

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 1. С. 142–151.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2023; 25 (1): 142–151.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.012.3/.4

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-1-142-151

О НОРМИРОВАНИИ НАДЕЖНОСТИ ПО РАСКРЫТИЮ НОРМАЛЬНЫХ ТРЕЩИН ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Евгений Петрович Герасимов

*Новосибирский государственный университет архитектуры,
дизайна и искусств имени А.Д. Крячкова, г. Новосибирск, Россия*

Аннотация. Настоящая статья посвящена вопросу установления нормативного значения вероятности безотказной работы по раскрытию трещин изгибаемых железобетонных конструкций. При этом рассматривается ширина раскрытия только нормальных трещин исходя из сохранности арматуры, т. е. сохранности вследствие ее коррозии.

Был применен вероятностно-оптимизационный метод, когда вместо традиционных экономических показателей были использованы отвлеченные величины: мера сохранности и мера коррозионного повреждения арматуры. Обе величины варьируются от 0 до 1. Приведены основные расчетные формулы, последовательность расчета и результаты расчета. Вероятность безотказной работы вычислялась в предположении, что все исходные параметры конструкции и внешних воздействий распределены по нормальному закону. Расчеты выполнены в зависимости от продолжительности раскрытия трещин и предельно допустимых значений ширины раскрытия трещин. Полученные численные значения нормативных вероятностей безотказной работы зависят от предельно допустимых значений ширины раскрытия трещин, установленных нормами. От продолжительности раскрытия трещин они не зависят.

Результаты расчетов могут быть использованы при выполнении вероятностного метода расчета железобетонных конструкций.

Ключевые слова: изгибаемые строительные конструкции, нормативная надежность, вероятностные методы расчета строительных конструкций, нормальные трещины

Для цитирования: Герасимов Е.П. О нормировании надежности по раскрытию нормальных трещин изгибаемых железобетонных элементов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 1. С. 142–151. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-1-142-151.

ORIGINAL ARTICLE

RELIABILITY SPECIFICATION OF CRACK OPENING
IN FLEXURAL REINFORCED CONCRETE ELEMENTS

Evgeniy P. Gerasimov

Novosibirsk State University of Architecture, Design and Arts,
Novosibirsk, Russia

Abstract. The paper focuses on the reliability specification of trouble-free operation crack opening in flexural reinforced concrete structures. The opening width is considered based on the reinforcement safety, i.e., safety due to corrosion.

The probabilistic approach is used in this paper. Instead of traditional economic indicators, abstract values were used, i.e., measures of safety and corrosion damage of reinforcement. Both values range from 0 to 1. Basic formulas, calculation sequence and results are given herein. The probability of trouble-free operation is calculated under the assumption that all initial design parameters and external influences are distributed according to the normal law. Calculations are performed depending on the crack opening duration and maximum permissible values of crack opening width. The obtained values of the reliability specification of trouble-free operation depend on the maximum permissible values of the standard crack opening width. They not depend on the crack opening duration. Calculation results can be used in the probabilistic approach to reinforced concrete structures.

Keywords: flexural reinforced concrete elements, standard reliability, probabilistic approach, structure, normal cracks

For citation: Gerasimov E.P. Reliability specification of crack opening in flexural reinforced concrete elements. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (1): 142–151. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-1-142-151.

Железобетон – один из немногих материалов, который допускает наличие в нем трещин. Трещины возникают во время изготовления железобетонных конструкций, их транспортировки, монтажа и эксплуатации. Согласно СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции», все железобетонные конструкции делятся на две категории: конструкции, в которых не допускается образование трещин, и конструкции, в которых трещины могут быть, но ширина раскрытия не должна превышать предельно допустимых значений. Данные значения назначены исходя из сохранности арматуры и ограничения проницаемости конструкций.

