

Методика определения ширины раскрытия коррозионных трещин для оценки технического состояния железобетонных конструкций

*Аспирант В.Б. Степанов**

ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Ключевые слова: коррозия; измерение трещин; ресурс конструкций

Исчерпание расчетного срока службы зданий и сооружений, построенных в период массового строительства второй половины прошлого века, приводит к необходимости контроля их остаточного ресурса. В этих случаях проводится оценка необходимости выполнения усиления или демонтажа, разрабатываются мероприятия по дальнейшей эксплуатации конструкции и сооружения в целом.

Определение технического состояния железобетонных конструкций является сложной и актуальной задачей. Это объясняется наличием неконтролируемых факторов и параметров, влияющих на совместную работу бетона и арматуры и их физико-механические характеристики. Большинство параметров оценивается по косвенным данным, так как изъятие фрагментов арматуры и бетона приводит к снижению несущей способности конструкции.

Анализ работ, посвященных развитию методик, инструментальной базы, надежности оценки коррозионного поражения железобетонных конструкций [1-11], позволил выделить три основных направления: вихретоковые измерения коррозии арматуры [6,9,10], ультразвуковая методика [5,7], контроль электрических параметров (потенциала и силы тока в паре бетон – арматура) [8,11]. Также проводится оценка изменения частот колебаний конструкции [3] вследствие коррозии, разрабатываются методики установки и мониторинга образцов-свидетелей, содержащих изотопную метку [1], сенсоров коррозии арматуры [4].

Следует отметить, что перечисленные способы инструментальной оценки коррозионного поражения конструкций трудоемки, а иногда невыполнимы. При большом объеме обследования очевидной характеристикой изменения технического состояния конструкций могут явиться внешние признаки. Такие признаки выявляются в виде дефектов при изменении структуры и сплошности бетона, при обнаружении значительных деформаций.

Коррозия арматуры приводит к изменению ее структуры и площади сечения. При этом производятся продукты коррозии (гидроксиды железа), нарушается сцепление арматуры с бетоном, появляются коррозионные (продольные) трещины. Появление первых видимых коррозионных трещин [12] наблюдается уже при потере площади сечения арматуры более 0,5%. Отслоения защитного слоя бетона свидетельствуют о значительных коррозионных повреждениях. Это создает предпосылки к совершенствованию методик измерения ширины раскрытия коррозионной трещины как наиболее доступного для инструментальной оценки показателя состояния железобетонных конструкций.

Показателен тот факт, что, несмотря на частое использование критерия ширины раскрытия трещины при описании технического состояния конструкции, а также в научных и исследовательских работах, анализ методики ее измерения не проводился. Возможно, это явилось следствием нормативного ограничения ширины раскрытия силовых трещин и использования ее максимального значения в качестве контролируемого параметра [13].

На кафедре СКМ СПбГПУ был разработан и опробован новый подход к проведению измерений и обработке опытных данных. Новизна предлагаемой методики заключается в определении осредненного значения ширины раскрытия трещины a_{crc} по отношению площади суммарного лицевого раскрытия S_{crc} трещины к длине ее берегов L_{crc} :

$$a_{crc} = \frac{S_{crc}}{L_{crc}}.$$

Наиболее простым способом реализации предлагаемой методики может стать фотофиксация поврежденных участков с последующей оцифровкой и масштабированием изображения. Масштабирование размеров трещины производится при помощи рамки прямоугольного очертания установленной площади (рис. 1).

Степанов В.Б. Методика определения ширины раскрытия коррозионных трещин для оценки технического состояния железобетонных конструкций



Рисунок 1. Измерение коррозионной трещины с использованием рамки для масштабирования



Рисунок 2. Контур трещины после обработки в графическом редакторе

Для улучшения качества аппаратной обработки изображения рекомендуется производить инъектирование (затирку) трещин составом, контрастного к общему фону цвета. Графические редакторы позволяют вычлнить нужный спектр из общей палитры цветов.

Получение изображения может производиться при помощи сканирующих устройств. При этом не требуется фокусировка объектива и масштабирование рисунка, отсутствует оптическое искажение снимка, характерное для фотографии. Разрешающая способность сканирующих устройств находится в пределах 150...600 до 1000 spі. Разрешение 600 spі соответствует значению $25,4/600=0,042\text{мм}$, что сопоставимо с ценой деления микроскопа МПБ-2 (0,02мм и 0,04мм на шкалах 50х и 25х соответственно).

