

УДК 624.012.45.042.3.046.539.4:620.193.2

Мигунов Виктор Николаевич

ФГБОУ ВПО «Пензенский Государственный университет архитектуры и строительства»
Россия, Пенза¹

Кандидат технических наук, доцент

**Методика и результаты длительных
экспериментальных исследований кинетики кривизны
изгибаемых обычных железобетонных элементов при
действии переменной ступенчатой повторной нагрузки
в неагрессивной и агрессивной средах**

¹ 440028 г. Пенза, ул. Г. Титова 28.

Аннотация. Одной из причин несоответствия нормативной и фактической долговечности железобетонных конструкций, испытывающих в процессе эксплуатации воздействие хлоридсодержащих сред, является отсутствие в нормативных документах положения о влиянии ступенчатого вида переменных внешних воздействий, как наиболее опасного для работы железобетонных элементов, на долговечность. Переменная нагрузка интенсифицирует коррозионное поражение арматуры в зоне влияния поперечных трещин и способствует образованию коррозионных продольных трещин в защитном слое бетона. Прямую оценку проектного остаточного технического ресурса железобетонных конструкций, как с силовыми поперечными трещинами, так и коррозионными продольными трещинами в защитном слое бетона строительные нормы не дают.

Длительная эксплуатационная жёсткость изгибаемых железобетонных элементов, определяющая их деформационные свойства и, в конечном счёте, долговечность, зависит от кинетики их кривизны во времени. Из-за сложного характера физико-химической природы взаимодействия арматуры и бетона в агрессивных хлоридсодержащих средах наиболее достоверные научные результаты получаются при экспериментальных исследованиях на прямых моделях железобетонных конструкций по сравнению с теоретическими.

С помощью разработанной методики исследования кинетики кривизны изгибаемых железобетонных конструкций в зависимости от параметров переменной ступенчатой повторной нагрузки в агрессивной и неагрессивной средах проведён длительный сбалансированный многофакторный эксперимент на изгибаемых прямых моделях обычных железобетонных конструкций.

В работе сделан анализ полученных количественных данных абсолютного прироста кривизны, а также продолжительности во времени увеличения прироста кривизны опытных образцов при воздействии переменной ступенчатой повторной и постоянной нагрузок в агрессивной и неагрессивной средах. Установлены функциональные зависимости прироста кривизны и продолжительности увеличения прироста кривизны экспериментальных балок в зависимости от параметров переменной ступенчатой повторной изгибающей нагрузки для агрессивных и неагрессивных условий испытания. Отмечается существенное различие в полученных количественных значениях для условий воздействия переменной и постоянной нагрузки в агрессивной и неагрессивной средах, что необходимо учитывать в соответствующих разделах новых редакционных изданий нормативных документов по проектированию и защите железобетонных конструкций, эксплуатирующихся не только в агрессивных, но и в неагрессивных средах.

Ключевые слова: прямые модели обычных железобетонных элементов; поперечные трещины; кривизна; жёсткость; переменная ступенчатая повторная и постоянная нагрузки; неагрессивная газовоздушная и агрессивная жидкая хлоридсодержащая среды; сбалансированный многофакторный эксперимент.

В мировой практике строительства из всех строительных материалов наиболее употребляемым и долговечным является железобетон. Несмотря на это экономические потери при ремонтах и усилении конструкций превышают 5 % общемирового валового дохода, так как более 75 эксплуатирующихся строительных конструкций испытывают воздействие различных агрессивных сред. В Российской Федерации эти финансовые потери оцениваются в 20-25 миллиардов рублей ежегодно [1]. Средний срок службы заменяемых железобетонных мостов с малыми и средними пролётами ($L \leq 33,5 м$) в России составляет не более 35 лет вместо нормативных 80 лет по долговечности [2, 3].

Из общего числа мостов, эксплуатирующихся на федеральной сети автомобильных дорог в России, 12,3 % находятся в неудовлетворительном состоянии, 45 % противоречат требованиям грузоподъемности [4]. Ежегодно происходит обрушение около 1 % автодорожных железобетонных мостов [2].

Одной из основных причин преждевременной потери эксплуатационных свойств железобетонных конструкций является композитный характер строения материала, который способствует нелинейности деформирования бетона и арматуры под нагрузкой.

Во внутренней структуре железобетонных конструкций под действием нагрузки происходят два взаимно влияющих друг на друга процесса в виде деформирования и микроразрушения, усугубляющиеся воздействием агрессивной среды. [5].

Особенно большое влияние на коррозионное поражение арматуры и появление коррозионных продольных трещин в агрессивных средах оказывает наличие силовых поперечных трещин в защитном слое бетона [6]. В тоже время, прямую оценку проектного остаточного технического ресурса железобетонных конструкций с силовыми поперечными трещинами, эксплуатирующихся в различных агрессивных средах, строительные нормы не дают.

Наибольшую опасность для коррозии арматуры в расчётных поперечных трещинах бетона железобетонных конструкций представляют жидкие среды, содержащие хлорид – ионы, вызывающие на арматуре протекание интенсивного электрохимического процесса. Подход к оценке степени агрессивности газообразных сред по отношению к железобетону основан на тех же принципах, что и для жидких сред [7].

Одной из причин несоответствия нормативной и фактической долговечности железобетонных элементов, эксплуатирующихся в агрессивных хлоридсодержащих средах, является не учёт в нормативных документах фактора влияния реально действующих переменных нагрузок на изменение деформативных свойств как бетона, так и арматуры. Все основополагающие результаты экспериментальных исследований коррозии арматуры в поперечных трещинах бетона для нормативных документов по защите железобетонных конструкций от коррозии были получены при действии постоянной длительной нагрузки и, следовательно, в постоянно раскрытых трещинах. В тоже время, в процессе эксплуатации железобетонные элементы зданий и, особенно, инженерных сооружений, например, мостов, в процессе эксплуатации в агрессивной среде испытывают воздействие длительной переменной нагрузки. Переменная нагрузка способствует интенсификации коррозионного поражения арматуры вдоль стержня в зоне влияния поперечных трещин и образованию коррозионных продольных трещин в защитном слое бетона в условиях воздействия агрессивной среды [8, 9].

Среди всех переменных нагрузок одного знака ступенчатый вид переменных воздействий при высоких уровнях нагрузок $\sigma_{max} > 0,6 R_{b,n}$ представляет наибольшую опасность для железобетонных конструкций, из-за повышенных деформаций ползучести арматуры и бетона [10, 11, 12, 13, 14, 15, 16].

В общем случае длительная эксплуатационная жёсткость изгибаемых железобетонных элементов определяется кинетикой их кривизны во времени. Из-за сложного характера физико-

химической природы взаимодействия арматуры и бетона в агрессивных хлоридсодержащих средах наиболее достоверные научные результаты получаются при экспериментальных исследованиях на прямых моделях железобетонных конструкций по сравнению с теоретическими [1,17]. Одновременно, использование прямых моделей при изучении долговечности железобетонных элементов позволяет снизить стоимость исследований до 10 раз [18].

Экспериментальные исследования кинетики кривизны проведены на изгибаемых прямых моделях обычных железобетонных конструкций с размерами 1500x200x70мм в условиях приложения длительных переменных ступенчатых повторных нагрузок при воздействии как агрессивной жидкой хлоридсодержащей среды, так и неагрессивной газообразной [17].

В опытных образцах использовался тяжёлый бетон класса В = 40 МПа с толщиной защитного слоя бетона 25мм и плоский арматурный каркас с одним рабочим стержнем класса А-III диаметром 12мм и поперечными хомутами диаметром 6 мм класса А-I , которые отсутствовали в зоне чистого изгиба на расстоянии 600мм.