Расчет по раскрытию трещин, согласно СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции», производится из условия

$$a_{crc} \leq a_{crc,ult}, \quad (1)$$

где a_{crc} – ширина раскрытия трещин от действия внешней нагрузки; $a_{crc,ult}$ – предельно допустимая ширина раскрытия трещины.

Ширина раскрытия трещин, как и все остальные параметры железобетонных конструкций, имеет случайный характер. При использовании вероятностного метода расчета условие (1) изменится и примет следующий вид:

$$P_f(a_{crc} \leq a_{crc,ult}) \leq [P_f], \quad (2)$$

где $P_f(a_{crc} \leq a_{crc,ult})$ – вероятность того, что ширина раскрытия трещин не превысит допустимого значения; $[P_f]$ – нормативное значение вероятности (или нормативная надежность).

Левая часть неравенства (2) решается известными методами вероятностного расчета, имея необходимую статистическую информацию. Значение нормативной надежности в настоящее время не определено. Существует довольно много работ, где предлагаются методы определения нормативной надежности или предлагаются конкретные значения [1–9]. Но все данные работы касаются определения нормативной надежности конструкций с точки зрения их несущей способности. Это справедливо, т. к. потеря несущей способности ведет к большим экономическим и (или) социальным последствиям. Нарушение пригодности к нормальной эксплуатации, к чему относится расчет по раскрытию трещин, не приводит к последствиям такого масштаба. Но это все равно требует правильного назначения нормативной надежности при выполнении подобных расчетов.

В настоящей статье рассмотрен вопрос об определении значения нормативной надежности по ширине раскрытия трещин только из условия сохранности арматуры. То есть определение данного значения будет производиться из того соображения, чтобы поврежденность арматуры не превышала какую-то предельную, допустимую величину. Повреждение арматуры происходит вследствие ее коррозии.

Существует предложение по условной оценке коррозионного состояния арматуры, согласно которому происходит уменьшение площади поперечного сечения арматуры по градации: до 5 %, 5–5 % и более 15 % [10]. Кроме этого, предлагалось, что максимально допустимую толщину слоя поврежденной части сечения арматуры ограничить 50 % от начальной площади сечения [Там же].

Повреждение арматуры от коррозии в трещинах зависит от скорости коррозии, которая представляет собой проблему, не нашедшую исчерпывающего решения.

Скорость коррозии зависит от ряда факторов.

1. Степень агрессивности среды. В табл. 1 приведены данные о средних скоростях коррозии арматуры для разных условий окружающей среды [Там же].

Таблица 1

Средние скорости коррозии арматуры

Table 1

Average corrosion rates of reinforcement

Условия окружающей среды	Влияние скорости коррозии	
	Количественная характеристика	Значение скорости, мм/год
Внутри помещения	Отсутствие следов коррозии при влажности менее 60 %	–
Открытая поверхность вне помещения	Незначительная скорость коррозии в стандартных атмосферных условиях	0,04
	Средняя скорость коррозии в условиях промышленной среды	0,1

Окончание табл. 1

End of Table 1

Условия окружающей среды	Влияние скорости коррозии	
	Количественная характеристика	Значение скорости, мм/год
Интенсивные воздействия среды	Высокая скорость коррозии в условиях присутствия солей	0,2–0,3
	Очень высокая скорость при сложных и интенсивных агрессивных воздействиях	0,6–1,8

2. Водоцементное отношение. Способность бетона защищать арматуру в трещине возрастает со снижением водоцементного отношения [11].

3. Ширина раскрытия трещины. Коррозия арматуры возникает во всех трещинах раскрытием более 0,05 мм. На рис. 1 приведены обобщенные глубины коррозионного повреждения арматуры в зависимости от ширины раскрытия трещин [Там же].



Рис. 1. Зависимость глубины коррозионного повреждения арматуры от ширины раскрытия трещины. Цифры у кривых – годы

Fig. 1. Dependences between corrosion damage depth of reinforcement and crack width. Numerals above curves indicate years

Как видно, коррозионный процесс протекает с замедлением во времени.