Представленные средства измерений используются для оценки интегрального значения ширины раскрытия коррозионной трещины на участке длиной l_0 . В пределах исследуемого участка может наблюдаться отклонение планового положения трещины от проекции центра тяжести арматуры. Это объясняется конгломератной структурой бетонного камня. Развитие трещин происходит по поверхности зерен крупного заполнителя, раскрываясь в виде линии криволинейного очертания (см. рис. 4).

Проведенные ранее исследования [14] показывают пропорциональную зависимость ширины раскрытия трещины от величины защитного слоя бетона. Поэтому на участке со значительной кривизной трещины действительное значение степени коррозии арматуры, как функции от ширины раскрытия трещины, может быть переоценено. Указанную погрешность предлагается компенсировать пересчетом с определением приведенной ширины раскрытия трещины a_{crc}^{red} . Коэффициент приведения определяется (см. рис. 3) по углу, образованному проекцией нормали и условной плоскостью проложения трещины к центральной оси арматуры:

$$a_{crc}^{red} = a_{crc} \cdot \cos^2 \alpha ,$$

$$\alpha = \arctg \frac{x}{c} ,$$

где c – величина защитного слоя бетона;

x – отклонение трещины от нормальной проекции центральной оси арматуры на поверхности бетонного камня.

Максимальное отклонение трещины (см. рис. 4):

$$x_{max} = \frac{\sqrt{l_{crc}^2 - l_0^2}}{2n} ,$$

где $n=1...4$ и более – показатель, характеризующий линейность трещины.

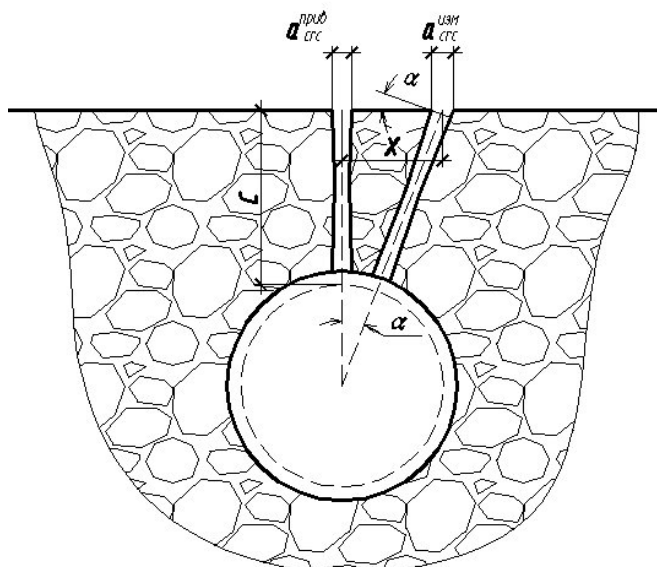
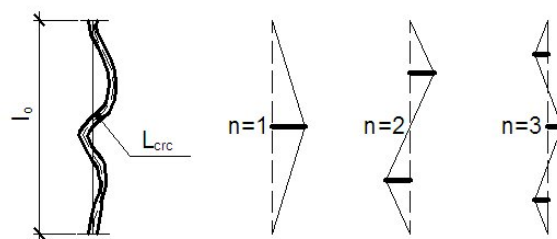
Рисунок 3. Графическое определение $a_{крс}^{ред}$ 

Рисунок 4. Определение показателя линейности коррозионной трещины

Тогда среднее значение отклонения трещины на рассматриваемом участке:

$$|x| = \frac{x_{max}}{2} = \frac{\sqrt{l_{крс}^2 - l_0^2}}{4n}$$

Окончательно приведенное значение ширины раскрытия трещины:

$$a_{крс}^{ред} = a_{крс} \cdot \cos^2\left(\arctg \frac{x}{c}\right) = a_{крс} \cdot \cos^2\left(\arctg \frac{\sqrt{l_{крс}^2 - l_0^2}}{4n \cdot c}\right),$$

где $a_{крс}$ - измеренное значение ширины раскрытия трещины; $l_{крс}$ - осредненное значение длины берегов трещины; l_0 - длина участка поверхности измеряемой трещины; n - показатель линейности трещины, численно равный количеству максимумов в соответствии с рис. 4; c - величина защитного слоя бетона.

