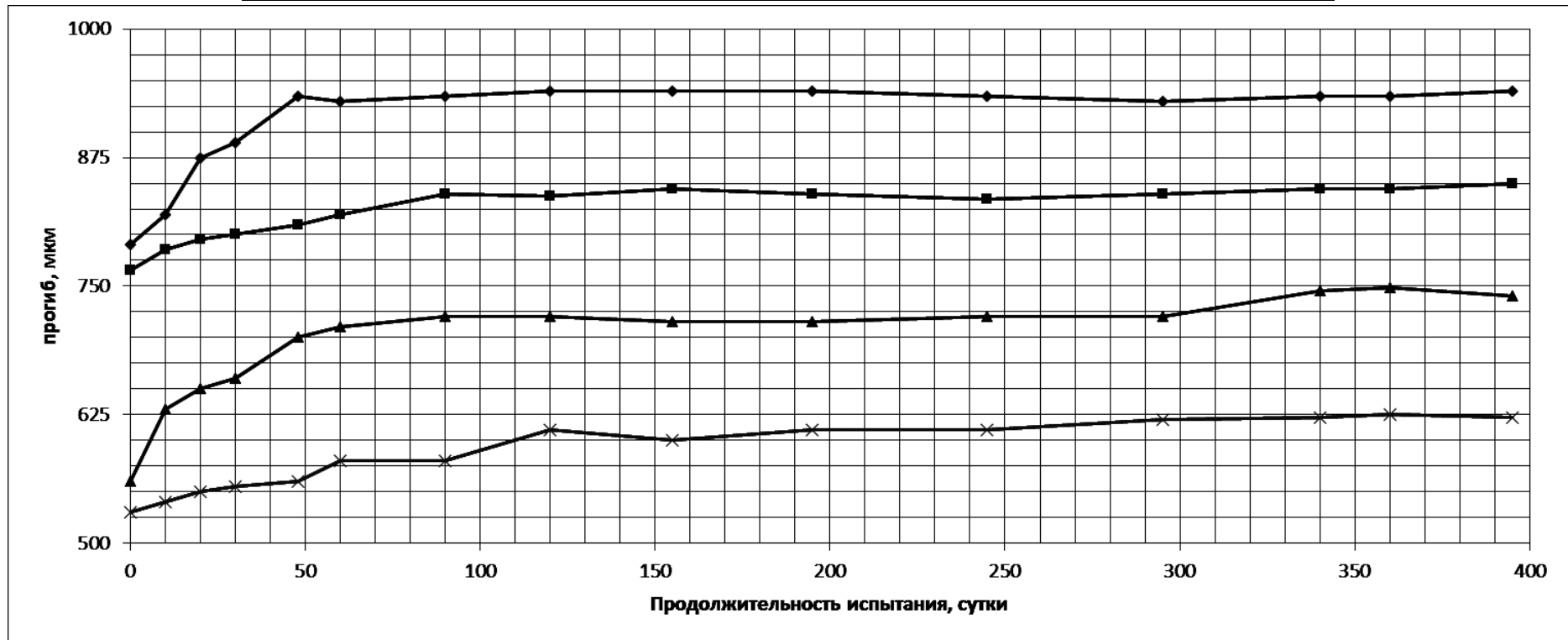


Рис. 3. Кинетика изменения прогибов балок B19, B20 в зоне чистого изгиба при действии переменной ступенчатой повторной нагрузки. Параметры нагрузки: $\eta = 0,2$; $\rho = 0,533$; $t_{ц} = 3,5$ суток: ромбы и треугольник – соответственно от действия максимальной ($0,77 M_{разр}$) и минимальной ($0,41 M_{разр}$) нагрузки для образца B20(агрессивные условия), квадраты и кресты – для образца B19(неагрессивные условия). Ромбы и треугольники – агрессивные условия (раствор 3% NaCl), квадраты и кресты – неагрессивные условия (раствор 1,5% NaNO₂+1,5% NaCl) (рисунок подготовлен авторами)

Опытные образцы с геометрическими размерами 2000×200×70 мм, толщиной защитного слоя бетона 25 мм и одиночной несущей арматурой диаметром 14 мм класса А-III были изготовлены из особоплотного бетона на алитовом среднеалюминатном портландцементе. Ширина раскрытия поперечных трещин в зоне чистого изгиба измерялась индикаторами часового типа с ценой деления 10 мкм, стационарно установленными на поверхности бетона между поперечными трещинами на уровне продольной оси рабочей арматуры.