4. Периодическое изменение влажности. Если единственным агрессивным воздействием окружающей среды является карбонизация, то при значении относительной влажности от 90 до 98 % скорость коррозии рекомендуется принимать от 0,005 до 0,01 мм/год. При влажности менее 85 % скорость коррозии принимается не более 0,002 мм/год. В случае воздействия хлоридов и относительной влажности 100 % скорость коррозии должна быть не более 0,01 мм/год. При влажности от 80 до 95 % скорость составляет от 0,05 до 0,1 мм/год [10].

Таким образом, предложений по оценке коррозионного состояния и факторов, влияющих на скорость коррозии, а следовательно, и на поврежденность арматуры, довольно много. В связи с этим при выполнении необходимых расчетов в настоящей статье в качестве основного параметра был выбран допускаемый процент коррозионного повреждения арматуры. Согласно [Там же], существует градация уменьшения площади поперечного сечения арматуры: до 5 %, 5–15 % и более 15 %. Можно считать, что подобное пред-

ложение верно не всегда: для арматурных стале́й класса А240, А400 допускается принимать постепенное уменьшение поперечного сечения стержня, для предварительно напряженных арматурных стале́й подобное уменьшение не допускается [10]. Но для нахождения нормативной надежности по ширине раскрытия трещин примем данную градацию.

В табл. 2 приведены допускаемые значения ширины раскрытия трещин согласно СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции» в зависимости от продолжительности раскрытия и классов арматуры.

Таблица 2

Допускаемые значения ширины раскрытия трещин

Table 2

Allowable values of crack width

Продолжительность раскрытия	Классы арматуры		
	A240 – A600, B500	A800, A1000, Bp1200 – Bp1400, K1400, K1500, K1600 (Ø12)	Bp1500, K1600 (Ø6,9)
Продолжительное	0,3 мм	0,2 мм	0,1 мм
Непродолжительное	0,4 мм	0,3 мм	0,2 мм

Для выполнения необходимых расчетов максимальное допускаемое уменьшение площади сечения арматуры примем (соответственно в зависимости от продолжительности раскрытия):

– 15 % – для максимальных значений ширин раскрытия трещин (0,3 и 0,4 мм);

– 10 % – для средних значений (0,2 и 0,3 мм);

– 5 % – для минимальных значений ширин раскрытия трещин (0,1 и 0,2 мм).

Зависимости допускаемых уменьшений площади сечений арматуры от ширины раскрытия трещин приведены на рис. 2 и 3.



Рис. 2. Зависимость допускаемого уменьшения площади сечения арматуры от ширины раскрытия трещин при их продолжительном раскрытии

Fig. 2. Dependence between allowable reduction in reinforcement section area and crack width during long-term opening



Рис. 3. Зависимость допустимого уменьшения площади сечения арматуры от ширины раскрытия трещин при их непродолжительном раскрытии

Fig. 3. Dependence between allowable reduction in reinforcement section area and crack width during short-term opening

В качестве основного метода для определения нормативного значения надежности по раскрытию трещин предлагается использовать вероятностно-оптимизационную модель [12]:

$$C = C_0 + C_f \cdot Q_f \rightarrow \min. \quad (3)$$

Вместо экономических показателей (C_0 и C_f) предлагается применить величины, связанные с коррозионным повреждением арматуры:

C_0 – мера сохранности арматуры при уменьшении ее площади сечения в пределах допускаемых значений;

C_f – мера максимального коррозионного повреждения арматуры при достижении ширины раскрытия трещины предельно допустимых значений.

При расчете вышеуказанные меры были использованы в относительных, безмерных величинах. Так C_0 определялась по выражению

$$C_0 = 1 - \frac{d}{100}, \quad (4)$$

где d – величина уменьшения площади сечения арматуры, %.