В эксперименте применялись нагружающие установки, позволяющие одновременно испытывать на каждой из них независимо друг от друга два опытных образца в условиях воздействия на один из них агрессивной жидкой хлоридсодержащей среды, а на другой - неагрессивной газообразной среды [19]

Математической основой методики эксперимента являлся латинский квадрат, позволяющий получить опытные данные в сбалансированном многофакторном эксперименте на четырёх уровнях трёх независимых параметров переменной ступенчатой повторной

нагрузки в цикле загрузки: $\eta - 0,1; 0,2; 0,3; 0,4$, где $\eta = \frac{t_{M_{max}}}{t_{ц}}$ - относительное время действия

максимальной нагрузки в периоде цикла; $\rho - 0,4; 0,533; 0,666; 0,8$, где $\rho = \frac{M_{min}}{M_{max}}$ - уровень загрузки минимальной нагрузкой; $t_{ц} - 3,5$ суток (84 часа); 14 суток (336 часа); 28 суток (672 часа); 56 суток (1344 часа) [20, 21, 22].

Принятые значения параметров переменной ступенчатой повторной нагрузки отражают широкий диапазон нагрузок, действующих в реальных условиях эксплуатации на несущие железобетонные конструкции [11, 16, 23]. Максимальная величина переменной ступенчатой повторной нагрузки установлена из условия получения $a_{crc}^{max} = 0,25$ мм и составляла $M_{max} = 0,77M_{разр}$, где $M_{разр}$ – величина разрушающего изгибающего момента.

Экспериментальные исследования проведены на сорока балках, тридцать две из которых были испытаны при воздействии переменной нагрузки. Двадцать образцов подверглись воздействию агрессивной среды, а другие двадцать – неагрессивной среды. Длительное влияние постоянной эксплуатационной изгибающей нагрузки в условиях воздействия как неагрессивной, так и агрессивной среды, экспериментально исследовано на железобетонных моделях в количестве 8 штук, в том числе половина из которых была испытана в агрессивной среде с относительными уровнями загрузки $M_{пост}/M_{разр}$ соответственно : 0,9; 0,533; 0,426 и 0,320.

Эксперимент проведён в течение одного года в лабораторных условиях при периодическом шестиразовом увлажнении в течение суток трёхпроцентным раствором хлористого натрия поверхности бетона образцов. После появления волосяных коррозионных продольных трещин ($a_T = 10$ мкм) в защитном слое бетона балок, испытывающих воздействие переменной нагрузки и агрессивной среды, натурная часть экспериментального исследования была завершена. При ускорении коррозии арматуры в поперечных трещинах бетона с $a_{crc} = 0,20$ мм в 10 раз ($K_k = 10$) при аналогичной концентрации хлорид – ионов в растворе, что и в

рассматриваемом эксперименте [24], 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 до 15 лет, что в 3 раза меньше нормативной долговечности несущих обычных железобетонных конструкций из тяжелого бетона в производственных зданиях [17].

В настоящее время расчёт железобетонных элементов на долговечность с учётом длительного силового воздействия происходит с помощью деформационной теории расчёта [2]. Поэтому изучение кинетики кривизны изгибаемых железобетонных конструкций в зависимости от параметров переменной ступенчатой повторной нагрузки в различных средах имеет важное значение при исследовании их долговечности.

Программа эксперимента предусматривала получение абсолютных значений прироста кривизны в зоне чистого изгиба опытных образцов и исследование характера их кинетики во времени с момента первоначального нагружения в зависимости от параметров переменной ступенчатой повторной нагрузки при верхнем уровне нагружения, которые в итоге и определяют эксплуатационную жёсткость железобетонных конструкций.

Согласно полученных экспериментальных данных математическая модель кривой корреляции изменения прироста величины кривизны $\Delta K(t)$ (аналогичный характер изменения наблюдается и для продолжительности во времени прироста кривизны) железобетонных образцов во времени представляется в виде:

$$\Delta K(t) = K_{max} - (K_{max} - K_{min})e^{-kt}, \quad (1)$$

где $\Delta K(t)$ - величина прироста кривизны во времени; K_{max} - максимальное значение прироста кривизны, то есть асимптота, к которой стремится теоретическая кривая прироста кривизны; K_{min} - начальное значение кривизны элемента после первого нагружения; k - коэффициент.

Соответствующие расчётные параметры в математической модели для каждого вида нагружения на отдельных образцах определяются по методу наименьших квадратов [20].

Предварительный анализ экспериментальных данных и построенных по ним теоретическим корреляционным кривым кинетики прироста кривизны, а также продолжительности во времени увеличения прироста кривизны показал, что в неагрессивных и агрессивных условиях испытания наблюдаются, во-первых, затухающий характер величин их роста во времени и, во-вторых, более интенсивное увеличение исследуемых значений в первой трети периода испытания. С учётом этих факторов при указанных 16 комбинациях параметров переменной ступенчатой повторной нагрузки в результате проведённого эксперимента как в неагрессивной, так и агрессивной средах были получены функциональные зависимости 95% и 100% значения как прироста кривизны, так и продолжительности во времени увеличения прироста кривизны балок в виде произведения отдельных функций независимых переменных в зависимости от параметров переменной ступенчатой повторной нагрузки [20]:

$$\Delta K = Kf(\eta) \cdot f(\rho) \cdot f(t_u), \quad (2)$$

где K - усреднённый коэффициент для шестнадцати комбинаций параметров воздействующей переменной нагрузки.

На рис 1 и 2 показаны функциональные зависимости соответственно для 95% и 100% прироста кривизны опытных образцов $\Delta K = \frac{1}{R} \cdot 10^{-6}, 1/м$ в зависимости от параметров переменной ступенчатой нагрузки для неагрессивных условий испытания.

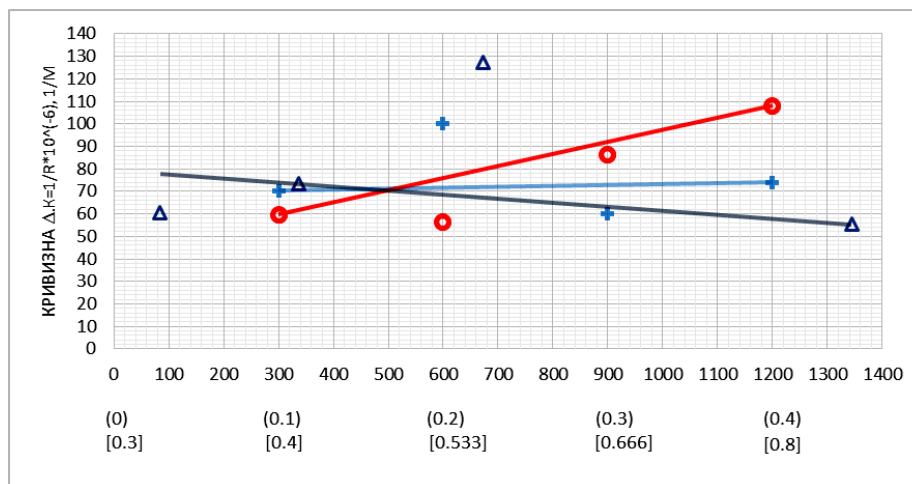


Рис. 1. Зависимость 95% величины затухания приращения значения кривизны балок ($\Delta K = \frac{1}{R} \cdot 10^{-6}, 1/м$) для неагрессивных условий испытания в газовой среде от параметров переменной ступенчатой повторной нагрузки.

