

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.21.012.35:625.1-027.45[:620.193]

О. И. ДУБИНЧИК<sup>1\*</sup>, В. Р. КИЛЬДЕЕВ<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup> Кафедра «Мосты и тоннели», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 53, эл. почта olya.dubinichic.62@mail.ru, ORCID 0000-0003-4059-2357

<sup>2</sup> Кафедра «Мосты и тоннели», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 53

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕРЫ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ МОСТОВ С УЧЕТОМ КОРРОЗИИ АРМАТУРЫ

**Цель.** Определение меры накопления повреждений железобетонного пролетного строения по критерию коррозии арматурных стержней для оценки фактического состояния конструкции. **Методика.** Для достижения поставленной цели рассмотрены и проанализированы причины появления трещин в бетоне, влияющие на долговечность железобетонной конструкции, работающей при многократно повторяющихся нагружениях. **Результаты.** Предложены зависимости для определения меры накопления повреждений, критической площади прокорродированной арматуры пролетного строения моста. В них учтены ширина раскрытия трещин в железобетонной балке пролетного строения, срок эксплуатации моста, глубина коррозии арматурного стержня. **Научная новизна.** Определена возможность неразрушающим методом определить глубину коррозии в арматурном стержне мостовой железобетонной конструкции. **Практическая значимость.** Определив меру накопления повреждений по критерию коррозии арматуры пролетного строения, можно прогнозировать сроки ее ремонтных работ.

**Ключевые слова:** железобетонная мостовая конструкция; трещины в бетоне пролетного строения; надежность; глубина коррозии арматурного стержня; критическая площадь арматуры; мера накопления повреждений; уровень надежности

#### Введение

Железнодорожный транспорт является одним из основных видов грузоперевозок в нашей стране. И поэтому бесперебойная и надежная его работа является основной задачей при эксплуатации. Одной из важных составляющих железных дорог являются мосты. Это довольно сложные и уникальные конструкции, которые требуют к себе особого внимания. Часть эксплуатируемых мостов – железобетонные.

Предполагаемый срок службы железобетонных конструкций, работающих на многократное повторное нагружение, составляет 80-100 лет. В процессе эксплуатации в пролетных строениях мостов появляются различные дефекты и повреждения, которые снижают несущую способность и их срок службы.

#### Цель

В существующих нормативных документах на проектирование мостовых железобетонных конструкций не содержится указаний по определению ширины раскрытия трещины и развития глубины коррозии арматуры при многократно повторных нагружениях. Ширина раскрытия трещины и динамика её изменения в процессе эксплуатации является одним из основных обобщающих показателей оценки состояния железобетонных конструкций и возможности надежной её работы.

#### Методика

Железобетонные конструкции не являются монолитными как принято их считать. Бетон имеет тонкие трещинки, которые появились в результате развития внутренних напряжений в процессе структурообразования. Образование

© О. И. Дубинчик, В. Р. Кильдеев, 2016

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

микротрещин начинается при твердении бетона. Они распространены в конструкции равномерно, не имеют ориентации и не сообщаются между собой. Помимо них в мостовых конструкциях могут быть технологические трещины, которые образовались при неблагоприятном режиме тепловлажностной обработки или последующем быстром их охлаждении, усадочные. Трещины могут возникать во время транспортирования и монтажа конструкций, при их складировании и перевозке. В центрально растянутых элементах и в растянутой зоне изгибаемых железобетонных элементах трещины появляются под действием постоянной и временной нагрузок в период эксплуатации сооружения [1].

Трещины оказывают определенное влияние на работу железобетонных конструкций. Они влияют на прочность, жесткость, устойчивость и долговечность конструкции. Трещины в бетоне способствуют поступлению влаги, воздуха и агрессивных веществ из окружающей среды к поверхности арматуры, вследствие чего её пассивное состояние на отдельных участках нарушается. В местах образования трещин усилие, воспринимаемое бетоном, передается на арматуру, и удлинение её в этих местах возрастает, что приводит к нарушению сцепления бетона и арматуры на некотором участке. В связи с этим процесс коррозии арматуры происходит не только в районе трещины, но и на участке потери сцепления и образования микрощели.