C_f при расчете была принята равной единице ($C_f = 1$).

Вероятность отказа Q_f определялась через индекс надежности (β) в предположении, что все параметры конструкции и внешних воздействий распределены по нормальному закону:

$$\beta = \frac{a_{crc,ult} - \bar{a}_{crc}}{\sqrt{S_{a_{crc,ult}}^2 + S_{\bar{a}_{crc}}^2}}. \quad (5)$$

Так как предельно допустимая ширина раскрытия трещины $a_{crc,ult}$ имеет определенное фиксированное значение, то $S_{a_{crc,ult}}^2 = 0$, и тогда

$$\beta = \frac{a_{crc,ult} - \bar{a}_{crc}}{\sqrt{S_{a_{crc,ult}}^2 + S_{\bar{a}_{crc}}^2}} = \frac{a_{crc,ult} - \bar{a}_{crc}}{S_{\bar{a}_{crc}}} = \frac{a_{crc,ult} - \bar{a}_{crc}}{\bar{a}_{crc} \cdot v_{a_{crc}}}, \quad (6)$$

где $v_{a_{crc}}$ – коэффициент вариации ширины раскрытия трещины.

Коэффициент вариации был определен методом линеаризации.

Формула для определения ширины нормальной трещины имеет вид:

$$a_{crc} = \varphi_1 \cdot \varphi_2 \cdot \varphi_3 \cdot \psi_s \frac{\sigma_s}{E_s} \ell_s = \varphi_1 \cdot \varphi_2 \cdot \varphi_3 \cdot \psi_s \frac{q \cdot \ell^2 \cdot A_{bt}}{z_s \cdot E_s \cdot \pi^2 \cdot d_s^3}, \quad (7)$$

где $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ – коэффициенты, учитывающие продолжительность действия нагрузок, профиль арматуры и характер нагружения; ψ_s – коэффициент, учитывающий неравномерное распределение относительной деформации растянутой арматуры между трещинами; q – нагрузка, действующая на конструкцию; ℓ – пролет конструкции; A_{bt} – площадь сечения растянутого бетона; z_s – расстояние от центра тяжести растянутой арматуры до точки приложения равнодействующей усилий в сжатой зоне элемента; E_s – модуль упругости арматуры; d_s – диаметр арматурного стержня.

В формуле (7) случайными величинами приняты нагрузка, модуль упругости и коэффициент, учитывающий неравномерное распределение относительной деформации растянутой арматуры между трещинами. Остальные величины имеют определенные фиксированные значения, или их изменчивость очень незначительна, что можно ею пренебречь.

Частные производные составляют:

$$\begin{aligned} \frac{\partial a_{crc}}{\partial q} &= \varphi_1 \cdot \varphi_2 \cdot \varphi_3 \cdot \psi_s \frac{\ell^2 \cdot A_{bt}}{z_s \cdot E_s \cdot \pi^2 \cdot d_s^3}, \\ \frac{\partial a_{crc}}{\partial E_s} &= -\varphi_1 \cdot \varphi_2 \cdot \varphi_3 \cdot \psi_s \frac{q \cdot \ell^2 \cdot A_{bt}}{z_s \cdot E_s^2 \cdot \pi^2 \cdot d_s^3}, \\ \frac{\partial a_{crc}}{\partial \psi_s} &= \varphi_1 \cdot \varphi_2 \cdot \varphi_3 \frac{q \cdot \ell^2 \cdot A_{bt}}{z_s \cdot E_s \cdot \pi^2 \cdot d_s^3}. \end{aligned}$$