Условные обозначения к рис 1.: Ось абсцисс: цифры без скобок предназначены для параметра t_c - длительность цикла переменной нагрузки в часах (треугольник); цифры в круглых скобках предназначены для параметра $\eta = t_{max} / t_c$ (засечка); цифры в квадратных скобках предназначены для параметра $\rho = M_{min} / M_{max}$ (окружность). $\Delta K = 0,00018 \cdot (68,93 + 12,667\eta)(20,25 + 98,872\rho)(79,45 - 0,018t_c)$

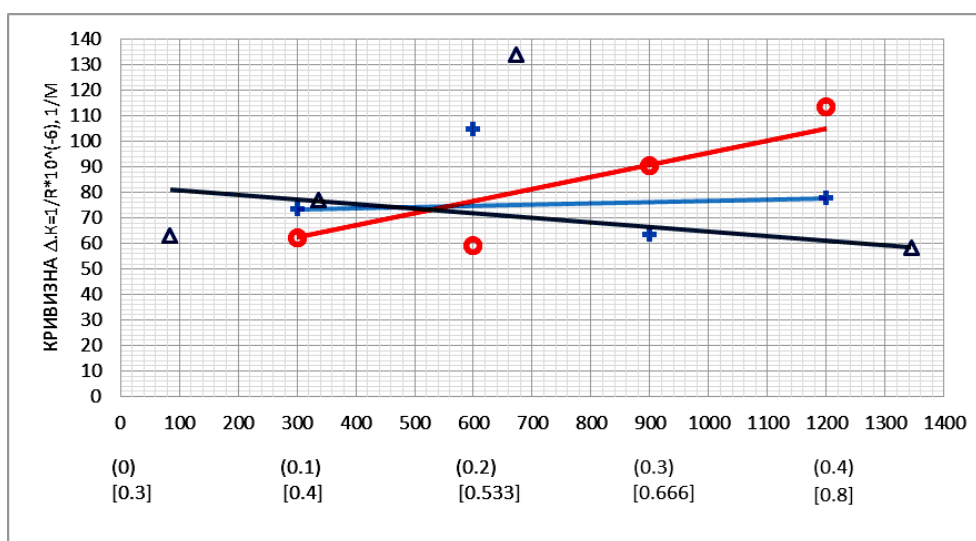


Рис. 2. Зависимость 100% величины прироста значения кривизны балок ($\Delta K = \frac{1}{R} \cdot 10^{-6}, 1/м$) для неагрессивных условий испытания в газовой среде от параметров переменной ступенчатой повторной нагрузки.

Условные обозначения к рис 2.: Ось абсцисс: цифры без скобок предназначены для параметра t_c - длительность цикла переменной нагрузки в часах (треугольник); цифры в круглых скобках предназначены для параметра $\eta = t_{max} / t_c$ (засечка); цифры в квадратных скобках предназначены для параметра $\rho = M_{min} / M_{max}$ (окружность). $\Delta K = 0,00016 \cdot (71,93 + 14,667\eta)(19,59 + 106,767\rho)(82,59 - 0,018t_c)$.

На рисунках 3 и 4 представлены функциональные зависимости продолжительности в сутках соответственно для 95% и 100% увеличения прироста кривизны балок в неагрессивных условиях испытания в зависимости от параметров переменной ступенчатой повторной нагрузки.

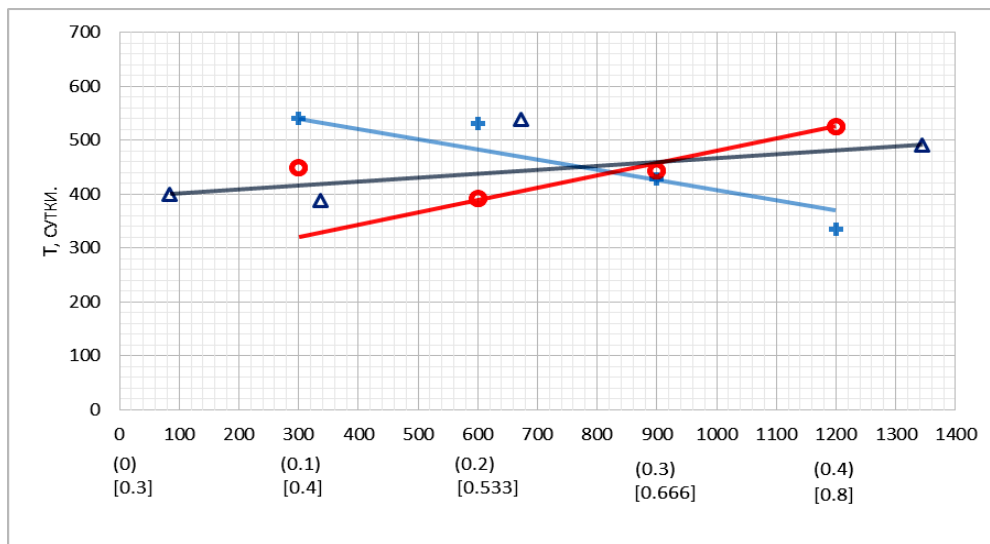


Рис. 3. Продолжительность в сутках 95% увеличения прироста кривизны балок в неагрессивных газозоудушных условиях испытания в зависимости от параметров переменной ступенчатой повторной нагрузки.

Условные обозначения к рис. 3: T- период прироста величины кривизны в сутках. Ось абсцисс: цифры без скобок предназначены для параметра t_c -длительность цикла переменной нагрузки в часах(треугольник); цифры в круглых скобках предназначены для параметра $\eta = t_{\max} / t_c$ (засечка); цифры в квадратных скобках предназначены для параметра $\rho = M_{\min} / M_{\max}$ (окружность). $T = 0,0000539 \cdot (599 - 570\eta)(124,4 + 502\rho)(394 + 0,073t_c)$

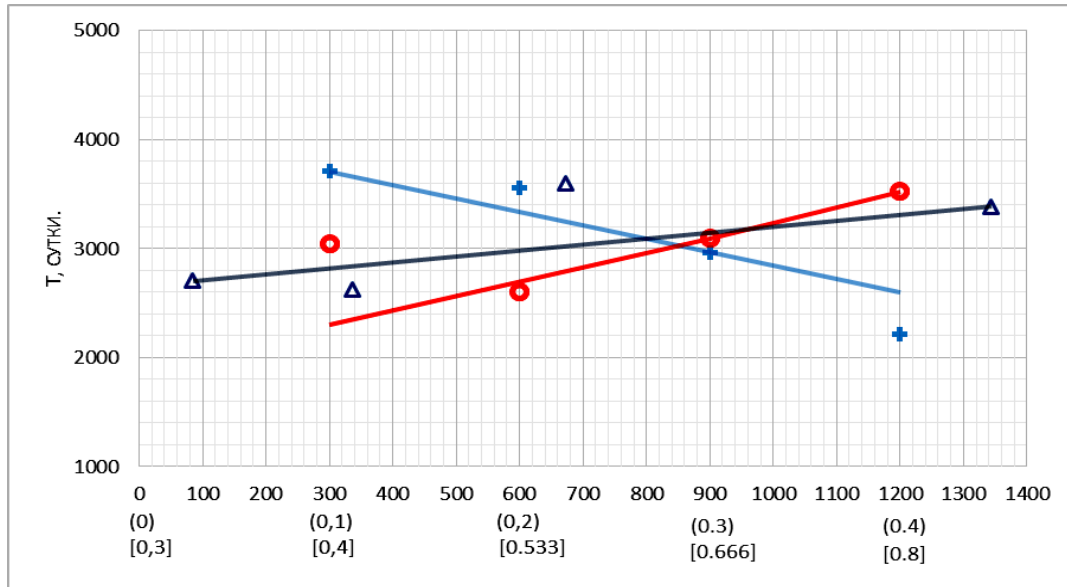


Рис. 4. Продолжительность в сутках 100% прироста величины кривизны балок в неагрессивных газозоудушных условиях в зависимости от параметров переменной ступенчатой повторной нагрузки.