Многие трещины в бетоне «дышат» - величина их раскрытия меняется в процессе эксплуатации конструкции. Причиной этого есть влияние переменных температур и влажности, а также изменяющихся динамических нагрузок. Эти трещины более опасны в отношении коррозии арматуры, так как в них разрушаются защитные отложения.

По форме, размеру и направлению трещины бывают: усадочные, температурные, силовые и коррозионные.

Усадочные трещины образуются при интенсивной потере влаги поверхностными слоями бетона по сравнению с ядром. Чаще всего они имеют клиновидную форму и проникают в тело бетона на различную глубину. Это могут быть поверхностные трещины и сквозные. Сквозные образуются при наложении внешней нагрузки. Поверхностные трещины без воздействия внешних сил могут закрываться.

Температурные трещины возникают в местах больших перепадов температур.

Силовые трещины образуются под действием собственного веса, полезной нагрузки, неравномерной осадки основания. Они могут быть разной формы: сквозная с параллельными стенками, сквозная клиновидная, несквозная внахлестку, несквозная клиновидная, веретенообразная, замкнутая косая.

Коррозионные трещины в защитном слое появляются при больших растягивающих напряжениях в бетоне в результате накопления ржавчины на поверхности арматурного стержня. Коррозия арматуры может появиться и при монолитном защитном слое в следствие высокой пористости бетона, карбонизации, влияния блуждающих токов, агрессивности воздуха. Коррозионные трещины являются опасными независимо от их величины раскрытия. Они свидетельствуют об агрессивности среды, в которой бетон не выполняет своей защитной функции по отношению к арматуре, а также о далеко зашедшем незатухающем коррозионном процессе [1].

Наличие трещин в защитном слое бетона способствует образованию и развитию коррозии стальной арматуры. Трещины способствуют поступлению газов и влаги из атмосферы к поверхности арматуры. При коррозии происходит углубление образовавшихся язв и локализация коррозионного процесса с уменьшением сечения арматуры. Продуктом коррозии арматуры является образование ржавчины, которая способствует самозалечиванию тонких трещин и увеличению ширины раскрытия трещин более 0,2 мм для ненапряженной арматуры.

### Результаты

Наличие в железобетонной мостовой конструкции дефектов в виде трещин и коррозии арматурных стержней ведет к снижению надежной работоспособности сооружения. Для установления режима дальнейшей эксплуатации и определения сроков проведения ремонтных работ необходимо знать меру накопления повреждений. Её можно представить в виде:

$$\Psi = \frac{A_s - A_s^t}{A_s - A_s^{crc}}, \quad (1)$$

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

где  $A_s$  – первоначальная площадь арматуры балки, см<sup>2</sup>;  $A_s^t$  – площадь арматуры балки в момент технической диагностики, см<sup>2</sup>;  $A_s^{crc}$  – критическая площадь арматуры в результате коррозии, см<sup>2</sup>.

В начале эксплуатации  $A_s^t = A_s$ ,  $\psi = 0$  – повреждения отсутствуют, конструкция находится в хорошем состоянии. Когда  $A_s^t = A_s^{crc}$ ,  $\psi = 1,0$  – конструкция выработала свой ресурс, наступил момент разрушения.

Обследовав мостовую железобетонную конструкцию и определив ширину раскрытия трещин можно найти глубину коррозии арматурного стержня. На рис. 1 приведены графики, построенные по данным коррозии арматуры в зависимости от ширины раскрытия трещин в бетоне [2]. Как видно из рисунка (см. рис. 1), вероятность возникновения коррозионного процесса на арматуре в зоне трещин в бетоне тем выше, чем больше их раскрытие.