Среднее квадратическое отклонение ширины раскрытия трещины:

$$\begin{aligned} s_{a_{crc}} &= \sqrt{\left(\frac{\partial a_{crc}}{\partial q}\right)^2 s_q^2 + \left(\frac{\partial a_{crc}}{\partial E_s}\right)^2 s_{E_s}^2 + \left(\frac{\partial a_{crc}}{\partial \psi_s}\right)^2 s_{\psi_s}^2} = \\ &= \varphi_1 \cdot \varphi_2 \cdot \varphi_3 \cdot \psi_s \frac{q \cdot \ell^2 \cdot A_{bt}}{z_s \cdot E_s \cdot \pi^2 \cdot d_s^3} \sqrt{v_q^2 + v_{E_s}^2 + v_{\psi_s}^2}. \end{aligned} \quad (8)$$

После преобразования получаем

$$v_{a_{crc}} = \sqrt{v_q^2 + v_{E_s}^2 + v_{\psi_s}^2}, \quad (9)$$

где v_q – коэффициент вариации нагрузки; v_{E_s} – коэффициент вариации модуля упругости арматуры (при расчете было принято $v_{E_s} = 0,1$ [7]); v_{ψ_s} – коэффи-

ент вариации коэффициента, учитывающий неравномерное распределение относительной деформации растянутой арматуры между трещинами (при расчете было принято $v_{vs} = 0,047$ [7]).

Нагрузка, действующая на конструкцию, включает в себя постоянную и временную. Изменчивость нагрузок очень большая, поэтому при расчете было принято, что $v_q = 0,2$ [13].

Определение нормативной надежности по ширине раскрытия трещины производилось в следующем порядке:

1. Назначалась предельно допускаемая ширина раскрытия трещины в зависимости от продолжительности ее раскрытия ($a_{crc,ult}$) согласно СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции».

2. Исходя из предельно допускаемой ширины раскрытия трещины и ее продолжительности раскрытия устанавливалось максимальное допускаемое уменьшение площади сечения арматуры (5, 10 или 15 %).

3. Производилось назначение нескольких значений ширины раскрытия трещин – $\tilde{a}_{crc}$, при этом $\tilde{a}_{crc} < a_{crc,ult}$.

При каждом значении ширины раскрытия трещины определялось:

– уменьшение площади сечения арматуры d (в %) согласно графикам, приведенным на рис. 2 и 3;

– величина C_0 , формула (4);

– вероятность отказа Q_f .

Таким образом, варьируя значения ширины раскрытия трещин, можно добиться такого состояния, при котором в формуле (3) $C = \min$. По вероятности отказа определяется вероятность безотказной работы, которая принимается за нормативную надежность.

Результаты расчетов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты расчетов

Table 3

Calculation results

Продолжительность раскрытия трещин	Допускаемое значение ширины раскрытия трещин, мм	Нормативная надежность
Продолжительное	0,3	0,9954
	0,2	0,9974
	0,1	0,9988
Непродолжительное	0,4	0,9931
	0,3	0,9954
	0,2	0,9972

Как показали расчеты, значения нормативной надежности по ширине раскрытия трещин очень близки друг к другу. Наблюдается незначительное увеличение значения нормативной надежности при уменьшении ширины раскрытия трещин. Это можно объяснить тем, что при меньшей ширине раскрытия трещин требования к сохранности арматуры более жесткие.