Условные обозначения к рис. 4: T- период прироста величины кривизны в сутках. Ось абсцисс: цифры без скобок предназначены для параметра t_u - длительность цикла переменной нагрузки в часах (треугольник); цифры в круглых скобках предназначены для параметра $\eta = t_{\max} / t_u$ (засечка); цифры в квадратных скобках

предназначены для параметра $\rho = M_{\min} / M_{\max}$ (окружность).

$$T = 0,000000116 \cdot (4081 - 3720\eta)(969 + 3194\rho)(2662 + 0,540t_u)$$

На рисунках 5 и 6 показаны функциональные зависимости приращения величины кривизны балок ($\Delta K = 1/R \cdot 10^{-6}, 1/м$) соответственно для 95% и 100% увеличения приращения кривизны для агрессивных условий испытания в зависимости от параметров переменной ступенчатой повторной нагрузки.

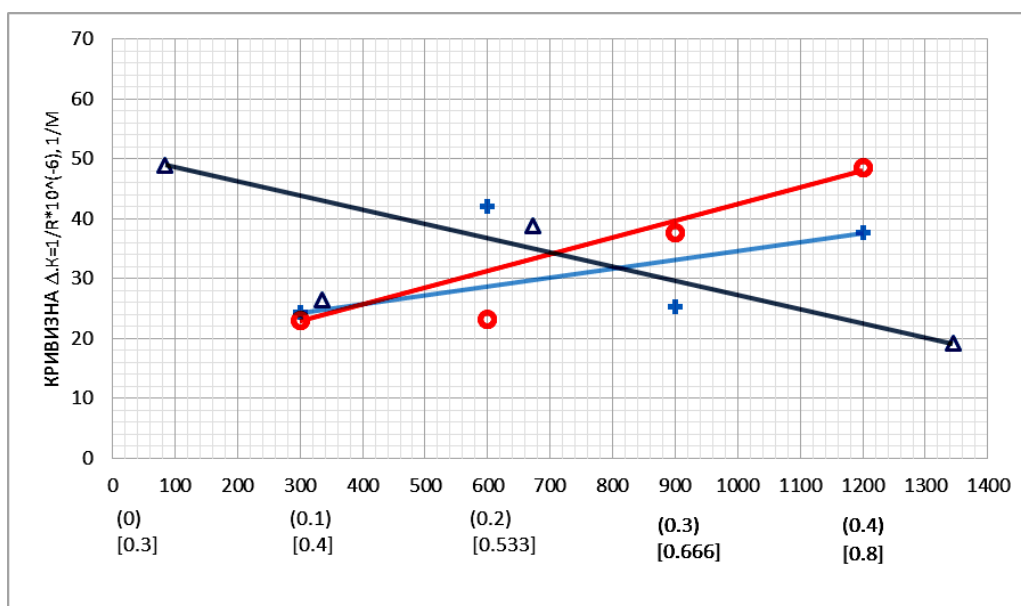


Рис. 5. Зависимость 95% величины прироста кривизны балок ($\Delta K = \frac{1}{R} \cdot 10^{-6}, 1/м$) для агрессивных условий испытания от параметров переменной ступенчатой повторной нагрузки.

Условные обозначения к рис 5: Ось абсцисс: цифры без скобок предназначены для параметра t_c -длительность цикла переменной нагрузки в часах (треугольник); цифры в круглых скобках предназначены для параметра $\eta = t_{max} / t_c$ (засечка); цифры в квадратных скобках предназначены для параметра $\rho = M_{min} / M_{max}$ (окружность). $\Delta K = 0,00105 \cdot (19,87 + 44,333\eta)(0,64 + 55,639\rho)(50,99 - 0,024t_c)$

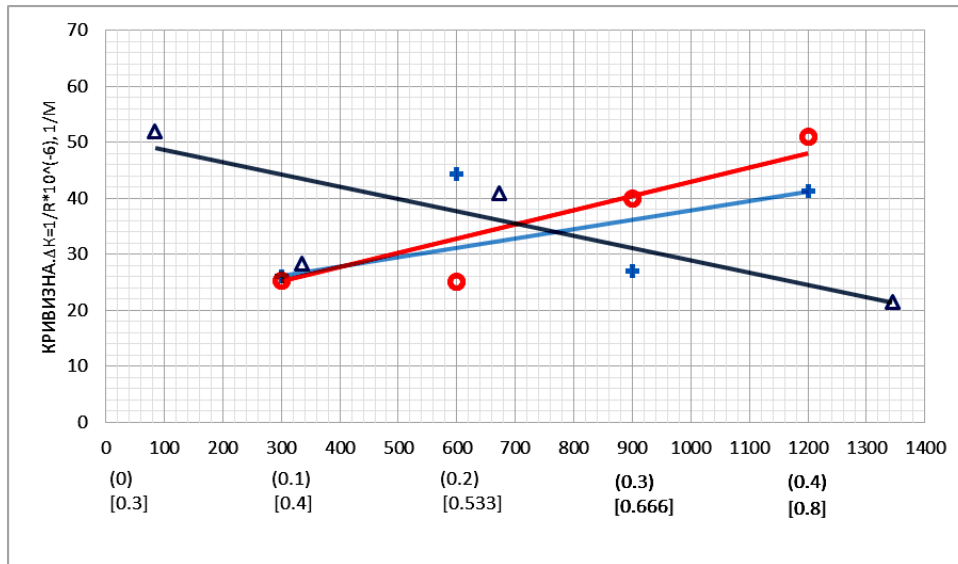


Рис. 6. Зависимость 100% величины затухания приращения значения кривизны балок ($\Delta K = \frac{1}{R} \cdot 10^{-6}, 1/м$) для агрессивных условий испытания от параметров переменной ступенчатой повторной нагрузки.

Условные обозначения к рис 6: Ось абсцисс: цифры без скобок предназначены для параметра t_u -длительность цикла переменной нагрузки в часах (треугольник); цифры в круглых скобках предназначены для параметра $\eta = t_{max} / t_u$ (засечка); цифры в квадратных скобках предназначены для параметра $\rho = M_{min} / M_{max}$ (окружность). $\Delta K = 0,00092 \cdot (21,07 + 50,333\eta)(3,09 + 55,26\rho)(53,933 - 0,024t_u)$

На рисунках 7 и 8 представлены функциональные зависимости продолжительности в сутках соответственно для 95% и 100% увеличения прироста кривизны балок для агрессивных условий испытания от параметров переменной ступенчатой повторной нагрузки.

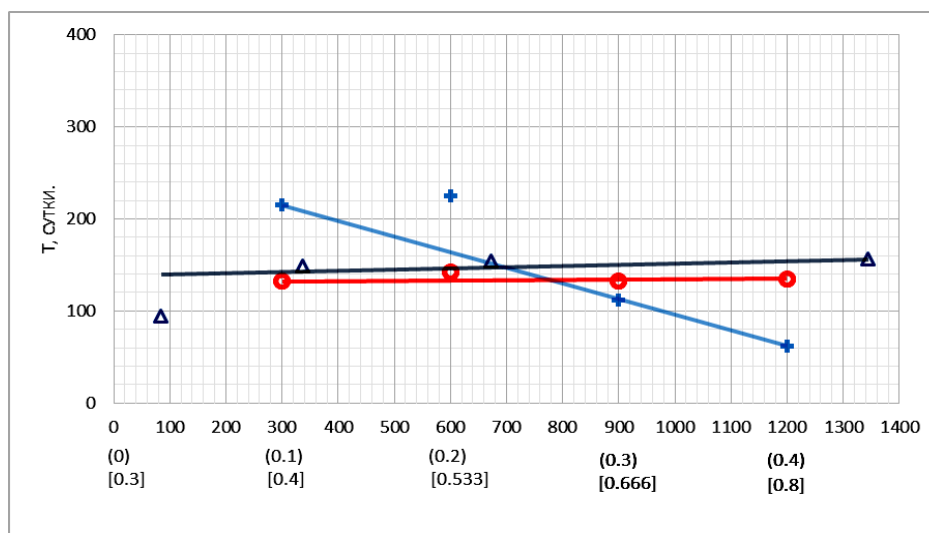


Рис. 7. Продолжительность в сутках 95% увеличения прироста кривизны балок для агрессивных условий испытания образцов в зависимости от параметров переменной ступенчатой повторной нагрузки.