Разработанная методика экспериментального исследования предусматривала проведение научного эксперимента в лабораторных условиях в течение 183 суток при регулярном шестиразовом увлажнении в течение суток раствором 3% NaCl поверхности бетона образцов и кратковременного увеличения ширины раскрытия поперечных трещин в зоне чистого изгиба $a_{crc2} = 0,20$ мм на трёх балках в каждой серии соответственно на 0,05; 0,10 и 0,15 мм, то есть до $a_{crc1} = 0,25$ мм; $a_{crc1} = 0,30$ мм; $a_{crc1} = 0,35$ мм.

Характеристики коррозионного поражения арматуры в зоне чистого изгиба определялись после вскрытия в бетоне не менее шести поперечных трещин определенной ширины раскрытия по следующим показателям: площади (S) и длине (ℓ) участка поражения, максимальной и средней глубине язв (δ_{max} и δ_{cp}), относительной величине поражения по периметру стержня (P). Изменение величины характеристик коррозионного поражения арматуры в поперечных трещинах бетона в зависимости от амплитуды их колебания представлено на рис. 4.

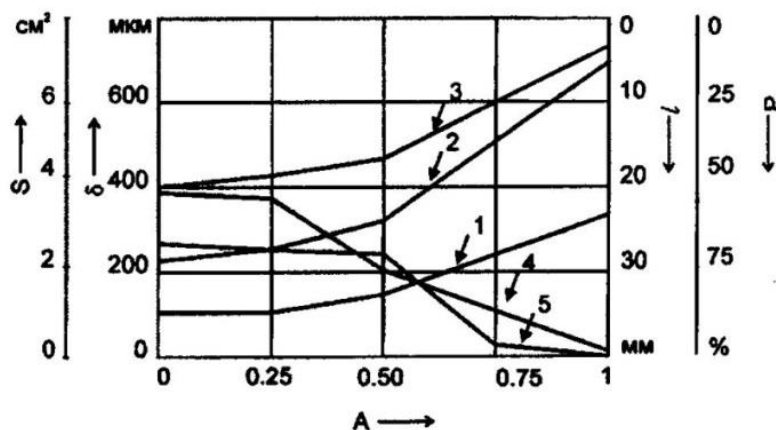


Рис. 4. Изменение характеристик коррозионного поражения арматуры в поперечных трещинах бетона в зависимости от относительной амплитуды изменения ширины раскрытия трещин A : 1, 2, 3, 4, 5 – соответственно средняя и максимальная глубина коррозии (δ) (площадь (S), длина (ℓ) и относительная величина поражения по периметру стержня (P)) (рисунок подготовлен авторами)