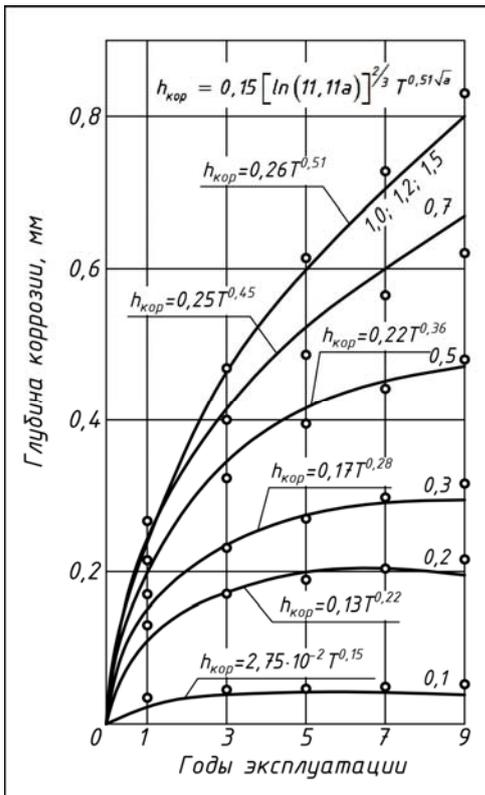


Рис. 1. Развитие коррозии арматуры в трещинах железобетона:

цифры на кривых – раскрытие трещин в миллиметрах; o – данные, полученные по аппроксимированным формулам)

Скорость развития коррозии находится в прямой зависимости от ширины раскрытия трещины: чем больше ширина раскрытия трещины, тем быстрее идет процесс коррозии.

Чтобы использовать эти графики в аналитических расчетах была получена математическая зависимость, в которую вошли три переменные: ширина раскрытия трещины, годы эксплуатации конструкции и глубина коррозии арматурного стержня.

Для графиков, методом наименьших квадратов была подобрана степенная функция, которая наиболее точно описывает каждый из них:

$$h_{кор} = cT^n, \tag{2}$$

где  $c$ ,  $n$  – числовые параметры;  $T$  – год эксплуатации конструкции.

Чтобы получить одну зависимость для аргумента и показателя степени подобранных функций были построены свои графики и тоже аппроксимированы (рис. 2).

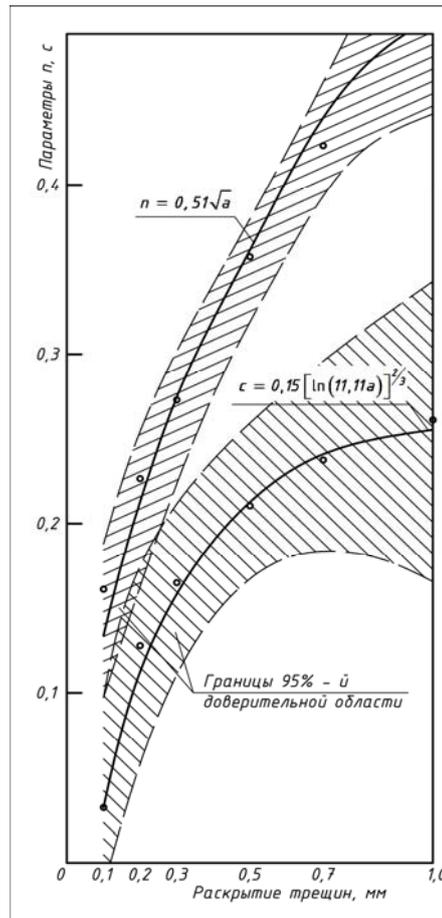


Рис. 2. Графики изменения коэффициентов регрессионного уравнения

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

График аргументов лучше всего описывает логарифмическая функция, а график показателей степени – степенная функция. Таким образом получена зависимость для описания процесса глубины коррозии в зависимости от ширины раскрытия трещины и срока эксплуатации

$$h_{кор} = 0,15 [\ln(11,11 \cdot a)]^{2/3} T^{0,51\sqrt{a}}, \quad (3)$$

где  $a$  – ширина раскрытия трещины, мм. Площадь арматурного стержня, которая воспринимает нагрузку в момент технической диагностики, с учетом коррозии в виде сегмента, можно определить по формуле [3]:

$$A_s^t = \pi r^2 - \frac{4}{3} h_{кор} - \sqrt{r^2 - (r - h_{кор})^2}, \quad (4)$$

где  $r$  – проектный радиус рабочей арматуры в мостовой конструкции.