На основании приведенных расчетов в качестве нормативной надежности по ширине раскрытия трещины предлагается принять одну, общую величину – 0,999. Данная величина превышает все значения, полученные по расчетам. Но она может быть скорректирована в случае изменения градации уменьшения площади поперечного сечения арматуры.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шпете Г. Надежность несущих строительных конструкций. Москва : Стройиздат, 1994. 288 с.
2. Таль К.Э. Вопросы надежности железобетонных сооружений за рубежом // Бетон и железобетон. 1973. № 11. С. 42–43.
3. Громацкий В.А. Оценка надежности железобетонных изгибаемых элементов по деформациям // Строительная механика и расчет сооружений. 2007. № 2. С. 35–40.
4. Тамразян А.Г. К оценке определения уровня риска ЧС по основным признакам его проявления на сооружение // Бетон и железобетон. 2001. № 5. С. 8–10.
5. Райзер В.Д. Анализ надежности конструкций при износе несущих элементов // Строительная механика и расчет сооружений. 2013. № 6. С. 16–20.
6. Перельмутер А.В. Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций. Москва : Изд-во АСВ, 2007. 256 с.
7. Лычев А.С. Надежность строительных конструкций. Москва : Изд-во АСВ, 2008. 184 с.
8. Райзер В.Д. Расчет и нормирование надежности строительных конструкций. Москва : Стройиздат, 1995. 352 с.
9. Райзер В.Д. Оптимизация надежности конструкций и безопасность человека // Строительная механика и расчет сооружений. 2009. № 6. С. 54–58.
10. Пухонто Л.М. Долговечность железобетонных конструкций инженерных сооружений. Москва : Изд-во АСВ, 2004. 424 с.
11. Алексеев С.Н. и др. Долговечность железобетона в агрессивных средах. Москва : Стройиздат, 1990. 320 с.
12. Ржаницын А.Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. Москва : Стройиздат, 1978. 239 с.
13. Мартынов Ю.С., Надольский В.В. Вероятностные модели воздействий для условий республики Беларусь // Вестник Полоцкого государственного университета. 2014. № 16. С. 13–19.

REFERENCES

1. Shpete G. Reliability of load-bearing building structures. Moscow: Stroyizdat, 1994. 288 p. (In Russian).
2. Tal' K.E. Reliability of reinforced concrete structures abroad. *Beton i zhelezobeton*. 1973; (11): 42-43. (In Russian).
3. Gromatskii V.A. Reliability assessment of reinforced concrete bending elements by deformation. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii*. 2007; (2): 35–40. (In Russian).
4. Tamrazyan A.G. Level of risk of emergencies estimated by the main signs of its manifestation on co-location. *Beton i zhelezobeton*. 2001; (5): 8–10. (In Russian).
5. Raizer V.D. Optimization of structural reliability and human safety. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii*. 2013; (6): 16–20. (In Russian).
6. Perel'muter A.V. Selected problems of reliability and safety of build-ings. Moscow: ASV, 2007. 256 p. (In Russian).
7. Lychev A.S. Reliability of buildings. Moscow: ASV. 2008. 184 p. (In Russian).
8. Raizer V.D. Structural analysis and reliability specification of build-ings. Moscow: Stroyizdat, 1995. 352 p. (In Russian).
9. Raizer V.D. Optimization of structural reliability and human safety. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii*. 2009; (6): 54–58. (In Russian).

10. *Puhonto L.M.* Operational life of reinforced concrete engineering structures. Moscow: ASV, 2004. 424 p. (In Russian).
11. *Alekseev S.H.* Operational life of reinforced concrete in corrosion media. Moscow: Stroyizdat, 1990. 320 p. (In Russian).
12. *Rzhanitsyn A.R.* Theoretical calculations of structural reliability. Moscow: Stroyizdat, 1978. 239 p. (In Russian).
13. *Martinov Y.S., Nadolskiy V.V.* Probabilistic models of impacts in the Republic of Belarus. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2014; (16): 13–19. (In Russian).

Сведения об авторе

Герасимов Евгений Петрович, канд. техн. наук, доцент, Новосибирский государственный университет архитектуры, дизайна и искусств, 630099, г. Новосибирск, Красный проспект, 38, GerasimovEP@mail.ru

Author Details

Evgeniy P. Gerasimov, PhD, A/Professor, Novosibirsk State University of Architecture, Design and Fine Arts, 38, Krasnyi Ave., 630099, Novosibirsk, Russia, GerasimovEP@mail.ru

Статья поступила в редакцию 22.11.2022
Одобрена после рецензирования 17.12.2022
Принята к публикации 23.01.2023

Submitted for publication 22.11.2022
Approved after review 17.12.2022
Accepted for publication 23.01.2023