Вывод. Полученные результаты экспериментального исследования показывают, что при нормировании a_{crc} при переменном раскрытии поперечных трещин необходимо учитывать не только абсолютную, но и относительную величину амплитуды изменения ширины раскрытия трещин $A = (a_{crc1} - a_{crc2}) / a_{crc2}$. Основанием для данного заключения является анализ графических функциональных изображений на рис. 4, показывающих, что значительное увеличение показателей коррозионного поражения арматуры наблюдается при относительной величине амплитуды изменения ширины раскрытия поперечных трещин $A \geq 0,5$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мигунов, В.Н. Экспериментально-теоретическое моделирование армированных конструкций в условиях коррозии. Монограф. / В.Н. Мигунов, И.И. Овчинников, И.Г. Овчинников. – Пенза, ПГУАС, 2014. – 362 с.
2. Пухонто, Л.М. Долговечность железобетонных конструкций инженерных сооружений (силосов, бункеров, резервуаров, водонапорных башен, подпорных стен) / Д.М. Пухонто. – М.: АСВ, 2004. – 424 с.
3. Овчинников, И.И. Экспериментально-теоретическое моделирование армированных конструкций в условиях коррозии. Монограф. / И.И. Овчинников, В.Н. Мигунов, И.Г. Овчинников. – Пенза, ПГУАС, 2014. – 294 с.
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. Zivica, V. Corrosion of reinforcement induced by environment containing chloride and carbon dioxide / V. Zivica // Bulletin of Materials Science. 2003. – Vd.26. – №6. – P. 605-608.
6. Bob, C. Probabilistic assessment of reinforcement corrosion in existing structures. Proceedtngs of the International Conference held at the University of Dundee, Scotland, UK. 1996. – pp. 17-28.
7. Мигунов, В.Н. Длительные экспериментальные исследования влияния продольных трещин в защитном слое бетона на изменение долговечности, кратковременной жёсткости и прочности внецентренно сжатых с малым эксцентриситетом строительных обычных железобетонных элементов [Текст] / В.Н. Мигунов, И.Г. Овчинников // Изв. вузов. Строительство. – 2010. - №2. – С. 125-130.
8. Маринин, А.Н. Сопротивление железобетонных конструкций воздействию хлоридной коррозии и карбонизации / А.Н. Маринин, Р.Б. Гарибов, И.Г. Овчинников. – Саратов: Рата, 2008. – 259 с.
9. Розенталь, Н.К. Коррозионная стойкость цементных бетонов низкой и особо низкой проницаемости. Моногр. / Н.К. Розенталь. – М: ФГУП ЦПП 2006. – 520 с.
10. Пирадов, К.А. Механика разрушения железобетона / К.А. Пирадов, Е.А. Гузеев. – М.: Новый век, 1998. – 190 с.
11. Москвин, В.М. Трещины в железобетоне и коррозия арматуры / В.М. Москвин, С.Н. Алексеев, Г.П. Вербецкий, В.И. Новгородский – М.: Стройиздат, 1971. – 144 с.
12. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты / В.М. Москвин, Ф.И. Иванов, С.Н. Алексеев, Е.А. Гузеев; под ред. В.М. Москвина. – М.: Стройиздат, 1980. – 536 с.
13. Мигунов, В.Н. Экспериментально-теоретическое исследование коррозии и долговечности железобетонных конструкций с трещинами. Часть 1: монограф. / В.Н. Мигунов. – Пенза: ПГУАС, 2013. – 332 с.

14. Степанов, С.Н. Прогнозирование долговечности железобетонных конструкций, работающих в агрессивных средах с учётом коррозионного износа рабочей арматуры: дис. ... канд. техн. наук / С.Н. Степанов. – Н. Новгород: НГАСУ, 2005. – 180 с.
15. Мигунов, В.Н. Экспериментально-теоретическое исследование коррозии и долговечности железобетонных конструкций с трещинами. Часть 2: монограф. / В.Н. Мигунов. – Пенза: ПГУАС, 2013. – 304 с.
16. Мигунов, В.Н. Установка для режимных испытаний железобетонных балок при действии медленно меняющихся нагрузок в присутствии агрессивной среды (статья) [Текст] / В.Н. Мигунов // Реферативный журнал строительства и архитектуры, ВНИИС, сер. 17, вып.7 – М., 1983. – С. 39.
17. Барашиков, А.Я. Исследование длительной работы железобетонных конструкций при переменных нагрузках [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук / А.Я. Барашиков. – Киев, 1977. – 297 с.
18. Новгородский, В.И. Метод определения эффективного ингибиторов коррозии стали в трещинах бетона / В.И. Новгородский, А.Б. Островский, В.Н. Мигунов // Методические рекомендации по исследованию ингибиторов коррозии арматуры в бетоне. – М: НИИЖБ, 1980. – С. 18-24.
19. 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.

Рецензент: Статья рецензирована членами редколлегии журнала.