Данная формула используется, когда к конструкции нет постоянного доступа влаги - арматура находится в ребре балки. Но очень часто, к арматуре, находящейся в плите балки, из-за трещин и плохой работы водоотводных труб, существует доступ влаги. В этом случае коррозия арматуры происходит по кольцу, и площадь арматурного стержня вычисляется по формуле

$$A_s^t = \pi(r - h_{кор})^2. \quad (5)$$

Критическую площадь прокорродированной арматуры можно определить из напряженного состояния железобетонного пролетного строения моста.

Когда нейтральная ось находится в плите балки высота сжатой зоны и предельный момент определяются по формулам [4]:

$$x = (R_s A_s - R_{sc} A_s') / R_b b_f'; \quad (6)$$

$$M \leq R_b b_f' x (h_0 - 0,5x) + R_{sc} A_s' (h_0 - a_s'), \quad (7)$$

где  $R_s$  – расчетное сопротивление арматуры растяжению;  $R_{sc}$  – расчетное сопротивление арматуры сжатию;  $R_b$  – расчетное сопротивление бетона осевому сжатию;  $b_f'$  – приведенная ширина плиты балки;  $A_s$  – площадь сечения ненапрягаемой растянутой продольной арматуры;  $A_s'$  – площадь сечения ненапрягаемой сжатой продольной арматуры;  $h_0$  – рабочая высота сечения балки;  $a_s'$  – расстояние от центра тяжести сжатой ненапрягаемой продольной арматуры до ближайшей грани сечения.

После преобразования формулы (7) получаем квадратное уравнение, корнями которого будет выражение

$$x_{1,2} = \left[ R_b b_f' h_0 \pm \sqrt{(R_b b_f' h_0)^2 + 2 R_b b_f' (R_{sc} A_s' (h_0 - a_s') - M)} \right] / R_b b_f'. \quad (8)$$

Вместо  $x$  подставляем его значение (6) и получаем критическую площадь арматуры с учетом коррозии

$$A_s^{crc} \leq \left[ R_b b_f' h_0 \pm \sqrt{(R_b b_f' h_0)^2 + 2 R_b b_f' (R_{sc} A_s' (h_0 - a_s') - M)} + R_{sc} A_s' \right] / R_s. \quad (9)$$

Аналогично получена формула для условия, когда нейтральная ось находится в ребре балки:

$$A_s^{crc} \leq \left[ R_b b h_0 \pm \sqrt{(R_b b h_0)^2 + 2 R_b b (R_b h_f' (b_f' - b)(h_0 - 0,5 h_f') + R_{sc} A_s' (h_0 - a_s') - M)} + R_{sc} A_s' + R_b (b_f' - b) h_f' \right] / R_s, \quad (10)$$

где  $b$  – ширина ребра балки;  $h_f'$  - приведенная толщина плиты балластного корыта.

В табл. 1 приведены нормативные значения  $\psi$  [4].

Нормативные значения меры накопления повреждений

Вероятность неразрушения, $P(\psi)$	0,999	0,998	0,995	0,985	0,958	0,897	0,794	0,641
Значение меры повреждений, $\psi$	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70

## Выводы

Используя данные (см. табл. 1) можно по величине накопления меры повреждений  $\psi$  оценить уровень надежности пролетного строения по критерию коррозии арматуры и объективно оценить фактическое состояние конструкции. Главным при решении этой задачи является назначение уровня надежности  $P(\psi)$ .