Условные обозначения к рис 7: T- период полной стабилизации прироста величины кривизны в сутках. Ось абсцисс: цифры без скобок предназначены для параметра $t_{\text{ц}}$ -длительность цикла переменной нагрузки в часах (треугольник); цифры в круглых скобках предназначены для параметра $\eta = t_{\text{max}} / t_{\text{ц}}$ (засечка); цифры в квадратных скобках предназначены для параметра $\rho = M_{\text{min}} / M_{\text{max}}$ (окружность).

$$T = 0,000059 \cdot (267 - 513\eta)(129 + 7,5\rho)(147 + 0,00694t_{\text{ц}})$$

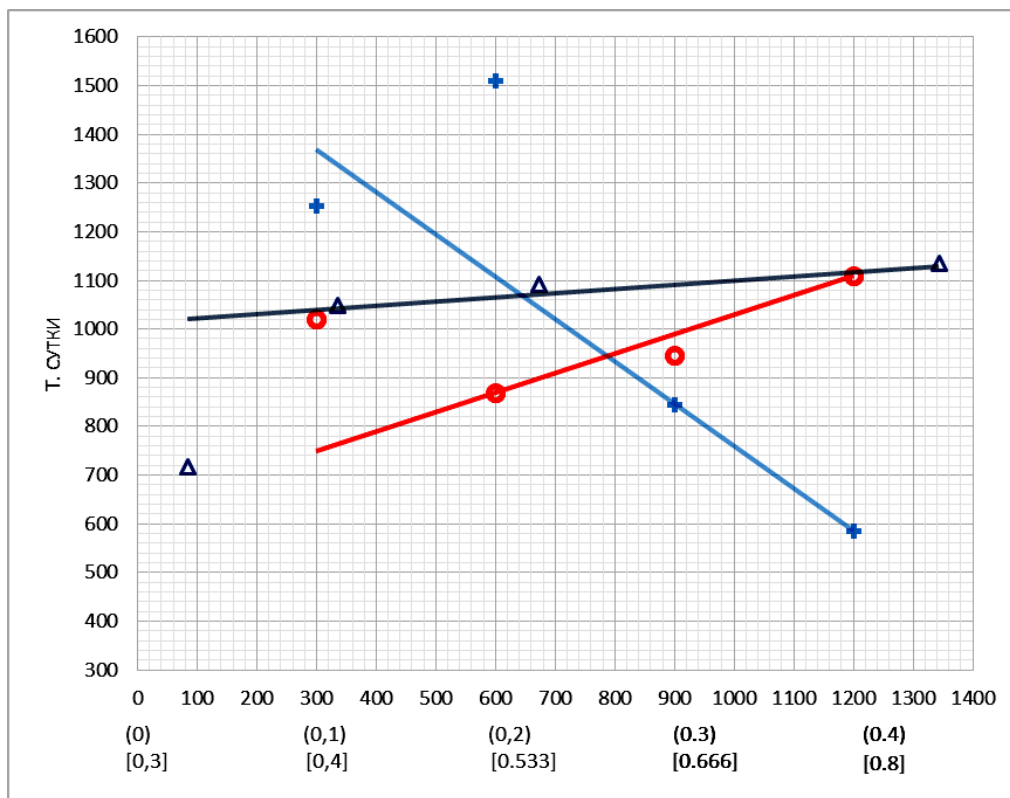


Рис. 8. Продолжительность в сутках 100% увеличения прироста кривизны балок для агрессивных условиях испытания образцов в зависимости от параметров переменной ступенчатой повторной нагрузки.

Условные обозначения к рис 8: T- период полной стабилизации прироста величины кривизны в сутках. Ось абсцисс: цифры без скобок предназначены для параметра t_u -длительность цикла переменной нагрузки в часах (треугольник); цифры в круглых скобках предназначены для параметра $\eta = t_{\max} / t_u$ (засечка); цифры в квадратных скобках предназначены для параметра $\rho = M_{\min} / M_{\max}$ (окружность).

$$T = 0,00000101 \cdot (1601 - 2540\eta)(387 + 903\rho)(1048 + 0,00854t_u)$$

Результаты соотношения соответственно для 100% и 95% прироста величины кривизны, а также величины соотношения соответственно для 100 и 95% периода затухания прироста кривизны балок для неагрессивных и агрессивных условий испытаний в зависимости от параметров переменной ступенчатой повторной нагрузки приведены в табл. 1.

Таблица 1

Соотношения для 100% и для 95% прироста кривизны, а так же соотношения для 100% и для 95% периода затухания прироста кривизны в зоне чистого изгиба балок для неагрессивных и агрессивных условий испытаний в зависимости от параметров переменной ступенчатой повторной нагрузки

Шифр образцов, <i>неагрес. усл</i> <i>агрес. усл</i>	Параметры переменной нагрузки			100% прирост кривизны во времени		95% прирост кривизны во времени		Период затухания 100% прироста кривизны во времени		Период затухания 95% прироста кривизны во времени	
	t_u , часы	$\eta = \frac{t_{M_{\max}}}{t_u}$	$\rho = \frac{M_{\max}}{M_{\max}}$	Величина $\Delta K \cdot 10^{-6}, 1/M$	Частное величин ΔK	Величина $\Delta K \cdot 10^{-6}, 1/M$	Частное величин ΔK	Величина T , сутки	Частное величин T	Величина T , сутки	Частное величин T
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
А-7	84	0,1	0,4	50	1,52	48	1,55	2700	3,00	396	2,64
А-8				33		31		900		160	
Д-9	84	0,2	0,533	50	0,93	48	0,94	2550	5,10	396	4,71
Д-10				54		51		500		84	
К-11	84	0,3	0,666	63	1,19	50	1,20	2400	2,67	324	2,70
К-12				53		50		900		120	
О-27	84	0,4	0,8	101	1,31	96	1,32	3250	5,00	504	9,88
О-28				77		73		650		51	
Б-15	336	0,1	0,8	70	1,75	67	1,76	1950	2,05	288	1,92
Б-16				40		38		950		150	
Е-29	336	0,2	0,4	108	2,84	103	2,86	2850	1,30	396	1,29
Е-30				38		36		2200		306	
Л-17	336	0,3	0,533	59	4,92	56	5,09	3350	3,19	504	3,36
Л-18				12		11		1050		150	
П-31	336	0,4	0,666	79	2,26	75	2,27	2550	4,64	396	5,50
П-32				35		33		550		72	

Продолжение таблицы 1											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
В-36	672	0,1	0,666	189	4,85	180	4,86	6000	5,00	840	4,67
В-36				39		37		1200		180	
Ж-33	672	0,2	0,8	315	5,83	299	5,86	8850	2,53	1400	2,78
Ж-34				54		51		3500		504	
М-21	672	0,3	0,4	58	2,90	55	2,89	3500	4,67	540	5,29
М-22				20		19		750		710	
Р-13	672	0,4	0,5333	94	1,40	89	1,39	900	2,00	132	2,20
Р-14				67		64		450		102	
Г-3	1344	0,1	0,533	44	4,89	42	5,25	6000	2,50	900	1,67
Г-4				9		8		2400		540	
З-38	1344	0,2	0,666	72	2,06	68	2,06	2500	1,85	360	1,82
З-37				35		33		1350		198	
Н-23	1344	0,3	0,8	75	1,83	71	1,82	2750	3,93	378	4,45
Н-24				41		39		700		85	
С-25	1344	0,4	0,4	49	3,06	47	3,62	3200	4,38	480	7,38
С-26				16		13		730		65	
Среднее для неагрессивных условий				92	2,34	88	2,39	3456	2,94	515	2,91
Среднее для агрессивных условий				39		37		1174		177	

Данные табл. 1 показывают, что в неагрессивных газовойздушных условиях испытания прирост кривизны по сравнению с агрессивными условиями испытания, предусматривающее периодическое увлажнение балок 3% раствором NaCl, превышает в среднем в 2,72 и 2,80 раза соответственно для 100% и 95% прироста кривизны, а период затухания прироста кривизны составляет больше в среднем – в 3,36 и 3,89 раза соответственно для 100% и 95% прироста кривизны.