Migunov Viktor Nikolaevich

Penza State University of Architecture and Construction
Russia, Penza
E-mail: Viktor5043@rambler.ru

Ovchinnikov Igor Georgievich

Perm national research polytechnic university
Russia, Perm
Yuri Gagarin state technical university of Saratov
Russia, Saratov
Moscow state automobile&road technical university (Sochi branch)
Russia, Sochi
E-mail: bridgesar@mail.ru

Shamshina Kseniya Viktorovna

Penza State University of Architecture and Construction
Russia, Penza
E-mail: Kisek90@mail.ru

Effect of liquid chlorine-containing environments and variable operating load on the deformation properties of concrete elements and characteristics of corrosion damage fittings in the design of transverse cracks in concrete

Abstract. Concrete structure during operation is subjected to external loads and aggressive environments. The most widespread is the chloride-containing environments. Chloride ions act on the concrete transportation facilities, communications underground sewers and building construction industrial buildings. The actual durability of reinforced concrete structures operated in aggressive environments containing chloride - ions due to corrosion of the reinforcement is several times less than regulatory.

One of the main reasons for the decline of durability of reinforced concrete structures with the calculated force cracks under the action of liquid chloride-containing environments is the corrosion of reinforcement in concrete transverse cracks.

The main external force on the concrete structures are variable loads a batch, including the step repeated loads pose the greatest threat to their longevity. No registration in the building regulations of stepped variable repeated loads is one of the main reasons for non-compliance and the actual durability of concrete structures.

For the first time, with the help of the developed technique prolonged experimental studies on the direct model of reinforced concrete structures in a periodic influence of aggressive and non-aggressive liquid chloride-containing environments, studied the kinetics of deflections and width of the opening of transverse cracks in the area of pure bending under the impact of the variable speed repeated bending load, set the actual term durability of the experimental samples.

The paper presents the developed method and the results of long-term experimental studies of the characteristics of corrosion damage reinforcement in the transverse cracks in concrete on the direct model of reinforced concrete structures according to their differentiated value of the disclosure by the action of the upper and lower levels of loading variable bending loads in a periodic influence

corrosive liquids containing chloride - ions. Recommendations to increase the durability of concrete elements, experiencing the impact of the variable operational loads and corrosive liquids containing chloride - ions.

Keywords: reinforced concrete structures; direct model; fittings; concrete; variable speed re-loading; liquid chloride-containing environments; the degree of aggressiveness; durability; power transverse cracks; the width of the cracks; deflections; features reinforcement corrosion.