Наступление предельного состояния по условию выносливости арматуры в пролетных строениях мостов связано с достаточно большими материальными затратами и представляет опасность для жизни людей. Поэтому уровень надежности не должен быть ниже 0,95, соответственно, предельное значение меры накопления повреждений не должно быть выше 0,55.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Москвин, В. М. Трещины в железобетоне и коррозия арматуры [Текст] / В. М. Москвин, С. Н. Алексеев, Г. П. Вербецкий, В. И Новгородский. – Москва : Стройиздат, 1971. – 143 с.
2. ВСН 32-78. Инструкция по определению грузоподъемности железобетонных балочных пролетных строений автодорожных мостов [Текст]. – Москва : Транспорт, 1979. – 141 с.
3. Выгодский, М. Я. Справочник по элементарной математике [Текст] / М. Я. Выгодский. – Москва : Наука, 1982. – 335 с.
4. ДБН В.2.3-14:2006. Споруди транспорту. Мости та труби. Правила проектування [Текст]. – Надано чинності 2007-02-01. – Київ : Мін. буд., архіт. та житл.-комун. госп-ва, 2006. – 359 с.
5. Низамутдинова, Р. З. Выбор меры накопления повреждений для оценки ресурса железобетонных пролетных строений мостов [Текст] / Р. З. Низамутдинова // Межвуз. сб. науч. тр. – Ташкент : Изд-во ТашИИТ, 1996. – 128 с.
6. Ройтман, А. Г. Надежность конструкций эксплуатируемых зданий [Текст] / А. Г. Ройтман. – Москва : Стройиздат, 1985. – 175 с.
7. Мамажанов, Р. К. Вероятностное прогнозирование ресурса железобетонных пролетных строений мостов [Текст] / Р. К. Мамажанов. – Ташкент : Фан, 1993. – 156 с.
8. Болотин, В. В. Применение методов теории вероятности и теории надежности в расчетах сооружений [Текст] / В. В. Болотин. – Москва : Стройиздат, 1971. – 255 с.
9. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты [Текст] / В. М. Москвин, Ф. М. Иванов, С. Н. Алексеев, Е. А. Гузеев. – Москва : Стройиздат, 1980. – 536 с.
10. Математические модели процессов коррозии бетона [Текст] / Б. В. Гусев, А. С. Фацусович, В. Ф. Степанова, Н. К. Розенталь. – Москва : Информ. – изд. ТИМР, 1996. – 104 с.
11. Колесник, Д. Ю. Сучасні уявлення про корозію цементного каменю в бетоні під дією води [Текст] / Д. Ю. Колесник, К. К. Пушкарьова, Л. О. Шейнич // Штучні споруди : автомобільні дороги. – 2012. – № 4 (228). – С. 33-37.
12. Особенности коррозии выщелачивания в современных бетонах [Текст] / Г. И. Овчаренко, Н. Г. Бровкина, О. С. Носкова и др. // Технология бетонов. – 2008. – № 3. – С. 62-63.
13. Соломка, В. І. Хімічна та біологічна корозія бетону і її наслідки для залізобетонних конструкцій мостів [Текст] / В. І. Соломка // Мости та тунелі: теорія, дослідження. – 2013. – Вип. 4. – С. 107-112.
14. Подвальный, А. М. Физико-химическая механика – основа научных представлений о коррозии бетона и железобетона [Текст] / А. М. Подвальный // Бетон и железобетон. – 2000. – № 5. – С. 23-27.
15. Медведев, К. В. Прочность надежность и долговечность железобетонных элементов автодорожных мостов [Текст] / К. В. Медведев, Ф. В. Яцко // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – 2013. – Вип. 4. – С. 52-59.
16. Шестовицкий, Д. А. Прогнозирование срока службы железобетонных мостов [Текст] / Д. А. Шестовицкий // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – 2013. – Вип. 4. – С. 120-129.
17. ISO 2394, 1998. General principles on reliability for structures 2nd edn. Geneva, Switzerland : ISO.
18. Takewaka K., Mastumoto S. Quality and Cover Thickness of Concrete Based on the Estimation of Chloride Penetration in Marine Environments.

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

ACI SP 109-17, American Concrete Institute, 1988. pp. 381-400.  
19. Tingcheng Yan, Chunhua Lu, Zhiren Wu, Ronggui Liu Durability of Pre-stressed Concrete

Structure Structure Suffering from Chloride Ions' Invasion. International Journal of Nonlinear Science, 2008, vol. 5, pp. 184-192.

О. І. ДУБІНЧИК<sup>1\*</sup>, В. Р. КІЛЬДЕЄВ<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup> Кафедра «Мости і тунелі», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 53, ел. пошта olya.dubinichic.62@mail.ru, ORCID 0000-0003-4059-2357

<sup>2</sup> Кафедра «Мости і тунелі», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 53