В табл. 2 приведены значения для 100% и 95% прироста кривизны и величины для 100% и 95% периода затухания прироста кривизны балок и их соотношения для неагрессивных и агрессивных условий испытаний при действии длительной постоянной изгибающей нагрузки.

Таблица 2

Значения соответственно для 100% и 95% прироста кривизны и соответственно для 100% и 95% периода затухания прироста кривизны в зоне чистого изгиба балок и их соотношения для неагрессивных и агрессивных условий при действии длительной постоянной изгибающей нагрузки

Шифр образцов (№), с учётом вида воздействию среды (H, A)	Постоянная изгибающая нагрузка $M, Kz \cdot cm;$ ($M/M_{разр}$)	100% величина прироста кривизны ΔK		95% величина прироста кривизны, ΔK		100% период затухания прироста кривизны, (T)		95% период затухания прироста кривизны, (T)	
		Величина $\Delta K \cdot 10^{-6}, 1/M$	Отношение $B,$ для различных условий испытания	Величина $\Delta K \cdot 10^{-6}, 1/M$	Отношение $B,$ для различных условий испытания	Величина T, сутки.	Отношение T, для различных условий испытания	Величина на T, сутки.	Отношение T, для различных условий испытания
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T-1(H)	84272 ($0,9M_{разр}$)	84	$\frac{T-1(H)}{T-2(A)} = 1,53$	80	$\frac{T-1(H)}{T-2(A)} = 1,51$	750	$\frac{T-1(H)}{T-2(A)} = 2,14$	200	$\frac{T-1(H)}{T-2(A)} = 4,0$
T-1 (A)	84272 ($0,9M_{разр}$)	55	-	53	-	350	-	50	-
Ц-42(H)	47751 ($0,51M_{разр}$)	49	$\frac{Ц-42(H)}{Ц-41(A)} = 3,77$	47	$\frac{Ц-42(H)}{Ц-41(A)} = 3,92$	1500	$\frac{Ц-42(H)}{Ц-41(A)} = 0,44$	200	$\frac{Ц-42(H)}{Ц-41(A)} = 0,40$
Ц-41(A)	47751 ($0,51M_{разр}$)	13	-	12	-	3400	-	500	-
Ч-40(H)	38388 ($0,41M_{разр}$)	37	-	35	-	1900	-	300	-
У-5(H)	29025 ($0,31M_{разр}$)	42	$\frac{У-5(H)}{У-6(A)} = 1,91$	40	$\frac{У-5(H)}{У-6(A)} = 1,90$	4850	$\frac{У-5(H)}{У-6(A)} = 3,59$	710	$\frac{У-5(H)}{У-6(A)} = 3,55$
У-6(A)	29025 ($0,31M_{разр}$)	22	-	21	-	1350	-	200	-

Данные табл. 2 показывают, что для изгибающей постоянной нагрузки $M_{on} = 0,9M_{разр}$ величина 100% прироста кривизны в неагрессивных условиях испытания в 1,53 раза превышает значение 100% прироста кривизны в агрессивных условиях испытания, а увеличение для 100% периода затухания полного прироста кривизны в соответствующих условиях составляет 2,14 раза. С уменьшением уровня загрузки постоянной изгибающей нагрузкой период затухания прироста кривизны увеличивается.

При снижении уровня загрузки постоянной нагрузкой в 2,9 раза период полного затухания 100% прироста кривизны балок в неагрессивной среде увеличивается в 6,5 раза рис.9.

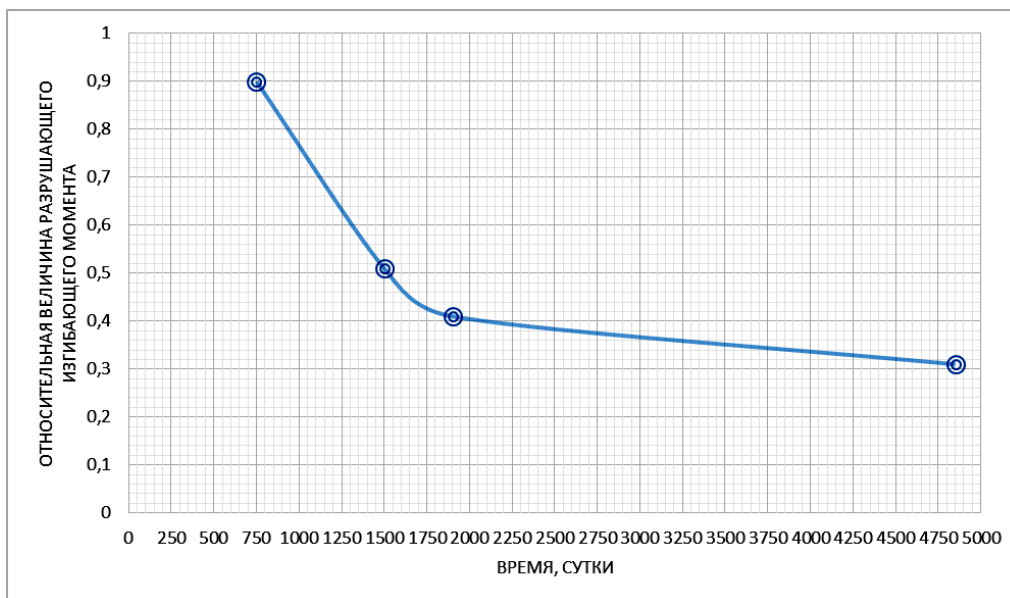


Рис. 9. Период полного затухания 100% прироста кривизны балок при действии длительной постоянной нагрузки в неагрессивной среде

Результаты сравнения средней величины прироста кривизны и среднего периода затухания прироста кривизны соответственно для действия переменной и постоянной изгибающих нагрузок приведены в табл. 3

Таблица 3

Сравнение средней величины прироста кривизны и среднего периода затухания прироста кривизны при действии переменной и постоянной изгибающей нагрузок

Условия испытания Н, А	Переменная изгибающая нагрузка $M_{перем} = 0,77M_{разр}$ Постоянная изгибающая нагрузка $M_{пост} = 0,77M_{разр}$	100% величина прироста кривизны ΔK		95% величина прироста кривизны ΔK		100% средний период затухания прироста кривизны, T		95% средний период затухания прироста кривизны, T	
		Величина $\Delta K \cdot 10^{-6}, 1/м$	Отношение $\Delta K_{Мпер}/\Delta K_{Мпост}$	Величина $\Delta K \cdot 10^{-6}, 1/м$	Отношение $\Delta K_{Мпер}/\Delta K_{Мпост}$	Величина на T , сутки	Отношение $T_{Мпер}/T_{Мпост}$	Величина на T , сутки	Отношение $T_{Мпер}/T_{Мпост}$
Н	$M_{перем}$	92	1,10	88	1,10	3456	4,61	515	2,58
Н	$M_{пост}$	84		80		750		200	
А	$M_{перем}$	39	0,71	37	0,70	1174	3,35	177	3,54
А	$M_{пост}$	55		53		350		50	

Данные табл. 3 показывают, что в неагрессивной среде переменная нагрузка в 1,1 раза увеличивает среднюю величину 100% прироста кривизны и в 4,61 раза, среднее значение 100% периода полного затухания прироста кривизны по сравнению с действием постоянной изгибающей нагрузки. В агрессивной среде переменная нагрузка увеличивает в 3,35 раза среднее значение 100% периода полного затухания прироста кривизны по сравнению с аналогичными характеристиками при действии постоянной изгибающей нагрузки.