При увеличении показателя n уменьшается эффект приведения ширины раскрытия трещины, который характеризуется отношением $a_{крс}/a_{крс}^{ред}$. При $l_0 \leq 50$ и $n > 4$ можно пренебречь ее нелинейностью, так как погрешность измерения $a_{крс}$ не превышает 1%.

Эффективность введения новой характеристики коррозионного поражения арматуры – приведенной ширины раскрытия трещины – оценивалась по результатам проведенного эксперимента (табл. 1).

Для этого на восьми участках поверхности железобетонных образцов проводились замеры ширины раскрытия трещины стандартным методом (микроскопом МПБ-2 с ценой деления шкалы 0,02 мм) и интегральным методом (с помощью рамки и цифрового фотоаппарата). В первом случае измерения велись по нормали к локальному направлению трещины с шагом 1 см. Количество измерений принималось равным длине рассматриваемого участка – от 4 до 10 см. Среднее значение ширины раскрытия трещин на рассматриваемых участках составило от 0,7 до 1,4 мм.

Оценка фактического коррозионного поражения арматуры проводилась гравиметрическим методом. Иначе говоря, измерялась длина и масса фрагментов арматуры после удаления продуктов коррозии. Результаты, представленные в таблице 1, проиллюстрированы на рис. 5.

Таблица 1. Результаты измерения ширины раскрытия коррозионной трещины различными методиками (МВИ)

№ Уч.	Интегральный метод		Микроскоп МПБ-2				Разность оценок МВИ		Степень коррозионного поражения арматуры, %
	Ширина раскрытия трещины, изм., мм*100	Ширина раскрытия трещины, прив., мм*100	Число измерений в серии	Максимальное в серии, мм*100	Минимальное в серии, мм*100	Среднее, мм*100	В абс. ед. мм*100	В проц. от (3)	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	91	90	10	96	60	83	7	8,2%	11,48
2	144	142	7	316	114	166	-24	-16,8%	14,92
3	137	128	10	144	90	130	-2	-1,4%	18,20
4	111	110	10	156	94	114	-4	-3,6%	11,52
5	111	110	7	152	56	102	8	6,9%	10,65
6	125	122	4	216	62	119	3	2,4%	12,29
7	112	111	6	226	68	133	-22	-19,9%	13,46
8	74	74	5	100	52	69	5	6,7%	14,07

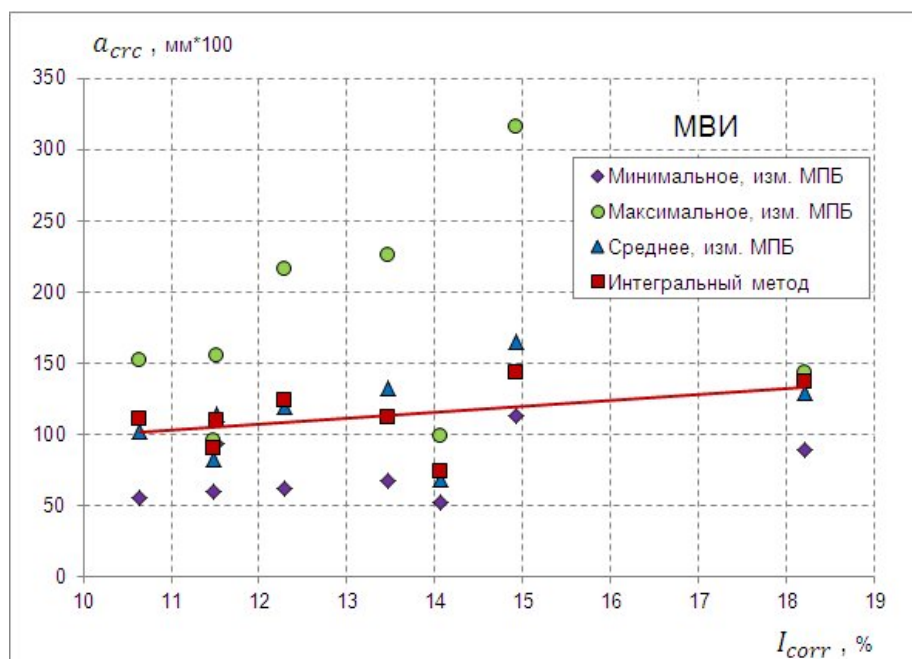


Рисунок 5. Сравнительный анализ методик выполнения измерений

Следует обратить внимание на тот факт, что при назначении шага измерений по стандартной методике, положение шкалы микроскопа может совпасть с локальными дефектами поверхности бетона (кавернами и выколами). Поэтому полученные значения максимальной ширины раскрытия трещины могут не отражать степени коррозионного поражения арматуры. Необходимость цензурирования значений наводит на мысль о применимости данного критерия. Попытка осуществлять выборочные измерения приводит к возникновению субъективных погрешностей.