## ВИЗНАЧЕННЯ МІРИ НАКОПИЧЕННЯ УШКОДЖЕНЬ ЗАЛІЗНИЧНИХ МОСТІВ З УРАХУВАННЯМ КОРОЗІЇ АРМАТУРИ

**Мета.** Визначення міри накопичення ушкоджень залізобетонної прогонової будови по критерію корозії арматури для визначення фактичного стану конструкції. **Методика.** Для досягнення поставленої мети розглянуто та проаналізовано причини виникнення тріщин в бетоні, які впливають на довговічність залізобетонної конструкції, що працює при багаторазово повторних навантаженнях. **Результати.** Запропоновано залежності для визначення міри накопичення ушкоджень, критичної площі арматури прогонової будови мосту ушкодженої корозією. У них враховано ширину розкриття тріщин в залізобетонній балці прогонової будови, термін експлуатації мосту, глибина корозії арматурного стрижня. **Наукова новизна.** Визначено можливість не руйнуючим методом визначити глибину корозії в арматурному стрижні мостової залізобетонної конструкції. **Практична значимість.** Визначивши міру накопичення пошкоджень по критерію корозії арматури прогонової будови, можливо прогнозувати терміни її ремонтних робіт.

*Ключові слова:* залізобетонна мостова конструкція; тріщини в бетоні прогонової будови; надійність; глибина корозії арматурного стрижня; критична площа арматури; міра накопичення ушкоджень; рівень надійності

О. І. DUBINCHIK<sup>1\*</sup>, V. R. KILDEEV<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup> Department «Bridges and tunnels» of Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, 2, Lazaryana Str., Dnepropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 53, e-mail olya.dubinichic.62@mail.ru, ORCID 0000-0003-4059-2357

<sup>2</sup> Department « Bridges and tunnels » of Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, 2, Lazaryana Str., Dnepropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 53

## DETERMINATION OF DAMAGES ACCUMULATION MEASURE OF RAILWAY BRIDGES TAKING INTO ACCOUNT OF ARMATURE CORROSION

**Purpose.** Determination of damages accumulation measure of reinforce-concrete span structure on the criterion of armature corrosion for estimation of actual state of struction. **Methodology.** For the achievement of the put aim reasons are considered and analyzed appearances of cracks in a concrete, influencing on longevity of reinforce-concrete structure which works at repeatedly iterative loads. **Findings.** For determination of damages accumulation measure with procorroded armature critical area of bridge span structure are offered the relationships. In them taken into account width of cracks opening in the reinforce-concrete beam of cpan-structure, term of bridge exploitation and depth of armature bar corrosion. **Originality.** Possibility to define the depth of corrosion by, non-destructive method in the armature bar of bridge reinforce-concrete structure was realized. **Practical value.** After defining of damages accumulation measure on the criterion of span structure armature corrosion, it is possible to forecast the terms of it repair works.

*Keywords:* reinforce-concrete bridge structure; cracks in the concrete of span structure; level reliability; depth of armature bar corrosion; critical area of armature; damages accumulation measure