Выводы:

1. Получены линейные функциональные зависимости 95% и 100% прироста кривизны опытных образцов в зависимости от параметров переменной ступенчатой повторной изгибающей нагрузки для агрессивных и неагрессивных условий испытания.
2. Установлены линейные функциональные зависимости продолжительности 95% и 100% увеличения прироста кривизны экспериментальных балок в зависимости от параметров переменной ступенчатой повторной изгибающей нагрузки для агрессивных и неагрессивных условий испытания.
3. Абсолютный прирост кривизны и период затухания прироста кривизны опытных образцов при действии переменной ступенчатой повторной нагрузки в неагрессивных условиях испытания превышают аналогичные характеристики, полученные в агрессивных условиях.
4. Абсолютный прирост кривизны и период затухания прироста кривизны экспериментальных балок при действии постоянной изгибающей нагрузки в неагрессивных условиях испытания превышают аналогичные характеристики в агрессивных условиях. При снижении уровня загрузки постоянной нагрузкой период полного затухания прироста кривизны увеличивается.
5. В неагрессивной среде переменная ступенчатая повторная изгибающая нагрузка увеличивает абсолютный прирост кривизны и период полного затухания прироста кривизны по сравнению с действием постоянной нагрузки.
6. В агрессивной среде переменная ступенчатой повторная изгибающая нагрузка увеличивает период полного затухания прироста кривизны по сравнению с аналогичной характеристикой при действии постоянной изгибающей нагрузки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мигунов В.Н. Экспериментально-теоретическое исследование коррозии и долговечности железобетонных конструкций с трещинами. Часть 1: моногрф. Пенза: ПГУАС, 2013. 332с.
2. Маринин А.Н. Гарибов Р.Б. Овчинников И.Г. Сопротивление железобетонных конструкций воздействию хлоридной коррозии и карбонизации. Саратов; «Рата», 2008. 259 с.
3. Овчинников И.Г. Раткин В.В. Землянский А.А. Моделирование поведения железобетонных элементов конструкций в условиях воздействия хлоридсодержащих сред. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2000. 232 с.
4. Васильев А.И. Подвальный А.М. Прогноз коррозии арматуры железобетонных конструкций автодорожных мостов в условиях хлоридной агрессии и карбонизации / Бетон и железобетон. 2002. №6. С. 27-32.
5. Петров В.В. Нелинейная инкрементальная строительная механика. М.: Инфра-Инженерия, 2014. 480 с.
6. Мигунов В.Н. Скачков Ю.П. Овчинников И.И. Влияние поперечных и продольных трещин на долговечность, деформационные и прочностные свойства обычных железобетонных элементов в различных агрессивных условиях / Бетон и железобетон. 2012. №3. С. 20-23.
7. Долговечность железобетона в агрессивных средах /С.Н. Алексеев, Ф.М. Иванов, С. Модры, П. Шисль. М.: Стройиздат, 1990. 320 с.
8. Мигунов, В.Н. Коррозия арматуры в трещинах железобетонных конструкций в газовой атмосфере производственных зданий / Изв. вузов. Строительство. 2008. №8. С. 4-9.
9. Мигунов В.Н. Моделирование работы изгибаемых железобетонных элементов при действии переменной эксплуатационной нагрузки и хлоридсодержащей среды/ Жилищное строительство. 2011. №1 С.27-29.
10. Мурашко Л.А. Исследование напряженно деформированного состояния железобетонных рам при длительных постоянных и периодических нагрузках: специальность 05.23.01: дис... канд. техн. наук / КИСИ. Киев: 1974. 195с.
11. Барашиков А.Я. Исследование длительной работы железобетонных конструкций при переменных нагрузках: специальность 05.23.01: дис.... д-ра техн. наук / КИСИ. Киев, 1977. 297 с.
12. Александровский С.В. Багрий В.Я. Ползучесть бетона при периодических воздействиях. М.: Стройиздат, 1970. 167с.
13. Гордеева Т.Ф. Исследование изгибаемых железобетонных элементов при повторных статических нагружениях: специальность 05.23.01: дис... канд. техн. наук / НИИСК. Киев, 1970. 208с.
14. Крамарчук П.П. Исследование деформации бетона и изгибаемых железобетонных элементов под действием длительных повторных нагрузок: специальность 05.23.01: дис... канд. техн. наук / КИСИ. Киев, 1971. 162 с.

15. Новотарский И.П. Исследование изгибаемых железобетонных элементов при постоянных и периодических нагрузках высокого уровня.: специальность 05.23.01: дисс... канд. техн наук/ КИСИ. Киев, 1976. 184с.
16. Гуца Ю.П. Ларичева И.Ю. Разработать рекомендации по расчёту ширины раскрытия и условиям закрытия трещин в изгибаемых элементах при сложных режимах нагружения / Научно-технический отчёт. М.: НИИЖБ, 1979.
17. Мигунов В.Н. Экспериментально-теоретическое исследование коррозии и долговечности железобетонных конструкций с трещинами. Часть 2: моногрф. Пенза: ПГУАС, 2013. 304с.
18. Венников В.А. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики): учебн. пособие для вузов. М.: Высш. школа, 1976. 479 с.
19. Мигунов В.Н. Установка для режимных испытаний железобетонных балок при действии медленно меняющихся нагрузок в присутствии агрессивной среды (статья) / Реферативный журнал строительства и архитектуры. ВНИИС. сер. 17. вып.7. М., 1983. 1 с.
20. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента. М.: Мир. 1972. 381 с.
21. Налимов В.В. Теория эксперимента. М.: Наука, 1971. 208 с.
22. Налимов В.В. Голикова Т.И.. Логические основания планирования эксперимента. М.: Металлургия, 1981. 151 с.
23. Мигунов В.Н. Влияние переменной ступенчато-повторной нагрузки и агрессивной среды на кинетику жесткости и ширины раскрытия трещин изгибаемых железобетонных конструкций / Изв. вузов. Строительство. 1998. № 6. С. 124-127.
24. Мигунов, В.Н. Влияние переменной нагрузки и амплитуды изменения ширины раскрытия трещин на коррозионное поражение арматуры в трещинах железобетонных конструкций / Изв. вузов. Строительство. 2002. № 10. С. 134–137.

Рецензент: Заместитель Председателя Поволжского отделения Российской академии транспорта, академик РАТ, доктор технических наук, профессор Овчинников Игорь Георгиевич.

Migunov Viktor

Penza State University of Architecture and Construction

Russia, Penza

E-Mail: Viktor5043@rambler.ru

Technique and results of long-term experimental studies on the kinetics of curvature bent conventional reinforced concrete elements under the action of a variable speed re-load in non-aggressive and aggressive environments

Abstract. One of the reasons for non-compliance and the actual durability of concrete structures undergoing in-service exposure to chloride environments is the lack of regulations on the impact of the provisions of the step kinds of variables external influences, as the most dangerous for concrete elements for durability. Variable load intensifies corrosion damage fittings in the zone of influence of transverse cracks and promotes corrosion of longitudinal cracks in the protective layer of concrete. Direct evaluation of the project the residual service life of reinforced concrete structures, as with the power transverse cracks and corrosion longitudinal cracks in the protective layer of concrete building codes do not give.