Измерения интегральным методом позволяют получить более точное значение средней ширины раскрытия трещины по сравнению со стандартной методикой измерений. Это может быть одной из причин плохой корреляции степени коррозии арматуры и ширины раскрытия трещины в проведенных ранее исследованиях [15]. Другой объективной причиной следует считать изменение величины [16] дополнительного давления продуктов коррозии на окружающий слой бетона. При различной интенсивности коррозионных воздействий образуется слой продуктов коррозии различной толщины вследствие их частичной диссипации в поры бетона.

Оценка степени коррозионных повреждений может производиться по аналитической формуле [17]:

$$w_c = \frac{4\pi d_s}{(1-\nu_c)(a/b)^{\sqrt{\alpha}} + (1+\nu_c)(b/a)^{\sqrt{\alpha}}} - \frac{2\pi b f_t}{E_{ef}},$$

где w_c – ширина раскрытия трещины; d_s – толщина слоя продуктов коррозии; ν_c – коэффициент Пуассона для бетона; a и b – соответственно радиус арматуры и величина защитного слоя бетона от ее центра; α – коэффициент изменения жесткости бетона; f_t – прочность бетона на растяжение; E_{ef} – значение модуля деформации бетона.

Приведенная формула позволяет рассматривать показатель средней ширины раскрытия трещины как самостоятельный параметр коррозионных повреждений. Следует отметить, что прочность железобетонных конструкций, подверженных коррозии арматуры, снижается до 10-25%, жесткость – до 50% [12,14,18]. В работах отмечается, что изменение прочности и жесткости происходит главным образом из-за потери сцепления между арматурой и бетоном. Изменение последнего может быть выражено через толщину слоя продуктов коррозии, но не степени коррозионного поражения арматуры. Доступным фактором этой оценки является осредненная ширина раскрытия трещины.

На основании вышеизложенного сформулированы основные выводы по статье.

1. Разработана новая методика определения ширины раскрытия трещины. Она включает в себя получение изображений поврежденных участков (см. рис. 1) с последующей оцифровкой и масштабированием (см. рис. 2). Новизна предлагаемой методики заключается в подходе к определению осредненного значения ширины раскрытия трещины a_{crc} по отношению площади суммарного лицевого раскрытия S_{crc} трещины к длине ее берегов L_{crc} .

2. Интегральный метод оценки избавляет от субъективных погрешностей, связанных с расположением и ориентацией измерительного прибора. Осреднение ширины раскрытия трещины позволяет выполнять математическую обработку и корректировку результатов измерения, в том числе учесть методические погрешности, вызванные случайным характером ее изменения.

3. Для учета геометрической нелинейности раскрытия трещины вводится понятие ее приведенного значения. Этот показатель может более точно характеризовать техническое состояние конструкций, так как учитывает зависимость ширины раскрытия трещины от величины защитного слоя бетона. То же используется для переменной величины защитного слоя бетона по длине арматуры.

4. Контроль остаточного ресурса зданий и сооружений может производиться по внешним признакам. Осредненное значение ширины раскрытия трещины должно стать самостоятельным параметром оценки коррозионных повреждений конструкций для определения деструкции и остаточной прочности бетонной матрицы вследствие давления продуктов коррозии арматуры.

Литература

1. Пастухов Ю. В., Сидельникова О. П. Контроль коррозии при эксплуатации зданий и сооружений в особых условиях // Вестник ВолгГАСУ. Выпуск 7(26). Строительство и архитектура. Волгоград, 2007. С. 41-44.
2. Наумова Г. А., Гарибов Р. Б. Прочностной мониторинг потенциально опасных строительных объектов, выполненных из железобетона, с учетом реальных условий эксплуатации // Вестник ВолгГАСУ. Выпуск 8(27). Строительство и архитектура. Волгоград, 2007. С. 37-45.