## REFERENCES

1. Moskvina, V. M. *Treshchiny v zhelezobetone i korroziya armatury* [Cracks in reinforced concrete and corrosion of armature]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1971. 143 p.
2. VSN 32-78. *Instruktsiya po opredeleniyu gruzopodemnosti zhelezobetonnykh balochnykh proletnykh stroeniy avtodorozhnykh mostov* [Instruction for determining the carrying capacity of reinforced concrete beam span structures of highway bridges]. Moscow, Transport, 1979. 141 p.
3. Vygodskiy, M. Ya. *Spravochnik po elementar-noy matematike* [Elementary mathematics handbook] Moscow, Science, 1982. 335 p.
4. DBN V.2.3-14-2006. *Sporudy transportu. Mosty ta truby. Pravyla proektuvannya* [State Standard V.2.3-14-2006. Transport constructions. Bridges and pipes. Design rule]. Kyiv, Ministerstvo budivnytstva, arkhitektury i zhytlovo-komunalnoho hospodarstva Publ., 2006. 359 p.
5. Nizamutdinova, R. Z. *Vybor mery nakopleniya povrezhdeniy dlya otsenki resursa zhelezobetonnykh proletnykh stroeniy mostov* [Selection of measure damage accumulation for asses of reinforced concrete bridge spans structure resource]. Tashkent, TashIIT Publ., 1996. 128 p.
6. Roytman, A. G. *Nadezhnost konstruksiy ekspluatiruemyykh zdaniy* [Reliability of structures maintained buildings]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1985. 175 p.
7. Mamazhanov R. K., Kildeeva O. I. *Prognozirovaniye polzuchesti betona proletnykh stroeniy mostov pri narastayushchikh nagruzheniyakh* [Concrete of creep prediction bridge spans at increasing loadings] *Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov* [Interuniversity collection of scientific papers]. Tashkent, TashIIT Publ., 1996, issue 226/62, pp. 33-38.
8. Bolotin V. V. *Primeneniye metodov teorii veroyatnosti i teorii nadezhnosti v raschetakh sooruzheniy* [Application of the theory of probability and reliability theory in the calculation of structures]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1971, 255 p.
9. Moskvina V. M., Ivanov F. M., Alekseev S. N., Guzeev Ye. A. *Korroziya betona i zhelezobetona, metody ikh zashchity* [Corrosion of concrete and reinforced concrete, methods of protection]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1980, 536 p.
10. Gusev B. V., Facvusovich A. S., Stepanova V. F., Rozental N. K. *Matematicheskie modeli protsessov korrozii betona* [Mathematical models of concrete corrosion processes]. Moscow, TIMR Publ., 1996, 104 p.
11. Kolesnyk D. Yu., Pushkar'ova K. K., Sheynych L. O. *Suchasni uyavleniya pro koroziiyu tsementnoho kamenyu v betoni pid diyeyu vody* [Modern views on the corrosion of cement in concrete under water]. *Shtuchni sporudy : avtomobilni dorohy – Artificial buildings: roads*, 2012, no 4 (228), pp. 33-37.
12. Ovcharenko G. I., Brovkina N. G., Noskova O. S. et al. *Osobennosti korrozii vyshchelachivaniya v sovremennykh betonakh* [Features of corrosion leaching in modern concretes]. *Tekhnologiya betonov – Concrete technology*, 2008, no 3, pp. 62-63.
13. Solomka V. I. *Khimichna ta biolohichna koroziiya betonu i yiyi naslidky dlya zalizobetonnykh konstruksiy mostiv* [Chemical and biological corrosion of concrete and its implications for reinforced concrete structures bridges]. *Mosty ta tuneli: teoriya, doslidzhennya, praktyka – Bridges and tunnels: theory, research, practice*, 2013, issue 4, pp. 107-112.
14. Podvalnyy A. M. *Fiziko-khimicheskaya mekhanika – osnova nauchnykh predstavleniy o korrozii betona i zhelezobetona* [Physico-chemical mechanics – the basis of scientific ideas about the corrosion of concrete and reinforced concrete]. *Beton i zhelezobeton – Concrete and reinforced concrete*, 2000, no 5, pp. 23-27.
15. Medvedev K. V., Yatsko F. V. *Prochnost nadezhnost i dolgovechnost zhelezobetonnykh elementov avtodorozhnykh mostov* [Strength, reliability and durability of reinforced concrete highway bridge elements]. *Mosty ta tuneli: teoriya, doslidzhennya, praktyka – Bridges and tunnels: theory, research, practice*, 2013, issue 4, pp. 52-59.
16. Shestovitskiy D. A. *Prognozirovaniye sroka sluzhby zhelezobetonnykh mostov* [Service life prediction of reinforced concrete bridges]. *Mosty ta tuneli: teoriya, doslidzhennya, praktyka – Bridges and tunnels: theory, research, practice*, 2013, issue 4, pp. 120-129.
17. ISO 2394, 1998. *General principles on reliability for structures 2nd edn*. Geneva, Switzerland : ISO.
18. Takewaka K., Mastumoto S. *Quality and Cover Thickness of Concrete Based on the Estimation of Chloride Penetration in Marine Environments*. ACI SP 109-17, American Concrete Institute, 1988. pp. 381-400.
19. Tingcheng Yan, Chunhua Lu, Zhiren Wu, Ronggui Liu *Durability of Pre-stressed Concrete Structure Suffering from Chloride Ions Invasion*. *International Journal of Nonlinear Science*, 2008, vol. 5, pp. 184-192.

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. В. Д. Петренко (Украина), д.т.н., проф. А. А. Плугиним (Украина).

Поступила в редколлегию 20.08.2016.

Принята к печати 26.09.2016.