Long-term operational rigidity bent reinforced concrete elements, which determines their deformation properties and, ultimately, longevity depends on the kinetics of curvature over time. Due to the complex nature of the physical and chemical nature of the interaction between reinforcement and concrete in aggressive chloride-containing environments with the most reliable scientific results obtained in experimental studies on direct models of reinforced concrete structures as compared with the theoretical.

With the help of the developed method of studying the kinetics of curvature of bent reinforced concrete structures, depending on the parameters of the variable speed re-load in aggressive and non-aggressive environments long held a balanced multivariate experiment bent direct conventional models of concrete structures.

The paper made analysis of the quantitative data of absolute increase of curvature, and the length of time increase the yield curvature of prototypes under the influence of variable speed and constant re-loading in aggressive and non-aggressive environments. The functional dependence of the curvature of growth and increase in the duration of growth of curvature of the experimental beams, depending on the parameters of the variable speed repeated bending load for aggressive and non-aggressive test conditions. There is a significant difference in the quantitative values for the conditions of exposure variable and constant load in an aggressive and non-aggressive environments that need to be considered in the relevant sections of the new editorial editions of the normative documents for the design and protection of reinforced concrete structures, operated not only aggressive, but also in non-aggressive environments.

Keywords: direct model of conventional reinforced concrete elements; transverse cracks; curvature; rigidity; variable speed and constant re-load; non-aggressive and aggressive air-gas liquid chloride-containing environments; balanced multivariate experiment.

REFERENCES

1. Migunov V.N. Jeksperimental'no-teoreticheskoe issledovanie korrozii i dolgovechnosti zhelezobetonnyh konstrukcij s treshhinami. Chast'1: monograf. Penza: PGUAS, 2013. 332s.
2. Marinin A.N. Garibov R.B. Ovchinnikov I.G. Soprotivlenie zhelezobetonnyh konstrukcij vozdeystviyu hloridnoj korrozii i karbonizacii. Saratov; «Rata», 2008. 259 s.
3. Ovchinnikov I.G. Ratkin V.V. Zemljanskij A.A. Modelirovanie povedenija zhelezobetonnyh jelementov konstrukcij v uslovijah vozdeystvija hloridsoderzhashhij sred. Saratov: Sarat. gos. tehn. un-t, 2000. 232 s.
4. Vasil'ev A.I. Podval'nyj A.M. Prognoz korrozii armatury zhelezobetonnyh konstrukcij avtodorozhnyh mostov v uslovijah hloridnoj agressii i karbonizacii / Beton i zhelezobeton. 2002. №6. S. 27-32.
5. Petrov V.V. Nelinejnaja inkremental'naja stroitel'naja mehanika. M.: Infra-Inzhenerija, 2014. 480 s.
6. Migunov V.N. Skachkov Ju.P. Ovchinnikov I.I. Vlijanie poperechnyh i prodol'nyh treshhin na dolgovechnost', deformacionnye i prochnostnye svoystva obychnyh zhelezobetonnyh jelementov v razlichnyh agressivnyh uslovijah / Beton i zhelezobeton. 2012. №3. S. 20-23.
7. Dolgovechnost' zhelezobetona v agressivnyh sredah /S.N. Alekseev, F.M. Ivanov, S. Modry, P. Shissl'. M.: Strojizdat, 1990. 320 s.
8. Migunov, V.N. Korrozija armatury v treshhinah zhelezobetonnyh konstrukcij v gazovozdushnoj atmosfere proizvodstvennyh zdanij / Izv. vuzov. Stroitel'stvo. 2008. №8. S. 4-9.
9. Migunov V.N. Modelirovanie raboty izgibaemyh zhelezobetonnyh jelementov pri dejstvii peremennoj jekspluatacionnoj nagruzki i hloridsoderzhashhej sredy/ Zhilishhnoe stroitel'stvo. 2011. №1 S.27-29.
10. Murashko L.A. Issledovanie naprjazhenno deformirovannogo sostojanija zhelezobetonnyh ram pri dlitel'nyh postojannyh i periodicheskijh nagruzkah: special'nost' 05.23.01: dis... kand. tehn. nauk / KISI. Kiev: 1974. 195s.
11. Barashikov A.Ja. Issledovanie dlitel'noj raboty zhelezobetonnyh konstrukcij pri peremennyh nagruzkah: special'nost' 05.23.01: dis.... d-ra tehn. nauk / KISI. Kiev, 1977. 297 s.
12. Aleksandrovskij S.V. Bagrij V.Ja. Polzuchest' betona pri periodicheskijh vozdeystvijah. M.: Strojizdat, 1970. 167s.
13. Gordeeva T.F. Issledovanie izgibaemyh zhelezobetonnyh jelementov pri povtornyh staticheskijh nagruzenijah: special'nost' 05.23.01: dis... kand. tehn. nauk / NIISK. Kiev, 1970. 208s.
14. Kramarchuk P.P. Issledovanie deformacii betona i izgibaemyh zhelezobetonnyh jelementov pod dejstviem dlitel'nyh povtornyh nagruzok: special'nost' 05.23.01: dis... kand. tehn. nauk / KISI. Kiev, 1971. 162 s.
15. Novotarskij I.P. Issledovanie izgibaemyh zhelezobetonnyh jelementov pri postojannyh i periodicheskijh nagruzkah vysokogo urovnja.: special'nost' 05.23.01: diss... kand. tehn nauk/ KISI. Kiev, 1976. 184s.

16. Gushha Ju.P. Laricheva I.Ju. Razrabotat' rekomendacii po raschjotu shiriny raskrytija i uslovijam zakrytija treshhin v izgibaemyh jelementah pri slozhnyh rezhimah zagruzenija / Nauchno-tehnicheskij otchjot. M.: NIIZhB, 1979.
17. Migunov V.N. Jeksperimental'no-teoreticheskoe issledovanie korrozii i dolgovechnosti zhelezobetonnyh konstrukcij s treshhinami. Chast' 2: monograf. Penza: PGUAS, 2013. 304s.
18. Vennikov V.A. Teorija podobija i modelirovanija (primenitel'no k zadacham jelektrojenergetiki): uchebn. posobie dlja vuzov. M.: Vyssh. shkola, 1976. 479 s.
19. Migunov V.N. Ustanovka dlja rezhimnyh ispytanij zhelezobetonnyh balok pri dejstvii medlenno menjajushhihsja nagruzok v prisutstvii agressivnoj sredy (stat'ja) / Referativnyj zhurnal stroitel'stva i arhitektury. VNIIS. ser. 17. vyp.7. M., 1983. 1 s.
20. Shenk H. Teorija inzhenernogo jeksperimenta. M.: Mir. 1972. 381 s.
21. Nalimov V.V. Teorija jeksperimenta. M.: Nauka, 1971. 208 s.
22. Nalimov V.V. Golikova T.I. Logicheskie osnovanija planirovanija jeksperimenta. M.: Metallurgija, 1981. 151 s.
23. Migunov V.N. Vlijanie peremennoj stupenchato-povtornoj nagruzki i agressivnoj sredy na kinetiku zhestkosti i shiriny raskrytija treshhin izgibaemyh zhelezobetonnyh konstrukcij / Izv. vuzov. Stroitel'stvo. 1998. № 6. S. 124-127.
24. Migunov, V.N. Vlijanie peremennoj nagruzki i amplitudy izmenenija shiriny raskrytija treshhin na korrozionnoe porazhenie armatury v treshhinah zhelezobetonnyh konstrukcij / Izv. vuzov. Stroitel'stvo. 2002. № 10. S. 134–137.