Степанов В.Б. Методика определения ширины раскрытия коррозионных трещин для оценки технического состояния железобетонных конструкций

3. Capozucca R., Nilde Cerri M. Identification of damage in reinforced concrete beams subjected to corrosion // *ACI Structural Journal*. Vol. 97. No. 6. November-December 2000. Pp. 902-909.
4. Marsh P., Frangopol D. Lifetime multiobjective optimization of cost and spacing of corrosion rate sensors, embedded in a deteriorating reinforced concrete bridge deck // *ASCE*. June 2007. Pp 777-787.
5. Ing M. Detection of Reinforcement Corrosion by an Acoustic Technique. Doctoral thesis, submitted in partial fulfilment of the requirements for the award of EngD of Loughborough University. September 2003.
6. Nygaard P., Geiker M., Elsener B. Corrosion rate of steel in concrete: evaluation of confinement techniques for on-site corrosion rate measurements // *Materials and Structures* 42 (2009). Pp. 1059–1076.
7. Katwan M., Hodgkiess T., Arthur P. Study of electrochemical noise technique for the prediction of corrosion rate of steel in concrete // *Materials and Structures*. June 1996. Pp. 286–294.
8. Lambert P., Page C. Investigations of reinforcement corrosion 2. Electrochemical monitoring of steel in chloride-contaminated concrete // *Materials and Structures*. Vol. 24. Pp. 351–358.
9. Andrade C., Alonso C. Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method // *Materials and Structures*. Vol. 37. November 2004. Pp. 623–643.
10. Andrade C., Martinez I. Calibration by gravimetric losses of electrochemical corrosion rate measurement using modulated confinement of the current // *Materials and Structures*. Vol. 38. November 2005. Pp. 833-841.
11. El-Gelany M. Short-term corrosion rate measurement of OPC and HPC reinforced concrete specimens by electrochemical techniques // *Materials and Structures*. Vol. 34. August-September 2001. Pp. 426–432.
12. Mangat P., Elgarf M. Flexural strength of concrete beams with corroding reinforcement // *ACI Structural Journal*. Vol. 96. No. 1. January-February 1999. Pp. 149-158.
13. Пособие по обследованию строительных конструкций зданий / АО «ЦНИИПРОМЗДАНИЙ». М., 2004. 208 с.
14. Степанов В. Б., Мельков Б. Н., Белов В. В. Экспериментальное исследование зависимостей: степень коррозии арматуры – сцепление арматуры с бетоном – прочность и жесткость железобетонных конструкций, подверженных коррозии арматуры // Сборник «Труды Псковского политехнического института». №14.2 (Строительство экономика). Псков: Издательство ППИ, 2010. С. 128-138.
15. Tammo K., Thelandersson S. Crack behavior near reinforcing bars in concrete structures // *ACI Structural Journal*. Vol. 106. No. 3. May-June 2009. Pp. 259-267.
16. Vu K., Stewart M., Mullard J. Corrosion-induced cracking: experimental data and predictive models // *ACI Structural Journal*. Vol. 102. No. 5. September-October 2005. Pp. 719-726.
17. Li C., Melchers R. Time-dependent reliability analysis of corrosion-induced concrete cracking // *ACI Structural Journal*. Vol. 102. No. 4. July-August 2005. Pp. 543-549.
18. Чаганов А. Б. Прочность и жесткость железобетонных ребристых плит с нарушением сцепления арматуры с бетоном. Автореферат на соискание ученой степени к.т.н. 2008. 158 с.

** Виталий Борисович Степанов, г. Псков, Россия*

Тел. моб.: +7(911)356-33-28; эл. почта: vital60rus@mail.ru

© Степанов В.Б., 2012

doi: 10.5862/MCE.31.1

The method of corrosion crack opening evaluation for the reinforced concrete structures technical state assessment

V.B. Stepanov,*Saint-Petersburg State Polytechnical University, Saint-Petersburg, Russia**+7(911)356-33-28; e-mail: vital60rus@mail.ru*

Key words

corrosion; crack measuring; resource of structures

Abstract

The problem of the reinforced concrete structures technical state assessment assumes the improvement of techniques of their nondestructive control. Therefore, the technique based on criterion of integral values of the crack opening width is proposed.

This criterion can serve as independent parameter of corrosion damage. Average value of crack width allows estimating thickness of corrosion products for determination residual bond between concrete and reinforcement.