REFERENCES

1. Migunov, V.N. Eksperimental'no-teoreticheskoe modelirovanie armirovannykh konstruktsiy v usloviyakh korrozii. Monograf. / V.N. Migunov, I.I. Ovchinnikov, I.G. Ovchinnikov. – Penza, PGUAS, 2014. – 362 s.
2. Pukhonto, L.M. Dolgovechnost' zhelezobetonnykh konstruktsiy inzhenernykh sooruzheniy (silosov, bunkerov, rezervuarov, vodonapornykh bashen, podpornykh sten) / D.M. Pukhonto. – M.: ASV, 2004. – 424 s.
3. Ovchinnikov, I.I. Eksperimental'no-teoreticheskoe modelirovanie armirovannykh konstruktsiy v usloviyakh korrozii. Monograf. / I.I. Ovchinnikov, V.N. Migunov, I.G. Ovchinnikov. – Penza, PGUAS, 2014. – 294 s.
4. Dolgovechnost' zhelezobetona v agressivnykh sredakh / S.N. Alekseev, F.M. Ivanov, S. Modry, P. Shissl' // Sovm. Izd SSSR – ChSSR – FRG. – M.: Stroyizdat, 1990. – 320 s.
5. Zivica, V. Corrosion of reinforcement induced by environment containing chloride and carbon dioxide / V. Zivica // Bulletin of Materials Science. 2003. – Vd.26. – №6. – P. 605-608.
6. Bob, S. Probabilistic assessment of reinforcement corrosion in existing structures. Proceedtngs of the International Conference held at the University of Dundee, Scotland, UK. 1996. – pp. 17-28.
7. Migunov, V.N. Dlitel'nye eksperimental'nye issledovaniya vliyaniya prodol'nykh treshchin v zashchitnom sloe betona na izmenenie dolgovechnosti, kratkovremennoy zhestkosti i prochnosti vnetsentrenno szhatykh s malym ekstsentrisitetom stroitel'nykh obychnykh zhelezobetonnykh elementov [Tekst] / V.N. Migunov, I.G. Ovchinnikov // Izv. vuzov. Stroitel'stvo. – 2010. - №2. – S. 125-130.
8. Marinin, A.N. Soprotivlenie zhelezobetonnykh konstruktsiy vozdeystviyu khloridnoy korrozii i karbonizatsii / A.N. Marinin, R.B. Garibov, I.G. Ovchinnikov. – Saratov: Rata, 2008. – 259 s.
9. Rozental', N.K. Korrozionnaya stoykost' tsementnykh betonov nizkoy i osobo nizkaya pronitsaemosti. Monogr. / N.K. Rozental'. – M.: FGUP TsPP 2006. – 520 s.
10. Piradov, K.A. Mekhanika razrusheniya zhelezobetona / K.A. Piradov, E.A. Guzeev. – M.: Novyy vek, 1998. – 190 s.
11. Moskvina, V.M. Treshchiny v zhelezobetone i korroziya armatury / V.M. Moskvina, S.N. Alekseev, G.P. Verbetskiy, V.I. Novgorodskiy – M.: Stroyizdat, 1971. – 144 s.
12. Korroziya betona i zhelezobetona, metody ikh zashchity / V.M. Moskvina, F.I. Ivanov, S.N. Alekseev, E.A. Guzeev; pod red. V.M. Moskvina. – M.: Stroyizdat, 1980. – 536 s.

13. Migunov, V.N. Eksperimental'no-teoreticheskoe issledovanie korrozii i dolgovechnosti zhelezobetonnykh konstruksiy s treshchinami. Chast'1: monograf. / V.N. Migunov. – Penza: PGUAS, 2013. – 332 s.
14. Stepanov, S.N. Prognozirovaniye dolgovechnosti zhelezobetonnykh konstruksiy, rabotayushchikh v agressivnykh sredakh s uchetoм korrozionnogo iznosa rabochey armatury: dis. ... kand. tekhn. nauk / S.N. Stepanov. – N. Novgorod: NGASU, 2005. – 180 s.
15. Migunov, V.N. Eksperimental'no-teoreticheskoe issledovanie korrozii i dolgovechnosti zhelezobetonnykh konstruksiy s treshchinami. Chast' 2: monograf. / V.N. Migunov. – Penza: PGUAS, 2013. – 304 s.
16. Migunov, V.N. Ustanovka dlya rezhimnykh ispytaniy zhelezobetonnykh balok pri deystvii medlenno menyayushchikhsya nagruzok v prisutstvii agressivnoy sredy (stat'ya) [Tekst] / V.N. Migunov // Referativnyy zhurnal stroitel'stva i arkhitektury, VNIIS, ser. 17, vyp.7 – M., 1983. – S. 39.
17. Barashikov, A.Ya. Issledovanie dlitel'noy raboty zhelezobetonnykh konstruksiy pri peremennykh nagruzkakh [Tekst]: dis. ... d-ra tekhn. nauk / A.Ya. Barashikov. – Kiev, 1977. – 297 s.
18. Novgorodskiy, V.I. Metod opredeleniya effektivnogo ingibitorov korrozii stali v treshchinakh betona / V.I. Novgorodskiy, A.B. Ostrovskiy, V.N. Migunov // Metodicheskie rekomendatsii po issledovaniyu ingibitorov korrozii armatury v betone. – M: NIIZhB, 1980. – S. 18-24.
19. Migunov, V.N. Vliyanie peremennoy nagruzki i amplitudy izmeneniya shiriny raskrytiya treshchin na korrozionnoe porazhenie armatury v treshchinakh zhelezobetonnykh konstruksiy / V.N. Migunov // Izv. vuzov. Stroitel'stvo.– 2002. – №10. – S. 134–137.