The comparative analysis with a standard technique of measurement is carried out. Shortcomings of maximum crack width as a parameter of serviceability are shown. The integrated technique does possible correction, taking into account nonlinearity of a crack, size of concrete layer, excludes manifestation of the methodical and subjective errors peculiar to a standard technique of measurement.

References

1. Pastukhov Yu. V., Sidelnikova O. P. *Vestnik VolgGASU* [Bulletin of VolgGASU]. Vol. 7(26) (Building and architecture). Volgograd: 2007. Pp. 41-44. (rus)
2. Naumova G. A., Garibov R. B. *Vestnik VolgGASU* [Bulletin of VolgGASU]. Vol. 8(27) (Building and architecture). Volgograd: 2007. Pp. 37-45. (rus)
3. Capozucca R., Nilde Cerri M. Identification of damage in reinforced concrete beams subjected to corrosion. *ACI Structural Journal*. 2000. V. 97. No. 6. Pp. 902-909.
4. Marsh P., Frangopol D. Lifetime multiobjective optimization of cost and spacing of corrosion rate sensors, embedded in a deteriorating reinforced concrete bridge deck. *ASCE*. June 2007. Pp 777-787.
5. Ing M. Detection of Reinforcement Corrosion by an Acoustic Technique. *Doctoral thesis, submitted in partial fulfilment of the requirements for the award of EngD of Loughborough University*. 2003, September.
6. Nygaard P., Geiker M., Elsener B. Corrosion rate of steel in concrete: evaluation of confinement techniques for on-site corrosion rate measurements. *Materials and Structures*. 2009. Vol. 42. Pp 1059 – 1076.
7. Katwan M., Hodgkiess T., Arthur P. Study of electrochemical noise technique for the prediction of corrosion rate of steel in concrete. *Materials and Structures*. 1996. June. Pp. 286–294.
8. Lambert P., Page C. Investigations of reinforcement corrosion 2. Electrochemical monitoring of steel in chloride-contaminated concrete. *Materials and Structures*. Vol. 24. Pp. 351–358.
9. Andrade C., Alonso C. Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method. *Materials and Structures*. 2004. Vol. 37. Pp. 623–643.
10. Andrade C., Martinez I. Calibration by gravimetric losses of electrochemical corrosion rate measurement using modulated confinement of the current. *Materials and Structures*. 2005. Vol. 38. Pp. 833–841.
11. El-Gelany M. Short-term corrosion rate measurement of OPC and HPC reinforced concrete specimens by electrochemical techniques. *Materials and Structures*. 2001. Vol. 34. Pp. 426–432.
12. Mangat P., Elgarf M. Flexural strength of concrete beams with corroding reinforcement. *ACI Structural Journal*. 1999. Vol. 96. No. 1. Pp. 149-158.
13. *Posobiye po obsledovaniyu stroitelnykh konstruksiy zdaniy* [Manual for building structures inspection]. Moscow:TsNIIPROMZDANI, 2004. 208 p. (rus)

Stepanov V.B. The method of corrosion crack opening evaluation for the reinforced concrete structures technical state assessment

14. Stepanov V. B. Melkov B. N. Belov V. V. *Sbornik «Trudy Pskovskogo politekhnicheskogo instituta»* [Collection of Pskov politechnical university proceedings]. No. 14.2 (Building and economy). Pskov: Izdatelstvo PPI, 2010. Pp. 128-138. (rus)
15. Tammo K., Thelandersson S. Crack behavior near reinforcing bars in concrete structures. *ACI Structural Journal*. 2009. V. 106. No. 3. Pp. 259-267.
16. Vu K., Stewart M., Mullard J. Corrosion-induced cracking: experimental data and predictive models. *ACI Structural Journal*. 2005. Vol. 102. No. 5. Pp. 719-726.
17. Li C., Melchers R. Time-dependent reliability analysis of corrosion-induced concrete cracking. *ACI Structural Journal*. 2005. V. 102. No. 4. Pp. 543-549.
18. Chaganov A. B. *Prochnost i zhestkost zhelezobetonnykh rebristyykh plit s narusheniyem stsepleniya armatury s betonom* [The strength and stiffness of reinforced concrete ribbed slabs with rebar debonding with concrete]. Abstract for the degree of Ph.D. 2008. 158 p. (rus)

Full text of this article in Russian: pp. 6-11